

Schrauben mit planmäßiger Biegebeanspruchung

T 1980

T 1980

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BRAUNSCHWEIG
INSTITUT FÜR STAHLBAU

o. Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheer

Bericht Nr. 6079

"Schrauben mit planmäßiger
Biegebeanspruchung"

1987

Auftraggeber

Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 72 - 76
1000 Berlin 30

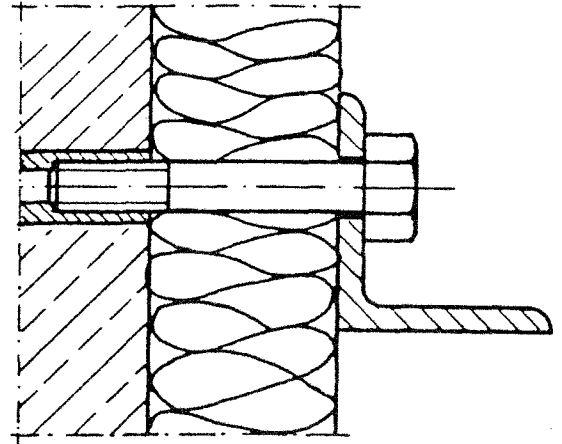
Dieser Bericht besteht aus 62 Seiten und 111 Anlagen

<u>Inhaltsverzeichnis</u>		Seite
1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Problemstellung und Lösungsweg	3
3	Versuchskonzeption	3
3.1	Allgemeines	3
3.1.1	Verwendete Festigkeitsklassen	4
3.1.2	Schraubendurchmesser	4
3.1.3	Hebelarm der Belastung (Exzentrizität)	4
3.1.4	Winkel der Belastung	4
3.1.5	Einschraubtiefe	5
3.2	Belastung	6
4	Versuchsbericht	7
4.1	Allgemeines	7
4.2	Versuchsprogramm	7
4.2.1	Vorversuche	7
4.2.2	Hauptversuche	8
4.3	Versuchskörper	9
4.3.1	Beschaffung der Versuchskörper	9
4.3.2	Werkstoffkennwerte	9
4.3.3	Vorhandene Schaftdurchmesser	11
4.4	Versuchsaufbau	11
4.5	Versuchsdurchführung und Dokumentation	14
4.6	Versuchsergebnisse	15
5	Theoretische Untersuchung	17
5.1	Allgemeines	17
5.2	Analytische Untersuchung	17
5.3	Untersuchung mittels FEM	18

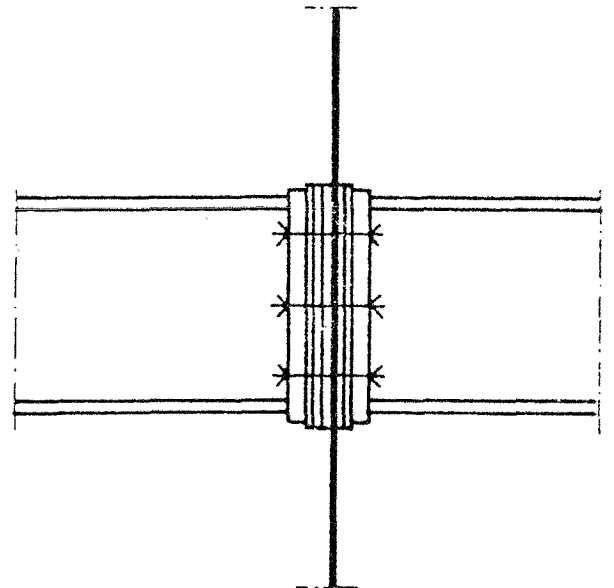
		Seite
6	Tragverhalten der Versuchskörper	33
6.1	Allgemeines	33
6.2	Definition der Grenzlast	38
6.3	Tragfähigkeit der Schrauben im Schaftbereich	39
6.4	Einfluß der Einschraubtiefe	42
6.5	Einfluß des Hebelarmes, M-Q-Interaktion	49
6.6	Einfluß der Normalkraft, M-N-Interaktion	52
7	Bewertung der Ergebnisse, Normenvorschlag	54
7.1	Allgemeines	54
7.2	Entwurf eines Normtextes	58
8	Zusammenfassung	60
9	Literaturverzeichnis	61

1 ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

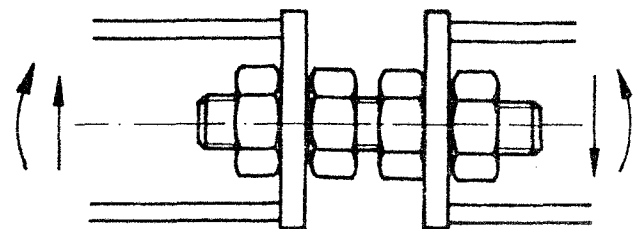
In der Praxis werden häufig Schrauben eingesetzt, deren Schraubenschaft Biegemomente überträgt. Ein Beispiel hierfür sind Schrauben von Metallspreizdübeln bei Fassadenabhängungen vor einer Dämmschicht. Dabei werden die in der Tragkonstruktion verankerten Schrauben planmäßig durch Biegung, Querkraft und bei Windsog zusätzlich durch Zug beansprucht.



Auch im konventionellen Stahlbau gibt es Schraubenverbindungen, bei denen die Biegung im Schraubenschaft zur Erhaltung des Gleichgewichts erforderlich ist und damit die aus den Biegemomenten stammende Spannung nicht etwa als Nebenspannung angesehen werden kann. Dies ist z. B. beim Querkraftanschluß mit Futterblechen der Fall, wie er u. a. im Geschoßbau beim Anschluß von Deckenträgern an querlaufende Unterzüge oder unmittelbar an Stützen vorkommt. Die verwendeten Futterbleche oder -pakete können in Grenzfällen relativ dick sein.



Im Gerüstbau werden, bedingt durch den Zwang zur Anpassung an geometrisch unterschiedliche Bedingungen, häufig Schraubenverbindungen eingesetzt, bei denen die Schrauben auf Biegung beansprucht werden. Beispielhaft ist hierfür die Obergurt-Verbindung eines Rüstträgers dargestellt.



Eine Ermittlung der Vergleichsspannung aus den Nennwerten der Biegenormalspannungen und Schubspannungen würde zu falschen Ergebnissen führen, da im Gewindegrund ein räumlicher Spannungszustand herrscht, der u. a. durch äußerst hohe Kerbfaktoren gekennzeichnet ist. Trotz zähen Werkstoffes besteht die Gefahr eines spröden Bruchs im Gewindegrund. Dieses Versagen gefährdet insbesondere Verbindungen mit mehreren Schrauben: Durch die unvermeidbaren Passungsungenauigkeiten wird zunächst eine Schraube überbeansprucht und versagt, da es wegen des spröden Verhaltens nicht zu einem Ausgleich der Beanspruchung mit den anderen Schrauben kommt. Es kommt zu einem "reiverschlulartigen" Versagen.

In Versuchen /2/ wurden derartige Brüche im kritischen Gewindegrund bei Biegebeanspruchung beobachtet. In /4/ sind Versuchsergebnisse angegeben, die eine deutliche Abnahme der Fließfähigkeit der Schraube anzeigen, wenn der Gewindebereich zur Kraftübertragung ausgenutzt wird.

Die Frage gewinnt zunehmend an Bedeutung für den Stahlbau, da im Entwurf von DIN 18 800, Teil 1 in Übereinstimmung mit der internationalen Entwicklung vorgesehen ist, Schraubenverbindungen mit planmäßiger Lage des Gewindes in den Scherfugen zuzulassen. Dies bringt Vorteile in der Lagerhaltung, da keine enge Abstufung der gewindefreien Schaftlänge mehr erforderlich ist. Die Entwicklung wird - wie in Österreich - zum Einsatz der sog. Maschinenbauerschrauben führen, bei dem das Gewinde bis gegen den Schraubenkopf geführt ist.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen dienen der Erarbeitung quantitativer Angaben über die zulässigen Beanspruchungen bei statischer Biegebeanspruchung von Schrauben, wobei die Interaktion gleichzeitig auftretender Quer- und Normalkraftbeanspruchungen mit untersucht wurden. Das Vorhaben beschränkt sich auf die Untersuchung vorwiegend ruhender Belastung. Auf eine genaue Ermittlung der statistischen Kennwerte aller Basisvariablen mußte aus Kostengründen verzichtet werden.

2 PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSWEG

Die Schwierigkeiten bei der Festlegung zulässiger Beanspruchungen für die Momententragfähigkeit im Gewindebereich von Schrauben sind größtenteils durch Unsicherheit in der Beurteilung des Tragverhaltens begründet. Die Auswirkungen des mehrachsigen Spannungszustandes im Kerbgrund des Gewindes auf das Tragverhalten der Schrauben unter Berücksichtigung von nichtlinearem Werkstoffverhalten (z. B. näherungsweise idealelastisch-idealplastisch bei 4.6-Schrauben) sind weitgehend unerforscht. Da bei Schrauben unterschiedliche Festigkeitsklassen mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften verwendet werden, wird eine umfangreiche experimentelle Parameterstudie durchgeführt, die über die verschiedenen Einflüsse auf das Tragverhalten Aufschluß geben soll. Zur Verdeutlichung des Tragverhaltens werden theoretische Untersuchungen durchgeführt. Dazu werden ein analytisches (Kerbspannungslehre) und ein numerisches Verfahren (Finite Elemente Methode) ausgewählt.

3 VERSUCHSKONZEPTION

3.1 Allgemeines

Um die verschiedenen Einflüsse auf das Tragverhalten zu erfassen, wurden folgende Parameter in den Versuchen variiert:

- Festigkeitsklasse der Schrauben
- Schraubendurchmesser
- Verhältnis M/Q
- Verhältnis M/N
- Einschraubtiefe

Die zu untersuchenden Parameter wurden wie folgt in Versuchen realisiert.

3.1.1 Verwendete Festigkeitsklassen

Zunächst wurden Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 5.6 und 10.9 untersucht. Wegen der Bedeutung der planmäßigen Biegebeanspruchung von Schrauben bei Metallspreizdübeln wurden ergänzend die dort häufig verwendeten Festigkeitsklassen 8.8 und A4-70 (nichtrostende Schrauben) untersucht.

3.1.2 Schraubendurchmesser

Um die Anzahl der Versuche in Grenzen zu halten, wurden überwiegend Schrauben M12, M20 und M24 verwendet. Um Aussagen auch für andere Durchmesser machen zu können, wurden Ergänzungsversuche mit den Durchmessern M6, M16 und M30 durchgeführt.

3.1.3 M/Q-Verhältnis, Hebelarm der Belastung (Exzentrizität)

Die unterschiedlichen M/Q-Verhältnisse wurden durch die Wahl von unterschiedlichen Belastungshebelarmen (e) realisiert. Dabei war keine beliebige Variation möglich, der abgedeckte Bereich ist jedoch für praktisch genutzte Bereiche ausreichend.

Die den Versuchen zugrundeliegenden Verhältniswerte von Exzentrizität zu Schraubendurchmesser (kurz e/d) lagen etwa zwischen 1,0 und 8,0. Kleinere e/d -Werte als 1,0 ließen sich mit der (im späteren beschriebenen) Versuchseinrichtung nicht realisieren, die obere Grenze der verwendeten e/d -Verhältnisse ergab sich aus den maximalen Schraubenlängen.

3.1.4 M/N-Verhältnis, Winkel der Zugbelastung

Neben den Versuchen mit einem Winkel von 90° zwischen Kraftrichtung und Schraubenachse (zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns) wurden auch Schrägzugversuche durchgeführt, bei denen der Winkel um 30° bzw. 60° verändert wurde. Diese Versuche sollten den Einfluß der Normalkraft auf die Momententragfähigkeit der Schrauben untersuchen.

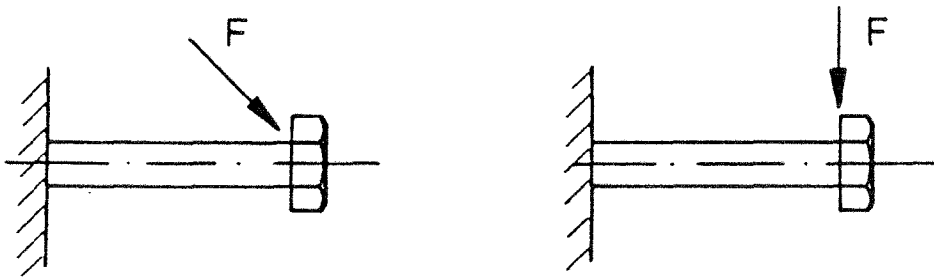


Bild 1: Versuche mit und ohne Zugkraftanteil

3.1.5 Einschraubtiefe

Ein weiterer Einfluß auf die Biegetragfähigkeit der Schrauben ist durch den genauen Ort der Einspannung gegeben. Es wurde daher eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der nur der Schaftbereich der Schrauben belastet wurde, also der ganze Schraubenschaftquerschnitt zur Aufnahme des Biegemomentes zur Verfügung stand und keine Kerbwirkung durch das Gewinde auftrat. In allen anderen Versuchen lag der Ort des Einspannmomentes (also die Einspannung) im Bereich des Gewindes. Dabei unterschieden sich die Versuche durch die Anzahl der belasteten freien Gewindegänge außerhalb der Einspannung. Die Gewindegänge wurden vom Schaft her nummeriert, d. h. eine im Versuch ganz eingeschraubte Schraube bekam die Versuchsbezeichnung: "Einspannung in der 1. Kerbe".

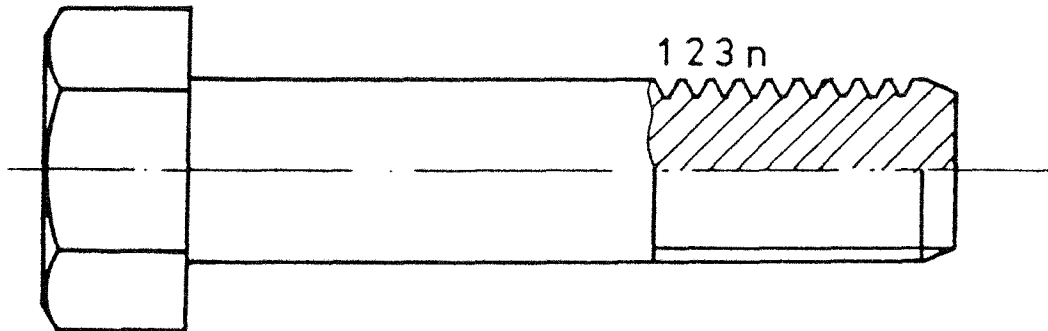


Bild 2: Bezeichnung der Gewindegänge

3.2 Belastung

Die Schrauben wurden einmalig statisch belastet, bis der zur definierten Grenzlast F^* zugehörige Weg w^* überschritten wurde (vergl. Kap. 6.2, Seite 38).

Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, daß eine Verdrehung um 10° nach ca. 15 min erreicht wurde. Zusätzlich wurden bei mehreren Versuchen 1 - 3 Haltepausen von 10 min. eingelegt, der Lastabfall wurde registriert, um Aussagen über die statische Grenzlast machen zu können.

Auf Versuche mit mehrmaliger statischer Belastung wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verzichtet, Aussagen über Dauerfestigkeit können demnach nicht gemacht werden.

4 VERSUCHSBERICHT4.1 Allgemeines

Im folgenden Versuchsbericht werden das Versuchsprogramm, Versuchskörper, der Versuchsaufbau, die Meßwerterfassung sowie die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Versuchsergebnisse sind in den Anlagen 1-16 und 96-108 dokumentiert und werden in Kap. 6 erläutert.

4.2 Versuchsprogramm

4.2.1 Vorversuche

Um einen ersten Einblick in das Tragverhalten von biegebeanspruchten Schrauben zu bekommen wurde eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt. In den Vorversuchen wurden folgende Parameter variiert:

- Festigkeitsklasse der Schrauben
- Schraubendurchmesser
- Verhältnis vom Moment zur Querkraft (M/Q) über die Exzentrizität der Last
- Einschraubtiefe (Gewinde ganz oder teilweise eingeschraubt)

Im einzelnen wurden folgende Parameterkombinationen untersucht:

Durchmesser	Festigk. kl.		Exzentrizität		Einschraubtiefe	
	4.6	10.9	45 mm	90 mm	ganz	teilweise
M 12	x	x	x	x	x	x
M 16	x	x	x	x	x	x
M 24	x	x	x	x	x	x

Tabelle 1: Parameter der Vorversuche

4.2.2 Hauptversuche

Die Versuche der experimentellen Parameterstudie wurden in fünf Einzelbereiche unterteilt:

- a) Untersuchung der M-Q-Interaktion im Gewindebereich bei 4.6- und 5.6-Schrauben. Es wurden Schrauben nach DIN 7990, DIN 931 und DIN 601 mit den Durchmessern M12, M20 und M24 verwendet.
- b) Untersuchung der M-Q-Interaktion im Gewindebereich bei 10.9-Schrauben. Es wurden Schrauben nach DIN 6914 mit den Durchmessern M12, M20 und M24 verwendet.
- c) Untersuchung der M-Q-N-Interaktion (Schrägzugversuche) im Gewindebereich von Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 5.6 und 10.9 mit den Durchmessern M12, M20 und M24.
- d) Ergänzungsversuche M-Q-Interaktion mit Schrauben der Festigkeitsklasse A4-70 (rostfrei) und 8.8. Zusätzlich Versuche mit Schraubendurchmesser M6.
- e) Versuche zur Bestimmung der Momententragfähigkeit im Schaftbereich. Diese Versuche wurden mit Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6, 5.6, 8.8, 10.9 und A4-70 sowie den Durchmessern M6, M12, M20, M24 durchgeführt.

Die Parameter der einzelnen Versuche gehen aus den Anlagen 1 bis 16 hervor. Insgesamt wurden etwa 450 Versuche durchgeführt.

4.3 Versuchskörper

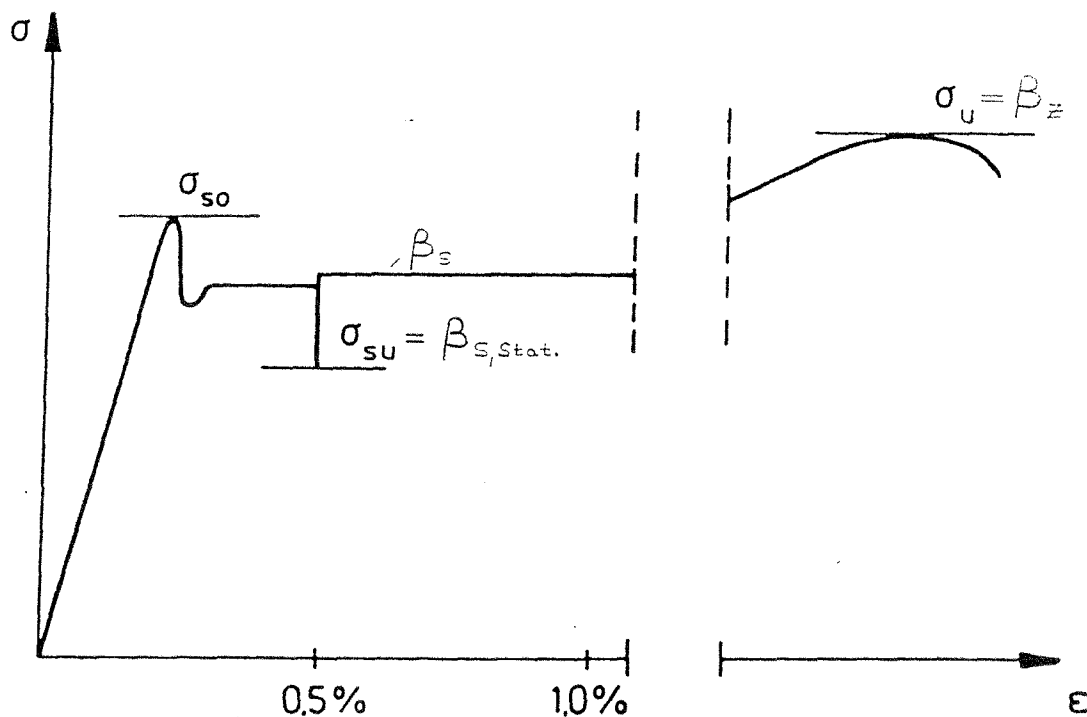
4.3.1 Beschaffung der Versuchskörper

Um die Streuungen der Versuche möglichst klein zu halten, wurde bei der Beschaffung der Schrauben darauf geachtet, daß gleichartige Schrauben immer aus einer Charge und einer Wärmebehandlung des Herstellers entstammten. Die Schraubenhersteller wurden gebeten, einen beigefügten Fragebogen auszufüllen, der Aufschluß über Herstellungsprozesse und Gütekontrollen der gelieferten Schrauben geben sollte. Dadurch war es möglich, in den Versuchen aufgetretene Phänomene zu deuten und Herstellungsprozessen bzw. Werkstoffen zuzuordnen. Der Fragebogen ist als Anlage 17 angefügt. Die Schrauben wurden nach Durchmessern, Längen und Festigkeitsklassen sortiert geliefert.

4.3.2 Werkstoffkennwerte

Da für die Beurteilung des Tragverhaltens von Schrauben die Streckgrenze der verwendeten Werkstoffe von großer Bedeutung ist, reicht die Ermittlung der Zugfestigkeit der Schrauben allein nicht aus. Aus einem Teil der gelieferten Schrauben wurden Rundproben nach DIN 50125 gefertigt, an denen neben der Zugfestigkeit auch die Streckgrenze gemessen wurde.

Die Zugproben wurden an der servogeregelten Einraumprüfmaschine HUN-20 der Lieferfirma MFL nach einer über die Materialprüfnorm DIN 50145 hinausgehenden Prüfprozedur durchgeführt. Dabei wurden die Werkstoffproben mit Hilfe eines Feindehnungsmessers von 25 mm Meßlänge bis $\epsilon = 0,5\%$ mit der Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 0,1\%/min$ gezogen. Nach einer zehnminütigen Haltezeit bei $\epsilon = 0,5\%$ wurde die "untere statische Streckgrenze" $\sigma_{0,2}$ (Bild 3) bestimmt. Dann wurde bis $\epsilon = 1,0\%$ mit der Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 0,5\%/min$ gezogen.

Bild 3. Schematisiertes σ - ϵ -Diagramm

Nach der Entfernung des Feindehnungsmessers wurde zur Bestimmung der Zugfestigkeit β_z die Werkstoffprobe unter Regelung der Querschnittsgeschwindigkeit mit einer Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} < 5\%/min.$ zu Bruch gefahren.

Während der Versuche wurden die Kraft-Verlängerungs-Kurven und die Kraft-Dehnungskurven mit einem x-y-Schreiber aufgenommen. Die Ergebnisse der Versuche sind in Anlage 18 zusammengestellt.

Neben den gedrehten Zugproben wurden den Schrauben auch ca. 1cm dicke Scheiben entnommen, diese wurden poliert und Vickers Härteprüfung durchgeführt. Durch Vergleich mit den gemessenen Zugfestigkeiten ließen sich die Werte der Härteprüfung relativ gut kalibrieren (vergl. Anlage 20). Wenn bei den Versuchen Schrauben mit stark abweichenden Kraft-Weg-Diagrammen auftraten, so ließen sich hinterher durch Härteprüfungen rasch eventuelle Über- oder Unterfestigkeiten feststellen. Der Schluß von Vickershärte auf Zugfestigkeit (nach DIN 50150) ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet und läßt nur größenordnungsmäßige Abschätzungen zu, kann aber durchaus zur Deutung von Versuchsergebnissen beitragen.

Desweiteren wurden an einer Reihe von Schrauben Ganzzugversuche nach DIN 150 898 Teil 1 durchgeführt. Die Kraft-Verlängerungsdiagramme der Ganzzugversuche wurden ebenfalls auf einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Kurz nach Erreichen der Fließgrenze (eine genaue Angabe der 0,5% Dehnung ist bei diesen Versuchen nicht möglich) wurde eine zehnminütige Haltepause eingelegt, um auch hier Angaben über die untere statische Streckgrenze machen zu können. Danach wurden die Schrauben bis zum Bruch gezogen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Anlage 19 zusammengestellt.

4.3.3 Vorhandene Schaftdurchmesser

Wegen sehr geringer Streuung wurden nur von 3 Schrauben jeder verwendeten Schraubensorte im Schaftbereich der tatsächlich vorhandene Durchmesser bestimmt. Die Messungen geschahen in dem Bereich, in dem später die Schaft-Biegeversuche durchgeführt wurden. Damit war es möglich, die tatsächlich vorhandenen Widerstandsmomente zu ermitteln.

4.4 Versuchsaufbau

Alle Versuche mit Schrauben \geq M12 wurden in der Einraumprüfmaschine HUN-100, die Versuche mit Schrauben M6 in der HUN-20 des Instituts für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig geregelt durchgeführt.

Zur Vermeidung von Zusatzexzentrizitäten infolge der Verformung des Versuchskörpers wurde der Versuchsaufbau symmetrisiert. In der entworfenen Versuchseinrichtung wurden immer zwei gleiche Schrauben zugleich einer Belastungsprobe unterworfen. Dadurch entstand eine Versuchseinrichtung, die auch bei großer Verformung der Schrauben Winkelfehler zwischen Zuglaschen und Einspannebene weitgehend vermeidet.

In den Anlagen 109-111 sind Fotos der verwendeten Versuchseinrichtung zu sehen.

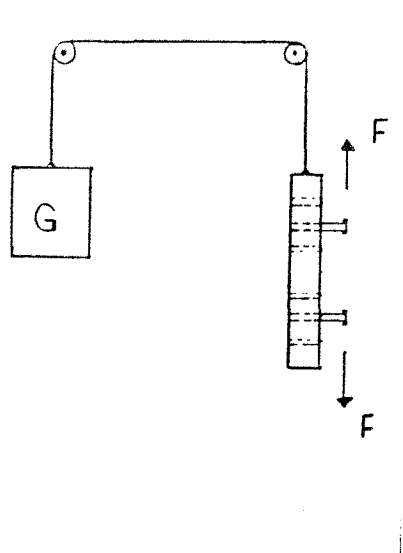


Bild 4. Prinzipskizze Versuchseinrichtung

Die Krafteinleitung in die Schrauben erfolgte über Schneidenlager in den Zuglaschen, um einen eindeutigen Lastangriffspunkt zu erhalten. Die Schrauben wurden in eine 60 mm dicke Stahlplatte geschraubt, die über ein rollengelagertes Stahlseil durch ein Gegengewicht gehalten wurde und die beim Versuch auftretenden Verformungen nahezu kräftefrei mitmachte.

Für die Schrägzugversuche wurde dasselbe Prinzip beibehalten. In der dafür vorgesehenen Einrichtung wurden die Schrauben nicht mit einem Winkel von 90° zwischen Kraftrichtung und Schraubenachse in unbelastetem Zustand belastet, sondern der Winkel betrug 120° bzw. 150° . (Ein Winkel von 180° entspricht einem reinen Zugversuch).

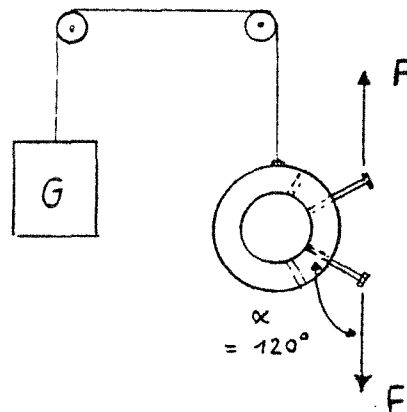


Bild 5. Systemskizze für die Schrägzugversuche

Für die Schrägzugversuche wurde die Stahlplatte mit den Gewindelöchern durch ein sehr dickwandiges Rohr ersetzt, in dem die Gewindelöcher unter den entsprechenden Winkeln angeordnet waren.

Die von der Prüfmaschine aufgebrachte Kraft wurde von einer Kraftmeßdose gemessen. Sie war über einen Analogkompensator von einer Anzeige ablesbar und wurde gleichzeitig von einer PCM-Meßanlage digitalisiert. Die digitalen Werte konnten während der Versuche auf einem Bildschirm verfolgt werden und wurden anschließend zu weiterer Bearbeitung auf Magnetband gespeichert. Zur Kontrolle wurden die von der Analoganzeige abgelesenen Werte in ein Versuchsprotokoll übertragen.

Bei jedem Versuch wurde die Querhauptverschiebung w mit einem geeichten induktiven Wegaufnehmer gemessen. Diese Verschiebung kann als Durchbiegung der Versuchskörper angesehen werden, da bei den auftretenden großen Wegen und kleinen Kräften der Anteil der Dehnung der Laschen und der Maschinenstauchung vernachlässigt werden kann.

4.5 Versuchsdurchführung und Dokumentation

Jeder Versuch begann mit einer Nullmessung im unbelasteten Zustand. Anschließend wurden die Versuchskörper weggeregelt belastet, bis entweder der zur definierten Grenzlast F^* (vergl. Kap. 6.2, S. 38) zugehörige Weg w^* überschritten war oder eine Schraube durch Bruch versagte. Bei einigen Versuchen wurden eine oder zwei zehnmünütige Haltepausen eingelegt, der zugehörige Lastabfall wurde registriert. Der Verlauf des F - w -Diagramms wurde während des Versuches auf einem Tektronix-Bildschirm verfolgt.

Die Meßstellen waren an eine prozeßrechnergesteuerte Vielstellenmeßanlage angeschlossen. Die Meßwerte wurden mit Hilfe eines Programmpaketes des Instituts für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig kontinuierlich abgefragt und bei vorgegebenen Meßwertänderungen aufgezeichnet. Durch Multiplikation mit den zugehörigen Eichfaktoren wurden die Versuchslasten F sowie die Querhauptverschiebung w ermittelt. Diese beiden Werte wurden anschließend zur weiteren Auswertung gespeichert.

Für jeden Versuch wurde ein Kraft-Weg-Diagramm gezeichnet. Von Hand wurden dann die zu den Versuchen gehörenden Werte für w^* ($w^* = e \cdot \sin \varphi^*$) in die Diagramme eingetragen, wobei der bei einigen Versuchen aufgetretene anfängliche Schlupf berücksichtigt wurde.

Daraufhin wurde die dazugehörige Grenzlast F^* ermittelt.

Von jedem Versuch wurden folgende Informationen protokolliert:

- Hersteller
- Festigkeitsklasse
- Durchmesser
- Länge
- Herstellverfahren
- Exzentrizität der Belastung
- Winkel der Belastung
- Einschraubtiefe (bzw. Schaftbereich)
- F^*
- maximale Last im Versuch

Der Punkt Herstellverfahren beinhaltet neben Angaben über die verwendeten Grundwerkstoffe Hinweise auf Fertigungsprozesse. Dabei werden unterschieden:

- spanende Formung
- spanlose Formung a) Kaltformung
 b) Warmformung
- Gewinde a) geschnitten
 b) gerollt

Aus den gemessenen Werten für F^* und e (Exzentrizität) ergibt sich das im Versuch aufgetretene Grenzmoment

$$M_v^* = F^* \cdot e$$

Da für den Grenzzustand mit $\varphi^* = 10^\circ$ der tatsächlich wirksame Hebelarm $e \cdot \cos 10^\circ$ beträgt, und außerdem noch ein Faktor B für den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit in die Berechnung des tatsächlichen Grenzmomentes eingeht, ergibt sich das Grenzmoment für die Schrauben zu:

$$M^* = M_v^* \cdot \cos 10^\circ \cdot B$$

Der Einflußfaktor B ergibt sich aus der Auswertung der aufgezeichneten Lastverringering während der Haltepausen bei den Versuchen. In den Anlagen 21-22 sind die Haltepausen zusammengefaßt, sie sind näherungsweise normalverteilt, im Mittel ergibt sich ein Lastabfall von 5,8%, die Standardabweichung beträgt 2,07%. Legt man eine Normalverteilung zugrunde, ergibt sich eine 5% Fraktile von 9,22%, vereinfachend wird auf der sicheren Seite liegend mit 10% Lastabfall gerechnet, also mit $B = 0,90$.

Bei den Schrägzugversuchen (Schraubenneigung 30° bzw. 60° gegen die Horizontale) wird die horizontale Exzentrizität e_H in Abhängigkeit der gemessenen Exzentrizität e und des Schraubendurchmessers d bestimmt. Da für das Grenzmoment eine Sehnenverdrehung von

$\varphi^* = 10^\circ$ gegenüber der Ausgangslage zugrundegelegt wird, ergibt sich:

Für Versuche mit 30°

$$e_H = e \cdot \cos 40^\circ + d/2 \cdot \sin 40^\circ$$

Für Versuche mit 60°

$$e_H = e \cdot \cos 70^\circ + d/2 \cdot \sin 70^\circ$$

Die zusätzliche Verringerung des Hebelarmes aus der Krümmung der Schraubenachse ist sehr klein und wird deshalb vernachlässigt. Bild 6 verdeutlicht die geometrischen Verhältnisse.

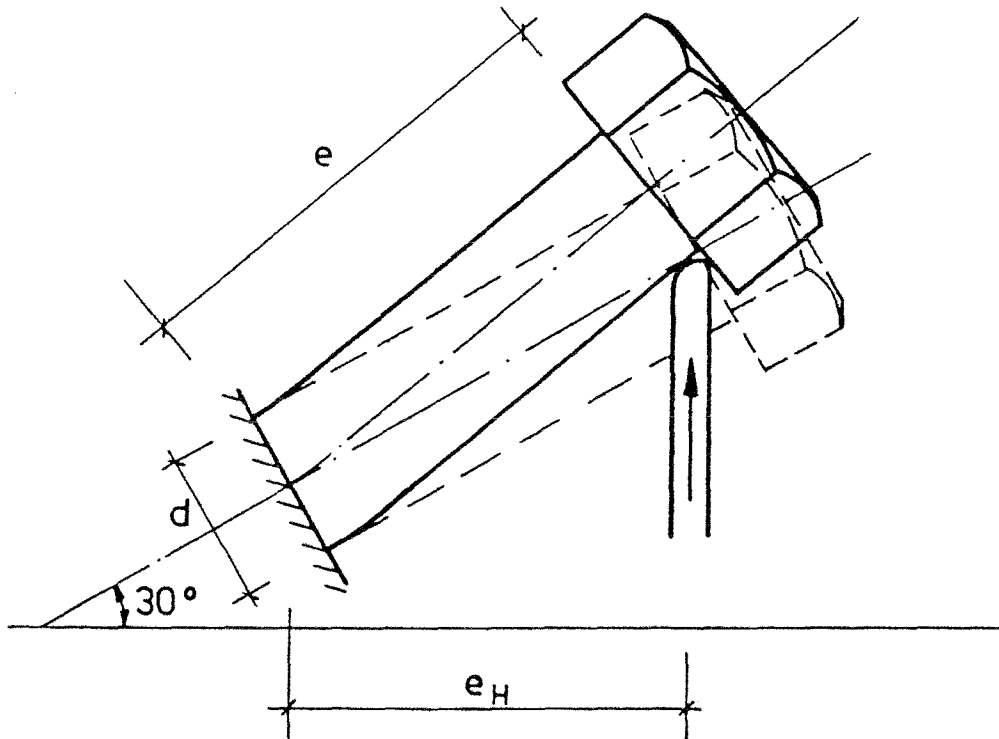


Bild 6 Geometrische Verhältnisse bei 30°

4.6 Versuchsergebnisse

Die in den einzelnen Versuchen ermittelte Grenzlast F^* ist in den Anlagen 1 bis 16 aufgeführt. Ein Teil der aufgezeichneten F - w -Diagramme sind als Anlagen 96 bis 108 beigelegt. Die übrigen Diagramme sind zu den Akten genommen. Erläutert werden die Ergebnisse in Kapitel 6.

5. THEORETISCHE UNTERSUCHUNG

5.1 Allgemeines

Begleitend zu den experimentellen Studien wurden theoretische Untersuchungen durchgeführt, die helfen sollten, das Tragverhalten im elastisch-plastischen Beanspruchungszustand zu verstehen und damit Hilfsmittel für die Deutung der Versuchsergebnisse zur Verfügung zu stellen. Dazu wurden ein analytisches (Kerbspannungslehre) und ein numerisches Verfahren (Finite-Element-Methode, kurz FEM) ausgewählt.

5.2 Analytische Untersuchung

Um ein Gefühl für die Größenordnung der Kerbspannungen im Gewindegrund zu bekommen, wurden zunächst die Kerbspannungen nach der Kerbspannungslehre /2/ ermittelt. Dabei wurde von einem linearen Werkstoffgesetz ausgegangen und die Kerbspannungen für einen Rundstab mit flacher Außendrehkerbe für die Lastfälle Moment, Quer- und Normalkraft bestimmt. Dazu wurde ein Programm erstellt, das auf eine Datenbasis für die Gewindegeometrien der Schrauben mit metrischen ISO-Gewinden nach DIN 13 zugreifen konnte. Die erhaltenen Kerbspannungsspitzen, ausgedrückt durch die sog. Formziffer, sind für die Durchmesser M10, M12, M16, M20, M24, M27, M30 und M33 etwa gleich. Sie betragen für Schub 3,1 ($\tau_{\text{Kerb}}/(Q/A)$) und für Normalkraft und Biegung 4,6 ($\sigma_{\text{Kerb}}/\sigma_{\text{Brutto}}$).

Danach tritt schon bei sehr geringen Biegebeanspruchungen der Schrauben im Kerbgrund ein mehrachsiger Spannungszustand in Höhe der Fließgrenze auf. Diese räumlich sehr begrenzten Spannungsspitzen wachsen jedoch bei duktilen Werkstoffen bei weiterer Belastung nicht weiter an, die Spannungen werden umgelagert, so daß Ermittlungen mit linearem Werkstoffgesetz hier zu unbefriedigenden Lösungen führen.

Da die zuvor nicht berücksichtigte Art der Lasteinleitung über den Gewindezahn die Kerbspannungen stark beeinflussen kann, wurde im folgenden zur genaueren Ermittlung das Modell einer Zahnstange herangezogen /11/, bei der die Belastung über mehrere Zahnflanken eingetragen wurde.

Die maximalen Spannungen im Kerbgrund treten hierbei in Richtung der belasteten Flanke seitlich verschoben auf, in diesem Bereich kommen zusätzlich die lokalen Spannungen des belasteten Zahnes zum Tragen, so daß sich hier möglicherweise ein hydrostatischer Spannungszustand bildet, der das Erreichen der Fließgrenze herausschiebt.

Die Ermittlung der Formziffern mit Hilfe der Kerbspannungslehre kann jedoch für Schraubengewinde nur einen groben ersten Anhalt darstellen. Die Voraussetzungen der untersuchten Modelle beschreiben nur sehr unvollkommen die geometrischen Verhältnisse eines Schraubengewindes. Im folgenden wird daher eine FEM-Untersuchung durchgeführt, bei der der Einfluß mehrerer Gewindgänge und eines nichtlinearen Werkstoffgesetzes mit untersucht wird.

5.3 Untersuchung mittels FEM

5.3.1 Allgemeines

Die FEM-Untersuchung wurde mit Hilfe des Programmsystems ADINA durchgeführt. Um den numerischen Aufwand in praktikablen Grenzen zu halten, wurde die Schraube nicht vollständig durch räumliche Elemente diskretisiert. Durch gedankliches Herausschneiden eines dünnen Scheibenelementes wurde das räumliche Problem näherungsweise auf ein ebenes Verformungsproblem übertragen, diese Ergebnisse dürfen nach Neuber /12/ auf den im Gewinde herrschenden räumlichen Spannungszustand übertragen werden, weil Gewindekerben flache Außenumdrehungskerbenelemente sind. Dabei wurde die Steigung des Gewindes vernachlässigt.

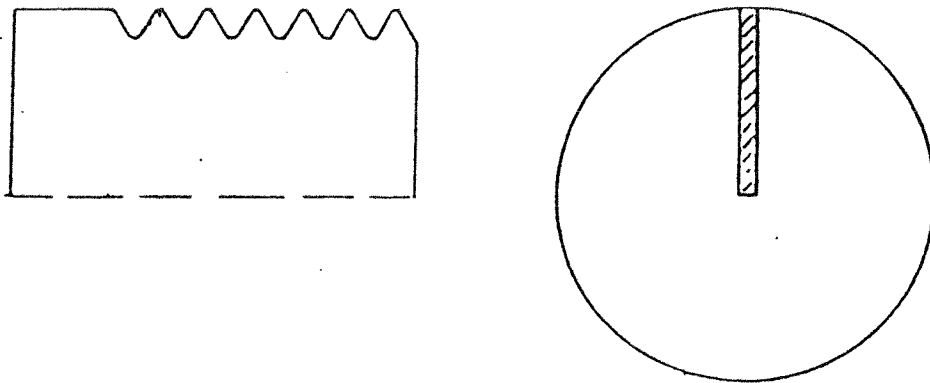


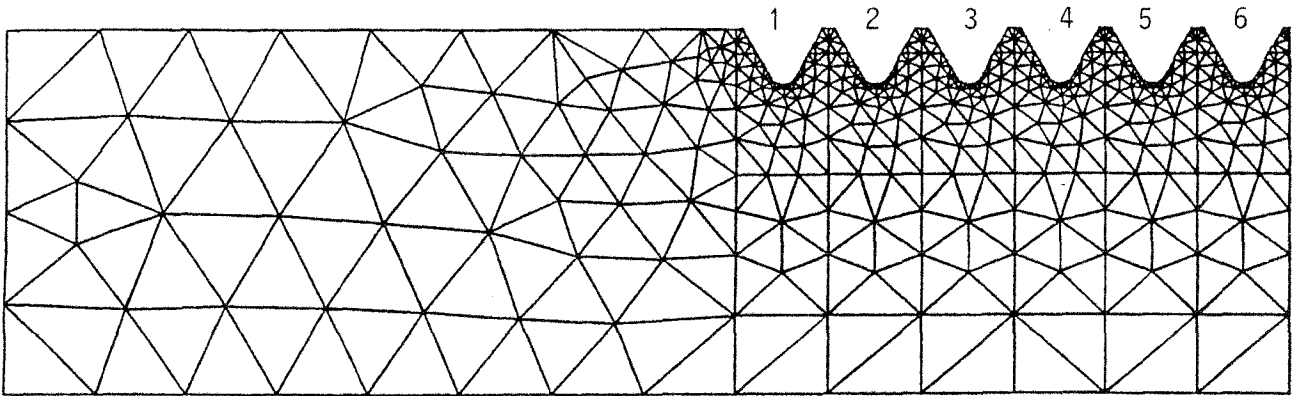
Bild 7 herausgeschnittenes Scheibenelement aus einer Schraube mit metr. ISO Gewinde

Zunächst wurde mit Hilfe des ADINA-Preprozessors SUPERTAB ein FEM-Netz erstellt, das einen Teil des Schaftes sowie die ersten 6 Gewindegänge einer Schraube M20 abbildet. In der Schraubenmitte wurde eine Symmetrieachse gewählt.

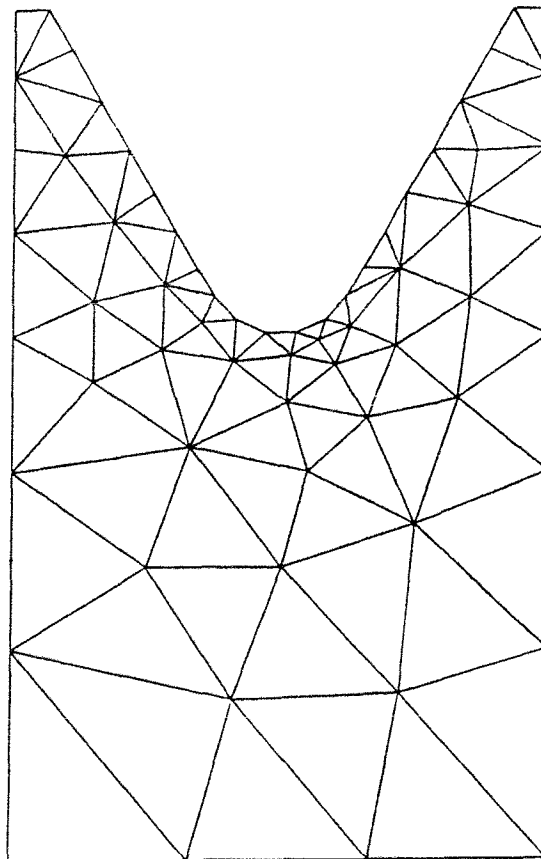
Die Wahl der Elementengröße mit großen Elementen im Schaft und kleineren Elementen im interessierenden Gewindebereich ermöglicht eine gute Näherungslösung bei vertretbarem Rechenaufwand.

Die Ergebnisse der Berechnungen wurden mit dem ADINA Postprozessor ADIP aufbereitet und dargestellt.

Im folgenden werden die Gewindekerben der einzelnen Gewindegänge häufig vereinfacht als "Kerben" bezeichnet.



FEM - Netz ganz



1. Gewindekerbe

Bild 8: Verwendetes FE - Netz

Als Belastung wurde ein Biegemoment in Form einer im Gleichgewicht stehenden Lastgruppe aufgebracht. An dem linken Ende (Bild 9) als lineare Spannungsverteilung (in Knotenpunktbelastung umgerechnet), auf der rechten Seite auf drei Gewindegänge verteilt als Gewindeflankenbelastung. Eine realistische Ganglastverteilung (z. B. nach /9/) geht über ca. 8 Gewindegänge (volle Mutternhöhe). Um mit einer solchen Ganglastverteilung unterschiedliche Einschraubtiefen zu untersuchen, müßte das gewählte FEM-Netz um mindestens 6 Gewindegänge erweitert werden, der numerische Aufwand würde dadurch beträchtlich steigen. Die hier angenommene Ganglastverteilung über drei Gewindegänge beschreibt in guter Näherung den Zustand in den stark belasteten Kerben. Dabei erhielt jeweils die Gewindeflanke der ersten Kerbe 50%, die zweite 35% und die dritte 15% der Gesamtlast.

Diese Lastgruppe wurde in verschiedenen Rechengängen dann seitlich verschoben, so daß die Belastung in den Kerben 1-3, 2-4 und 3-5 auftrat. Die Lastverteilung an der Gewindeflanke wurde aus einem konstanten und einem sinusförmigen Anteil zusammengesetzt (Maximum in der Flankenmitte), und zwar normal zur Flanke. Die in /10/ errechnete, hiervon leicht abweichende Flankenbelastungsverteilung ist offensichtlich auf das dort verwendete FE-Netz zurückzuführen, die Spitze am gewindegrundseitigen Rand der Flankenbelastung fällt mit einem großen Sprung der gewählten Elementgröße zusammen, was erfahrungsgemäß zu größeren Ungenauigkeiten führt.

5.3.2 Berechnungen mit linear-elastischem Werkstoffgesetz

Die Berechnungen wurden zunächst mit linear-elastischem Werkstoffgesetz durchgeführt. Bild 11 und Bild 12 zeigen den Verlauf der Normalspannungen einmal im Schaftbereich und im Schnitt durch die Mitte der 1. Gewindegänge (Lage der Schnittlinien: siehe Bild 10). Der Spannungsanstieg aufgrund der Kerbwirkung ist deutlich zu erkennen.

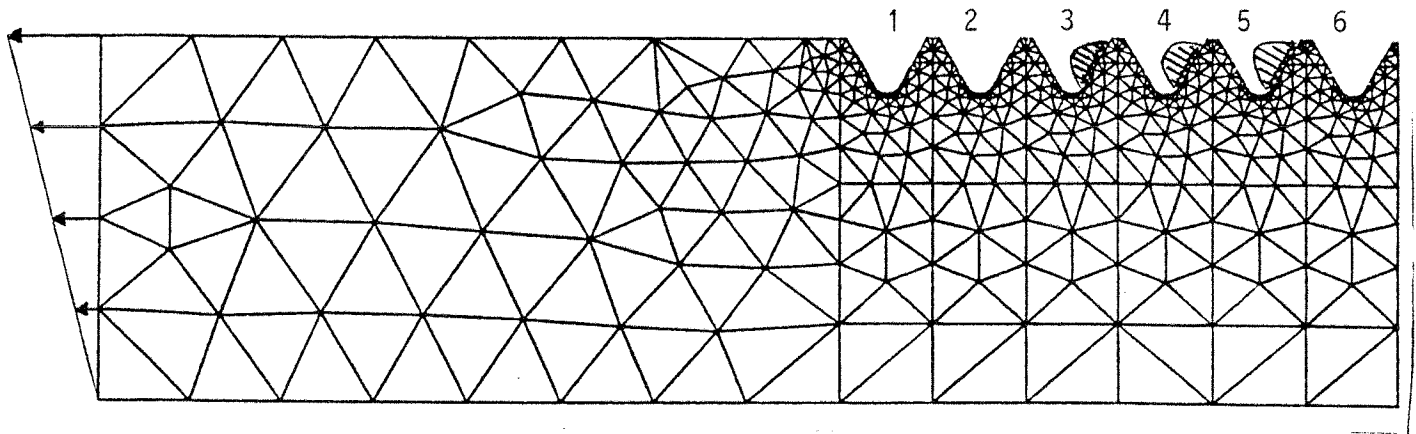


Bild 9: Lastverteilung an den Gewindeflanken der Kerben 3, 4 und 5 und am linken Schaftende

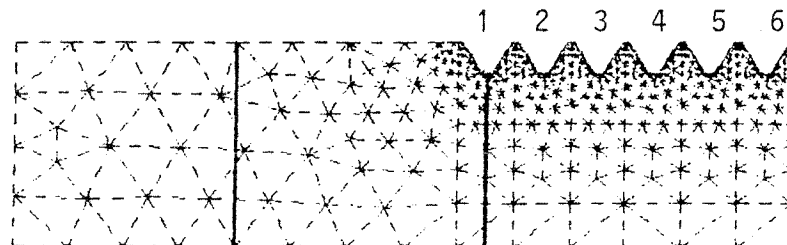


Bild 10: Lage der Schnittlinien im FE-Netz (Gewindebereich und Schaftmitte)

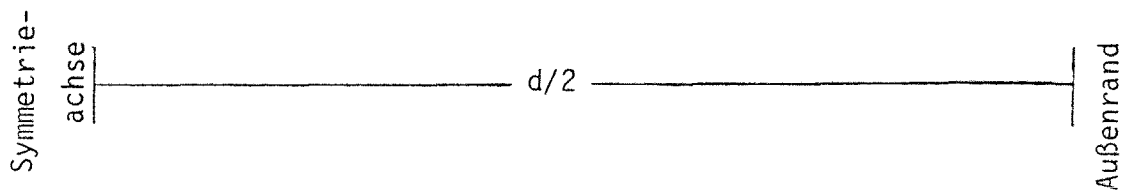
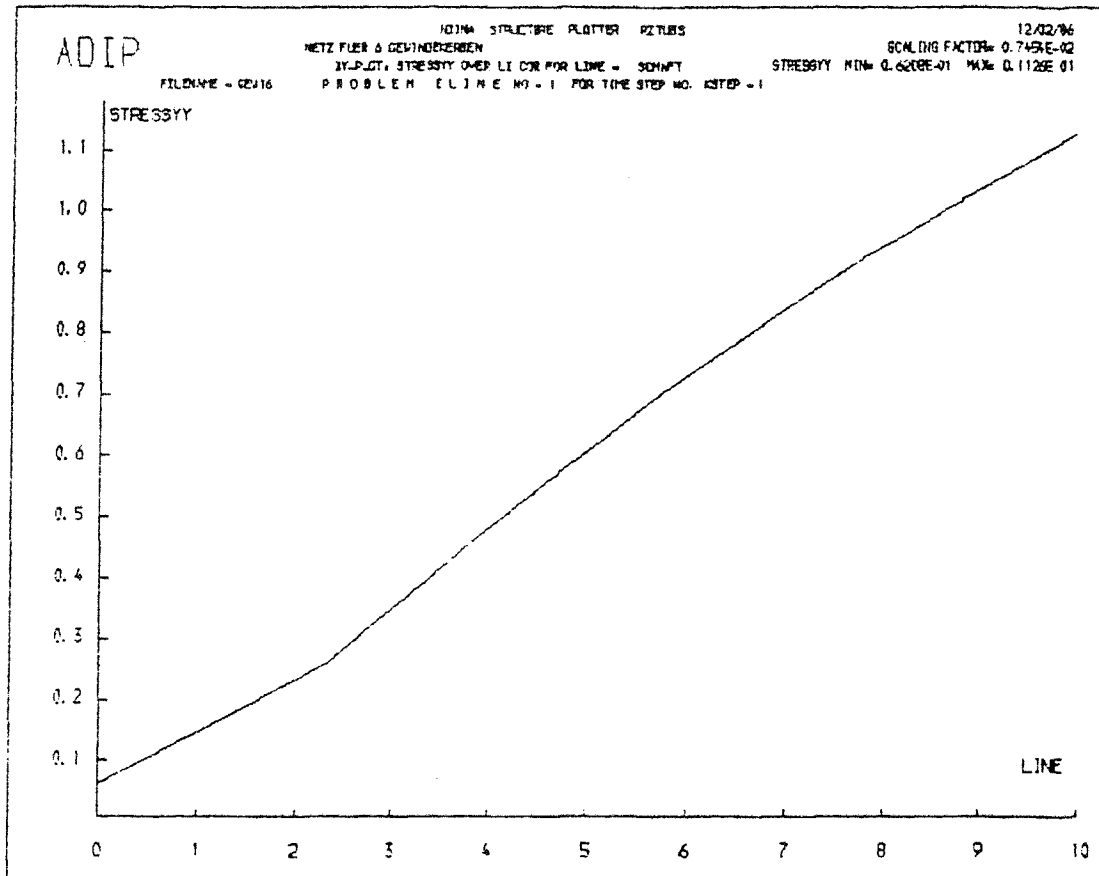


Bild 11: Verlauf der Normalspannungen σ_{yy} im Schaftbereich

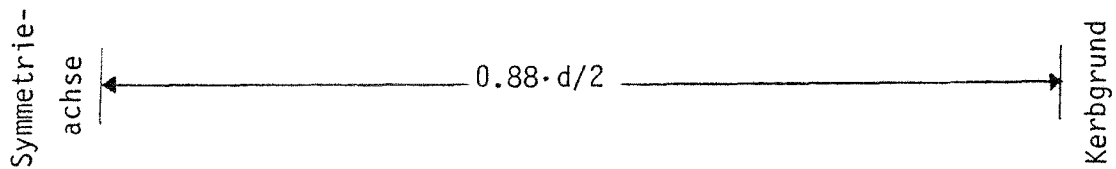
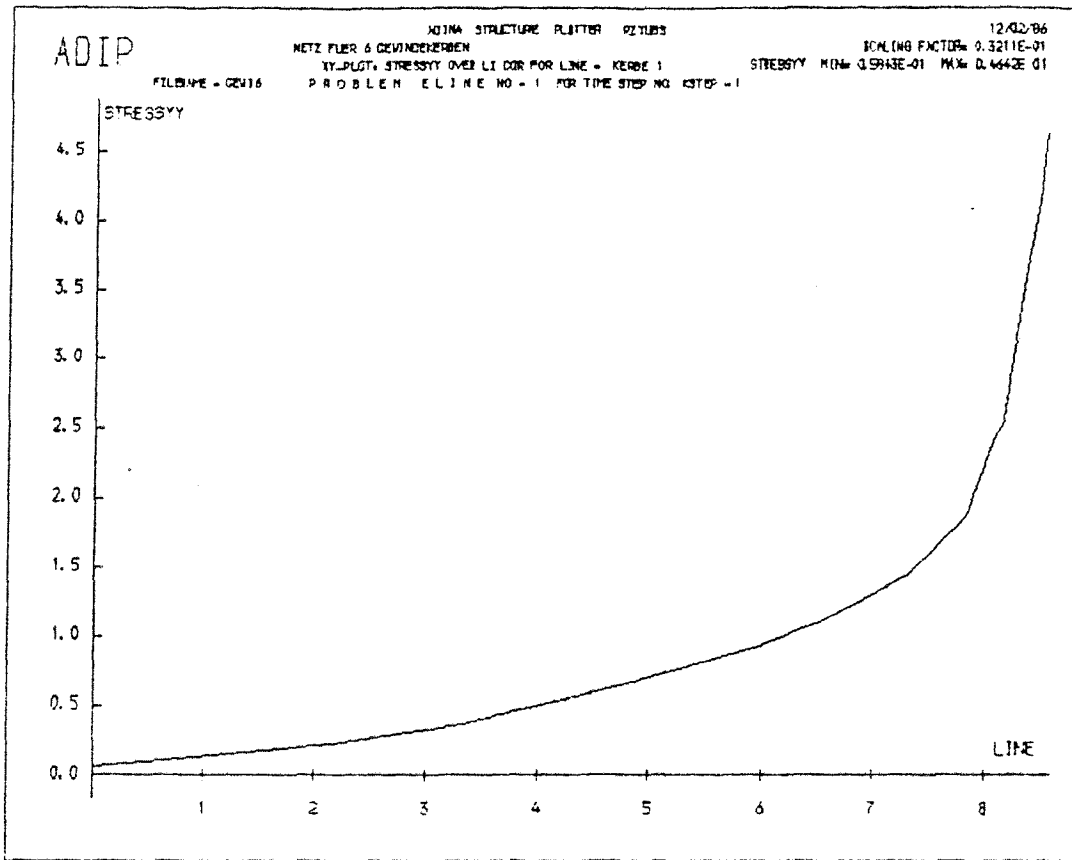


Bild 12: Verlauf der Normalspannungen σ_{yy} im Gewindebereich

Die örtliche Verteilung der Spannungsspitzen ist auf den beiden folgenden Bildern gut zu erkennen, es sind die Iso-Linien für Normalspannungen in Schraubenlängsrichtung dargestellt.

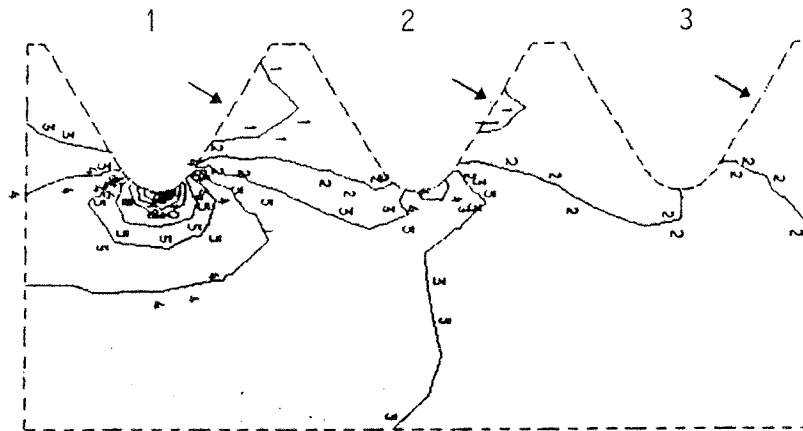


Bild 13: σ_{yy} in den Kerben 1-3 bei Belastung der Kerben 1-3

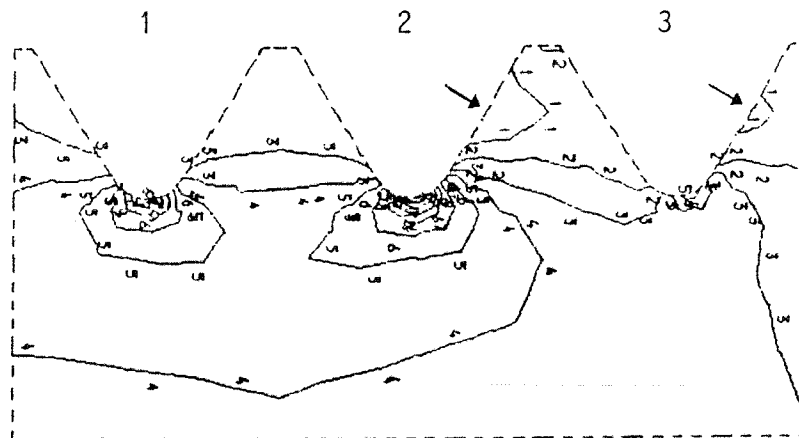


Bild 14: σ_{yy} in den Kerben 1-3 bei Belastung der Kerben 2-4

Bild 14 zeigt die Entlastungswirkung des 1. Gewindeganges für die Spannungen im Kerbgrund des 2. Gewindeganges, wenn die Belastung in den Kerben 2-4 aufgebracht wird. Die Bilder 16 und 17 zeigen für diesen Fall die Normalspannungen in Schnittlinien durch die erste und zweite Kerbe.

Aus Bild 15 ergibt sich eine Formziffer von $\alpha = 5,9$ für die erste Kerbe bei Belastung der Kerben 1-3. Ermittelt wird die Formziffer aus dem Quotienten der maximalen Kerbspannung und der zugehörigen Biegerandspannung im Schaft (vergl. Bild 11). Die maximale Kerbspannung ist in den belasteten Kerben höher als aus den σ_{yy} -Verläufen in den zugehörigen Schnittlinien ersichtlich, da das Maximum von der Kerbgrundmitte etwas zur belasteten Flanke verschoben liegt (vergl. Kap. 5.2). Bei den angegebenen Formziffern ist dies berücksichtigt.

Mit 5,9 liegt die ermittelte Formziffer höher als der nach Neuber ermittelte Wert. Dies ist auf die mitberücksichtigte Gewindeflankenbelastung zurückzuführen.

Bei Belastung der Kerben 2-4 ergaben sich die Formziffern $\alpha = 4,1$ für die erste und $\alpha = 5,25$ für die zweite Kerbe, d.h. der erste (unbelastete) Gewindegang wirkt wie erwartet als Entlastungskerbe (vergl. Bilder 15 bis 17).

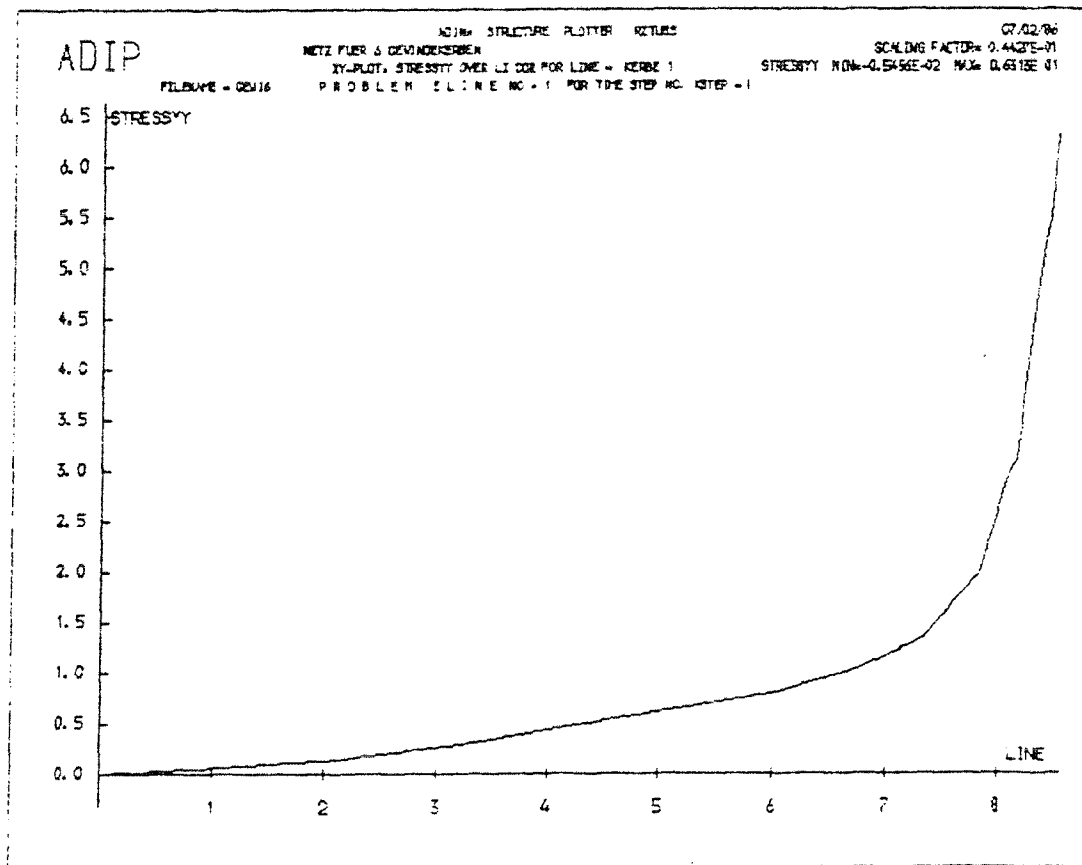


Bild 15: Spannungsverlauf 1. Kerbe σ_{yy}
Belastung Kerbe 1-3

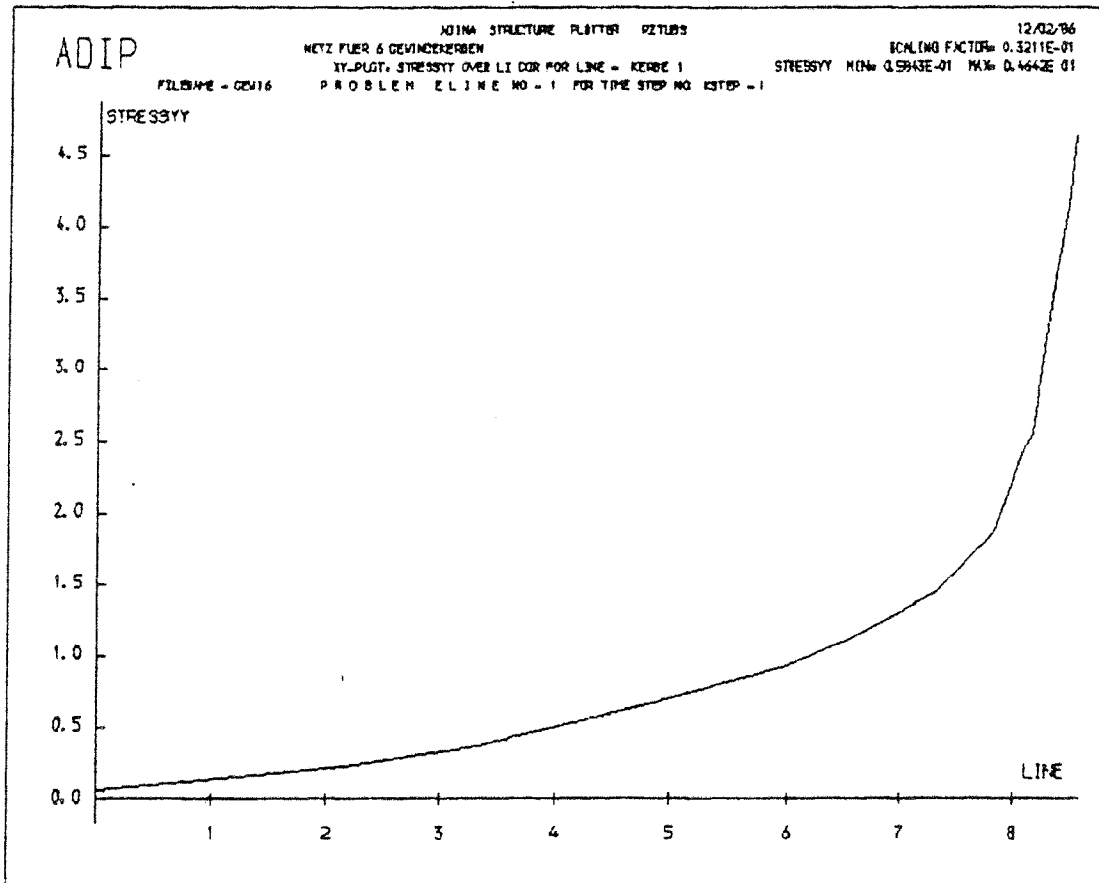


Bild 16: σ_{yy} in Kerbe 1 bei Belastung der 2.-4. Kerbe

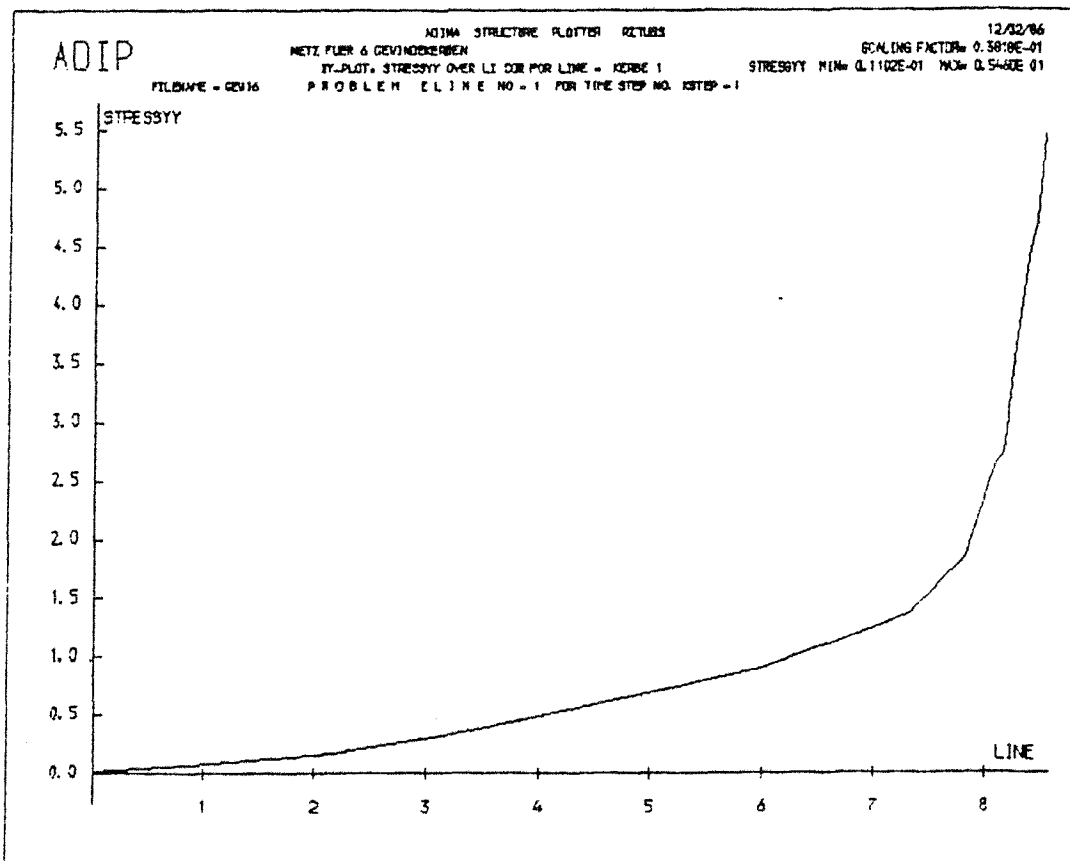


Bild 17: σ_{yy} in Kerbe 2 bei Belastung der 2.-4. Kerbe

Wird die Lastgruppe in die Kerben 3-5 gesetzt, verringern sich die Spannungen am ersten Gewindegang ($\alpha = 3,8$) etwas. Die zweite (ebenfalls unbelastete) Kerbe weist ein niedrigeres Spannungsniveau auf ($\alpha = 3,4$). Die dritte Kerbe (also direkt vor der ersten belasteten Gewindeflanke) weist mit $\alpha = 5,2$ in diesem Beispiel die höchsten Kerbspannungen auf.

Dieses Ergebniss läßt sich folgendermaßen deuten: Die hohen Kerbspannungen entstehen aus der Kerbwirkung des 1. Gewindeganges und aus der Gewindeflankenbelastung am Ort der Einspannung. Weitere unbelastete Kerben haben nur einen geringen entlastenden Einfluß auf die Kerbspannung in der ersten belasteten Kerbe und weisen niedrigere Kerbspannungen auf, da der Kraftfluß in der Schraube bereits in den Kern umgelenkt ist.

Dieser Effekt konnte auch in den Versuchen beobachtet werden, bei Einspannung in der 3. Kerbe traten die ersten Anrisse im 1. und 3. Gewindegang auf, während der Kerbgrund des 2. Gewindeganges noch keine Risse zeigte.

Die Ergebnisse der Berechnungen bei Belastung der dritten bis fünften Kerbe sind als Anlage 23 bis 26 beigefügt. Bei der Darstellung der σ_{yy} Spannung in Kerbe 3 (Anlage 26) ist zu beachten, daß die Schnittlinie genau durch den Gewindegrund gelegt wurde, die tatsächlich höchsten Spannungen aber etwas nach rechts verschoben liegen (vgl. Kapitel 5.2). Die Lage des Höchstwertes der Spannungen σ_{yy} ist in den Anlagen 23 und 24 zu erkennen, er liegt um 8% über dem Wert in der Mitte der Kerbe.

Als nächstes wurde der Einfluß der Querkraft untersucht.

Dabei wurde auf der Schaftseite die Einleitung von Zugkräften mit linearer Verteilung zunächst teilweise, dann ganz durch eine Einleitung von Querkraften mit annähernd parabolischer Verteilung ersetzt, so daß das Moment in der ersten belasteten Kerbe konstant blieb. So wurde das ebenfalls in den Versuchen variierte Verhältnis e/d von 1,0 bis ∞ simuliert.

Die Anlagen 27 bis 29 zeigen, daß in der 1. belasteten Kerbe kein Einfluß des e/d -Verhältnisses sichtbar wird, lediglich in den davor liegenden, unbelasteten Kerben sinken die Kerbspannungen mit sinkendem Verhältnis e/d . Die Momentenbelastung nimmt bei kurzem Hebelarm der Belastung zum Belastungspunkt hin rasch ab, so daß dieser Effekt leicht erklärbar ist.

Auch in den Versuchen konnte für $e/d > 1,0$ kein signifikanter Einfluß der Querkraft auf die Biegetragfähigkeit festgestellt werden.

Um den Einfluß der gewählten Ganglastverteilung zu untersuchen, wurde bei diesem Beispiel mit einer Lastverteilung von je $1/3$ der Gesamtbelastung je belastete Kerbe gerechnet. Dadurch fallen die Formziffern etwas niedriger aus als bei der zuvor gewählten Ganglastverteilung, da die Gewindeflankenbelastung in der ersten belasteten Kerbe um 40% niedriger ist.

Die durchgeführten Berechnungen mit linearem Werkstoffgesetz geben einen ersten Einblick in das Tragverhalten von Schrauben unter Biege- und Querkraftbeanspruchung. Sie stehen qualitativ im Einklang mit der Kerbspannungslehre nach Neuber, mittels der FEM-Berechnung ließ sich die Entlastungswirkung unbelasteter Gewindegänge differenzierter betrachten.

5.3.3 Berechnungen mit nichtlinearem Werkstoffgesetz

Zunächst wurde für die Berechnung ein bilineares, idealelastisch - idealplastisches Werkstoffgesetz ausgewählt, bei dem der E-Modul nach Erreichen der Fließgrenze zu null gesetzt wurde.

Dies führte jedoch zu numerischen Schwierigkeiten bei der Berechnung, die Dehnungen im Kerbgrund wuchsen so schnell an, daß das verwendete Rechenprogramm nicht mehr konvergierte.

Im folgenden wurde ein bilineares Werkstoffgesetz mit einem Verfestigungs-Modul in Höhe von 10% des E-Moduls verwendet. Die numerischen Probleme konnten so gelöst werden, die aus den großen Dehnungen im Kerbgrund resultierenden Spannungen werden jedoch etwas überschätzt.

Als Anlagen 30 bis 33 sind die Ergebnisse einer solchen Berechnung beigefügt. In diesem Beispiel wurden die Kerben 3-5 belastet. Die erste Laststufe wurde so gewählt, daß erste lokale Plastizierungen auftreten. Dann wurden drei weitere Laststufen mit den Laststeigerungsfaktoren 1,1, 1,2 und 1,3 gerechnet. Dies führte zur weiteren Plastizierung der Schraube im Bereich des Gewindegrundes. In diesem Beispiel sind gut die hohen Spannungen in der 1. und 3. Kerbe zu erkennen, die dazwischenliegende unbelastete Kerbe hat ein niedrigeres Spannungsniveau (siehe Anlage 31).

Bild 18 zeigt (~ 2 fach vergrößert) die Verformungen der Schraube für den beschriebenen Lastfall.

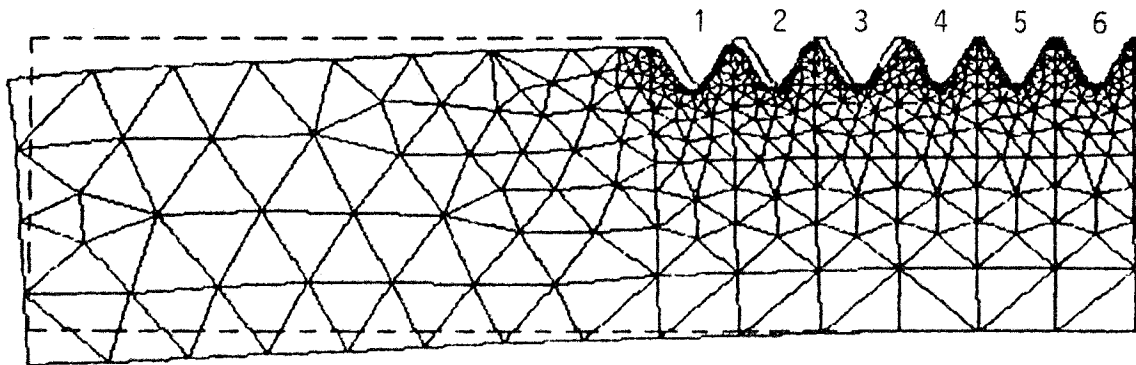


Bild 18: Deformierte Struktur, Kerben 3-5 belastet

In den Anlagen 34 bis 40 sind die Dehnungen in y -Richtung, die Spannung σ_y und die Vergleichsspannungen für 11 Laststufen aufgetragen. Bei der darauffolgenden 12. Laststufe traten dann auch bei dem hier gewählten Werkstoffgesetz Konvergenzschwierigkeiten auf.

In den dargestellten Diagrammen ist gut das schnelle Anwachsen der Dehnungen und damit auch der Spannungen im Kerbgrund zu erkennen. Unter zunehmender Biegebeanspruchung bilden sich immer größer werdende plastische Zonen aus.

Die Ausbreitung der plastischen Zonen ist in den Anlagen 39 bis 40 dargestellt (schraffierte Bereiche).

In Anlage 41 sind die Durchbiegungen des freien Schaftendes für mehrere Laststufen dargestellt. Das nichtlineare Last-Verformungsverhalten entspricht qualitativ den in den Versuchen aufgezeichneten Last-Verschiebungsdiagrammen.

6 TRAGVERHALTEN BIEGEBEANSPRUCHTER SCHRAUBEN

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die bei den experimentellen Studien untersuchten Einflüsse auf das Tragverhalten dargelegt. Zunächst wird das charakteristische Verhalten der Schrauben qualitativ beschrieben, in den folgenden Unterkapiteln werden die maßgeblichen Einflüsse genauer untersucht.

Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6 verhalten sich erwartungsgemäß sehr viel duktiler als die der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9. Einige Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 versagten schon bei Durchbiegungen von etwa 9° , also kurz vor Erreichen des definierten "Grenzmoments" (vergl. S. 38). Bild 19 zeigt ein typisches Kraft-Weg-Diagramm einer 4.6-Schraube, das duktile Verhalten ist gut zu erkennen. Die dargestellten Wege sind Komponenten der Verschiebung in Richtung der Last, gemessen in der Lastachse. In Bild 20 sind die F-w-Diagramme einer 10.9- und einer 4.6-Schraube einander gegenübergestellt, wobei die Kurve der 4.6 Schraube aus Darstellungsgründen abgebrochen wurde, wogegen der abfallende Teil der Kurve der 10.9-Schraube den Bruch anzeigt.

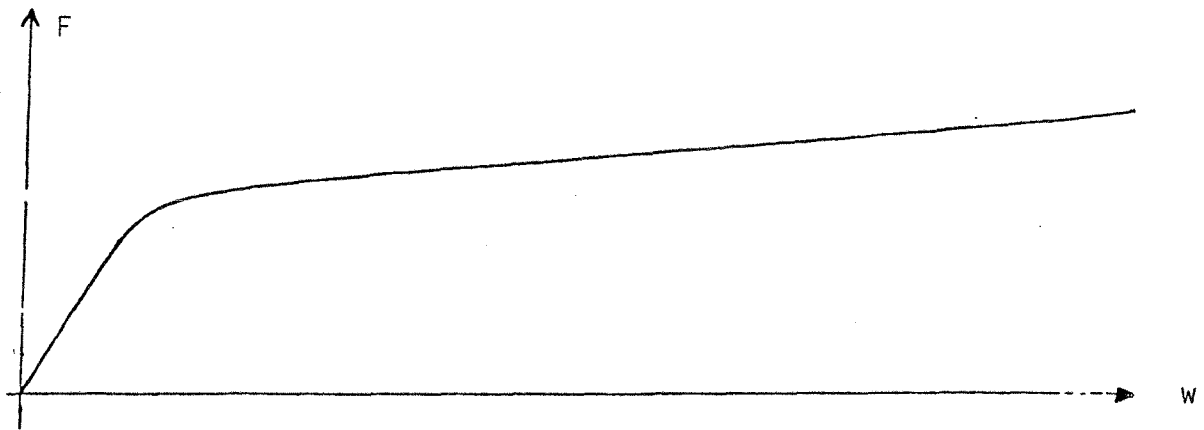


Bild 19 Typisches Kraft-Weg-Diagramm einer Schraube der Festigkeitsklasse 4.6

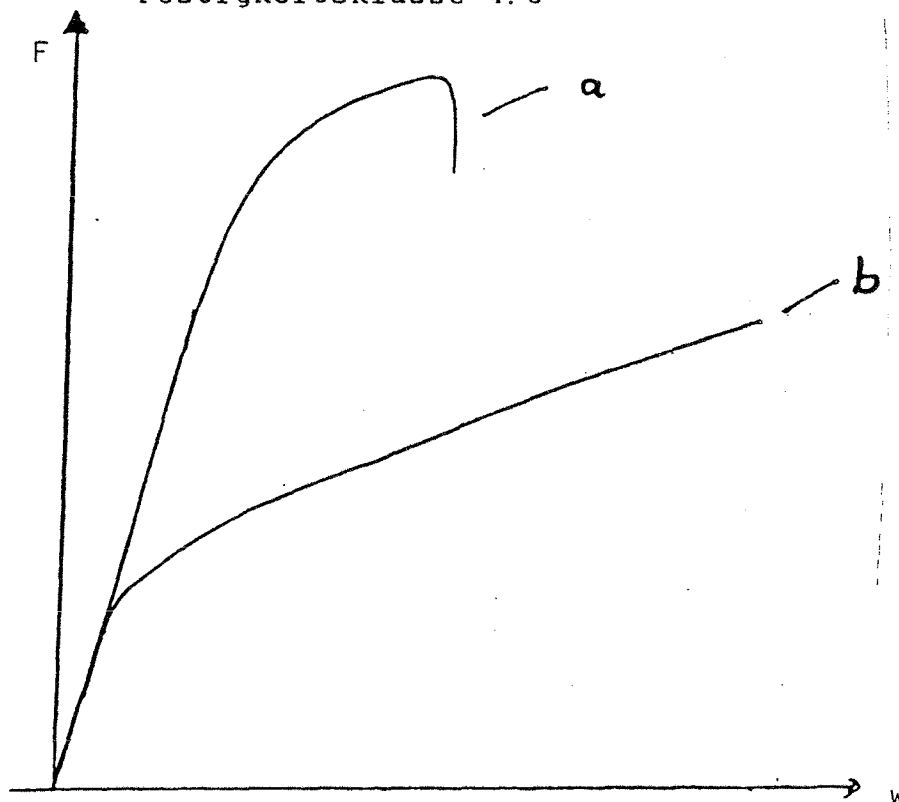


Bild 20 Kraft-Weg Diagramm einer Schraube M24

a) Festigkeitsklasse 10.9 (HV)

b) Festigkeitsklasse 4.6

Die 10.9-Schrauben verhalten sich bei leicht reduzierter Traglast duktiler, wenn ihr Gewinde nicht vollständig in die Versuchseinrichtung eingeschraubt wird. Bild 21 zeigt zum Vergleich zwei Kraft-Weg-Diagramme einer 10.9-Schraube, einmal bis zur 1. und einmal nur bis zur 5. Kerbe eingeschraubt.

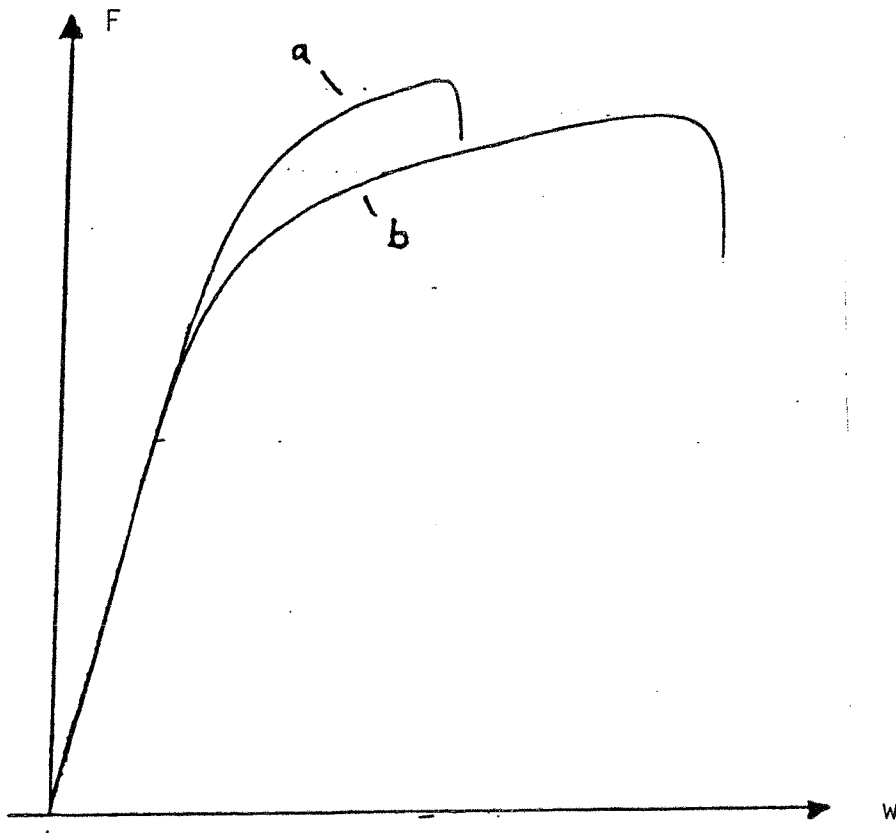


Bild 21: Kraft-Weg Diagramm einer HV-Schraube M24

- a) Einspannung in der 1. Kerbe
- b) Einspannung in der 5. Kerbe

Bild 22 zeigt das unterschiedliche Verhalten der Schrauben :

- a) Schraube der Festigkeitsklasse 4.6, Einspannung in der 1. Kerbe, der Schaftbereich ist deutlich plastiziert.
- b) Schraube der Festigkeitsklasse 4.6, Einspannung in der 4. Kerbe, deutlich ist ein Aufweiten der ersten drei Gewindengänge zu erkennen.
- c) Schraube der Festigkeitsklasse 10.9, Einspannung in der 1. Kerbe, hier ist sprödes Verhalten erkennbar, Gewinde- und Schaftbereich sind kaum verformt, der Riß in der 1. Kerbe ist gut zu erkennen.
- d) Schraubenschaft (ebenfalls 10.9) , Einspannung im Schaftbereich, trotz des gleichen Werkstoffes wie bei c) ist aufgrund der fehlenden Kerbspannungen duktileres Verhalten erkennbar.

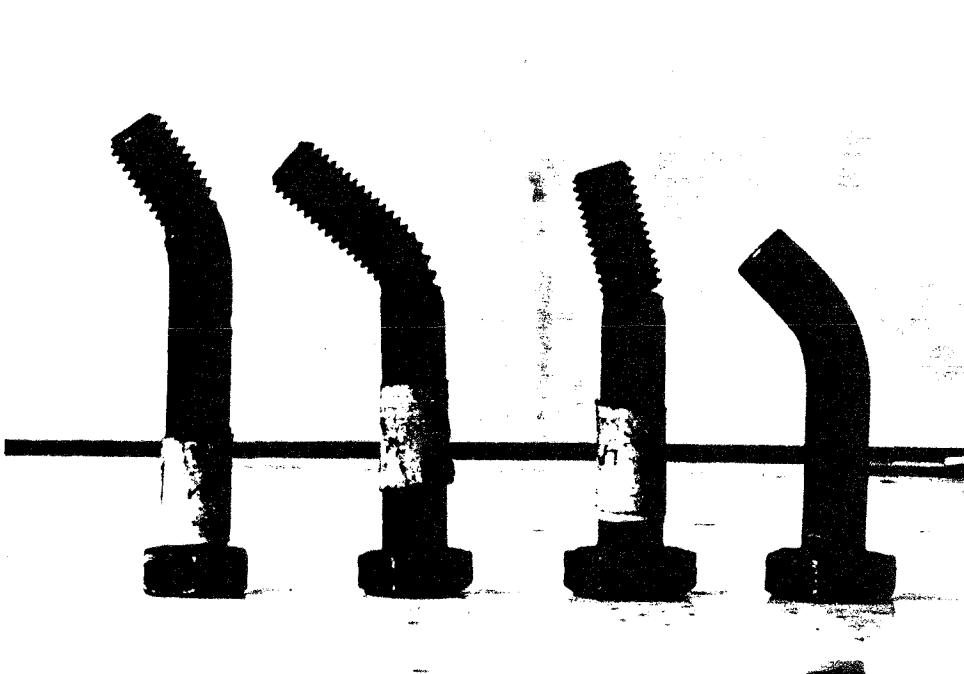


Bild 22: Schrauben nach dem Versuch

Überraschenderweise zeigte sich bei den Versuchen, daß die Biegetragfähigkeit der 4.6- und 5.6-Schrauben nahezu gleich ist. Die 5.6-Schrauben verhielten sich zum Teil spröde, was bei 4.6-Schrauben in keinem Fall beobachtet wurde. Dieses unterschiedliche Verhalten innerhalb der Festigkeitsklasse 5.6 ist auf die

Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe bei der Schraubenherstellung zurückzuführen. Ein Teil der untersuchten Schrauben wurde aus einem Stahl C 22 (abgeschreckt und angelassen) hergestellt, diese Schrauben zeigten ein duktileres Verhalten. Schrauben, die aus einem unvergüteten C 35 gefertigt wurden, verhielten sich sehr spröde. Bild 23 zeigt die Bruchfläche einer solchen Schraube.

Ein weiterer herstellungsbedingter Unterschied zeigte weniger Einfluß auf die Tragfähigkeit: gerollte Gewinde hatten gegenüber geschnittenen im allgemeinen eine größere Oberflächengüte, und damit setzte das Einreißen am Kerbgrund offensichtlich etwas später ein. Das etwas frühere Auftreten kleiner Anrisse im Kerbgrund der Schrauben mit geschnittenen Gewinden führt aber erst bei großen Verformungen (oberhalb der definierten Grenzlast) zu einem Abfall der aufnehmbaren Lasten.

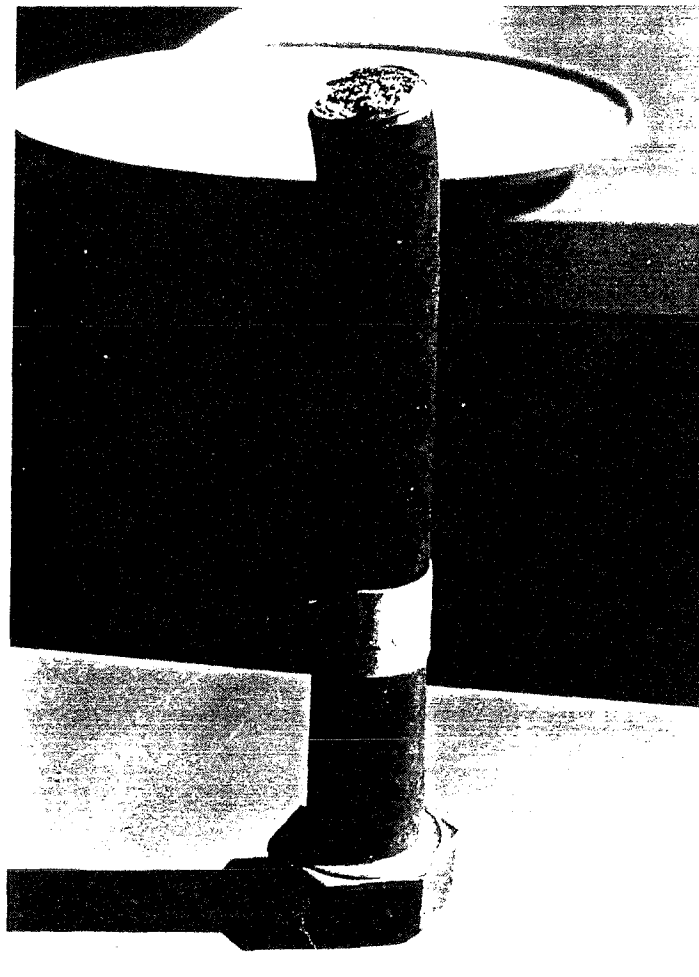


Bild 23: Sprödbbruch einer Schraube M24 5.6,
aus unvergütetem C35 gefertigt

6.2 Definition der Grenzlast

Bei der Untersuchung der Biegetragfähigkeit von Schrauben ist das Ziel die Angabe von Grenzmomenten. Da in den Versuchen Momente als Last mit einem Hebelarm aufgebracht wurden, ergaben sich zunächst Grenzlasten, die Grenzmomente ergeben sich durch Multiplikation mit den zugehörigen Exzentrizitäten. Das unterschiedliche Verhalten der Schrauben führt zu Schwierigkeiten bei der Definition der Grenzlast. Bei duktilen Schrauben ist eine Laststeigerung auch nach dem Durchplastizieren der Schraube, aufgrund des mit zunehmender Durchbiegung abnehmenden Hebelarmes, noch weiter möglich, bis die Schraube um nahezu 90° abgeknickt ist. Aus versuchstechnischen Gründen konnten die Versuche nicht soweit gefahren werden. Die dazu gehörige Last ist jedoch wie oben beschrieben mit so großen Verformungen behaftet, daß sie ohnehin keine baupraktische Bedeutung hat. Daher wird für die Versuchsauswertung eine Grenzlast "F*" definiert, die es möglich macht, auch spröde mit duktilen Schrauben zu vergleichen. Als Grenzlast wird die Kraft gewählt, die zu einer Gesamtverformung der Schraube mit einem Sehnendrehwinkel von $\varphi^* = 10^\circ$ führt. Die verbleibenden Tragreserven sind wegen der kleineren Steigung des Last-Verschiebungsdiagramms relativ gering.

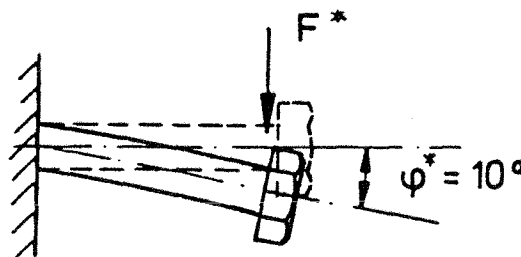


Bild 24: Definition der Grenzlast F^*

Bei sehr spröden Schrauben, die schon vor Erreichen einer Durchbiegung von 10° durch Bruch versagen, entspricht die Grenzlast der tatsächlichen Traglast.

Wählt man einen Sicherheitswert von $\gamma = 1,5$, so betragen aufgrund des nichtlinearen Verhaltens die Verformungen im Gebrauchszustand nur etwa $1,5 - 3,5^\circ$, wobei der untere Wert für Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 und 5.6 bei großen Exzentrizitäten und der obere Wert für Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 gilt.

6.3 Tragverhalten der Schrauben im Schaftbereich

Aus Vergleichsgründen wurde eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt, die das reine Biegetragverhalten der Schrauben im Schaftbereich untersuchten. Hierbei wurden nur Versuche mit größtmöglicher Exzentrizität der Belastung gefahren, um den Einfluß der Querkraft auf das Biegetragverhalten möglichst klein zu halten. In dieser Versuchsreihe wurden keine Schrägzugversuche durchgeführt.

Die Ergebnisse der Biegeversuche im Schaftbereich der Schrauben sind in den Anlagen 44-47 und 50-51 zusammengefaßt. Es zeigte sich, daß aufgrund der fehlenden Kerbwirkung durch Gewindegänge auch die Schrauben der Festigkeitsklassen 10.9 und 8.8 ein zähes Tragverhalten aufwiesen und niemals vor Erreichen von w^* durch Bruch versagten. Erwartet wurde bei den Versuchen eine Biegetragfähigkeit in der Größe des vollplastischen Momentes, also

$$M_{p1} = 1,7 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot d_{sch}^3 \cdot \beta_s$$

mit d_{sch} = Durchmesser des Schaftes

In Anlage 44-47 sind für die einzelnen Versuche die Verhältniswerte $M^*/M_{p1,enn}$ bzw. $M^*/M_{p1,verh}$ tabelliert und in Diagrammen eingetragen (Anlagen 50,51).

Dabei bedeuten:

$$M^* = M^*_v \cdot \cos 10^\circ \cdot 0,9 \quad (\text{vgl. Kap. 4.5})$$

$M_{pl, \text{nenn}}$ = vollplastisches Moment (Sollwert) aus den Nennwerten für Durchmesser und Fließgrenze der Schrauben ermittelt (siehe Anlagen 41 und 42)

$M_{pl, \text{vorh}}$ = vollplastisches Moment (Istwert) aus gemessenem Durchmesser und aus in Zugversuchen bestimmter statischer Streckgrenze ermittelt

Die Darstellung in Anlage 51 zeigt, daß im Mittel die vorhandene Biegetragfähigkeit größer als das vorhandene vollplastische Moment ist.

Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei Erreichen von w^* die Dehnungen in den äußeren Fasern des plastizierten Bereiches Beiträge erreichen, die bereits in dem Verfestigungsbereich des Werkstoffes der Schrauben liegen.

Gerade 4.6- und 5.6-Schrauben haben daher noch Tragreserven, da die Fließgrenze ihres Werkstoffes bei ca. 60% der Zugfestigkeit liegt.

Bei einer verwendeten Schraubensorte (M24, 5.6) lag die gemessene Fließgrenze nur bei 50% der gemessenen Zugfestigkeit. Wie im Diagramm (Anlage 51) ersichtlich hat diese Schraubensorte eine Biegetragfähigkeit, die etwa 55% über dem vollplastischen Moment liegt.

Die Schrauben der Festigkeitsklassen 10.9 und 8.8 liegen mit ihren Werten der Biegetragfähigkeit relativ genau beim vollplastischen Moment.

Eine statistische Auswertung der Messwerte aus den Anlagen 44-47 ergab für \bar{M} einen Mittelwert von 1,19 und bei Zugrundelegung einer Normalverteilung eine 5% Fraktile von 0,94, d.h. die Standardabweichung beträgt 15,3 %.

Zutreffender wird die Verteilungsdichte durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben (vergl. Anlage 56), hierfür ergibt sich ein 5 % Fraktilwert von 0,97 und ein 50 % Fraktilwert von 1,17.

Zum Vergleich sind in Anlage 55 die gemessenen Grenzmomente auf die Sollwerte der vollplastischen Momente der einzelnen Durchmesser und Festigkeitsklassen aufgetragen.

Die Streuungen sind größer, da viele Schrauben Überfestigkeiten aufweisen. Die statistische Auswertung dieses Diagrammes ergab bei Zugrundelegung einer Normalverteilung für \bar{M} einen Mittelwert von 1,39 und eine 5% Fraktile von 0,95.

Auch hier wird die Verteilungsdichte besser durch eine log. Normalverteilung genähert (siehe Anlage 55), die Fraktilwerte betragen für 5 % 1,03 und für 50 % 1,35.

Die vorab beschriebenen Tragreserven der 4.6- und 5.6-Schrauben führen zu einer Vergrößerung der Streuung im Diagramm (Anlage 51). Diese große Streuung ist also auf einen systematischen Fehler, hier ein ungenaues Berechnungsmodell für den Bezugswert M_p , zurückzuführen.

Im folgenden wurde daher in einer weiteren FEM-Berechnung der Schraubenschaft als Fasermodell idealisiert und die Biegetragfähigkeit für verschiedene Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ermittelt.

Für die Schrauben der Festigkeitsklassen 10.9 und 8.8 genügt die Ermittlung der Biegetragfähigkeit mit einem bilinearen Werkstoffgesetz (Verfestigungsmodul gleich null), hier ist der Bezug auf das vollplastische Moment also ausreichend.

Für die Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 und 5.6 wurde ein trilineares Werkstoffgesetz verwendet; für die 4.6-Schrauben ein linearer Verlauf der Verfestigung von 240 N/mm² bei einer Dehnung 20 % (Lüdersdehnung) bis 400 N/mm² bei 200 % (Gleichmaßdehnung) verwendet, davon abweichend wurde für die 5.6-Schrauben von 160% als Gleichmaßdehnung ausgegangen (vergl. [15]).

Bei den Berechnungen wurde die Last solange gesteigert, bis sich (bei einem e/d-Verhältnis von 5,0) eine Sehnenverdrehung des Schraubenschaftes von φ^* ergab. Gegenüber dem vollplastischen Moment (bilineares Werkstoffverhalten) ergaben sich unabhängig vom Schaftdurchmesser die Laststeigerungsfaktoren (im folgenden mit \bar{M}_v bezeichnet) 1,24 für 4.6- und 1,26 für 5.6-Schrauben. Ein Berechnungsbeispiel ist als Anlage 60 - 68 beigelegt.

Schrauben der Festigkeitsklasse A4-70 konnten in diesem Zusammenhang nicht untersucht werden, da keine zuverlässigen Angaben über den wahrscheinlichen Verlauf des Verfestigungsbereiches der Arbeitslinie vorlagen.

Dividiert man die Werte für \bar{M} der 4.6- und 5.6- Schrauben in der Anlage 51 durch den zugehörigen Wert für $\bar{M}_{v,}$, so ergibt sich das Diagramm in Anlage 53. Der Mittelwert der bezogenen Biegetragfähigkeit liegt nun bei 1,05, die Verteilung der Einzelwerte läßt sich hier gut durch eine Normalverteilung mit 9,7 % Standardabweichung beschreiben, es ergibt sich ein 5 % Fraktilwert von 0,89 (s. Anlage 58). Die hier noch auftretende deutlich kleinere Streuung der Versuchsergebnisse kann als Streuung der Materialkennwerte aufgefaßt werden, der unterschiedliche Verfestigungseinfluß wurde eliminiert.

Eine Berücksichtigung dieser erhöhten Biegetragfähigkeit durch partielle Verfestigung von Schrauben mit großem Verhältnis β_z/β_s erscheint (auch im Hinblick auf die Gebrauchsfähigkeit) für Bemessungsvorschriften wenig zweckmäßig, neben dem hohen numerischen Aufwand zur Ermittlung der Werte für $\bar{M}_{v,}$ würde dies eine Unterscheidung der verschiedenen Festigkeitsklassen erfordern.

6.4 Einfluß der Einschraubtiefe

Wie in Kapitel 5.3 erwähnt, hat die Anwesenheit von freien Gewindegängen außerhalb der Einspannung großen Einfluß auf den Spannungszustand im Gewindebereich. Die hohen Kerbspannungen ergeben sich einmal aus der Einschnürung des Schraubenquerschnittes am Übergang vom Schaft zum Gewindebereich und zum anderen aus der Gewindeflankenbelastung am Ort der Einspannung. Bei der Einspannung in der 1. Kerbe treffen beide Ursachen zusammen. Liegen mehrere freie Gewindegänge vor, so treten die hohen Kerbspannungen in der 1. Kerbe sowie am Ort der Einspannung auf. Die dazwischen liegenden Kerben haben ein deutlich niedrigeres Spannungsniveau.

Um den Einfluß der Einschraubtiefe zu erfassen, wurde eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt, in denen Schrauben verschiedener Festigkeitsklassen und verschiedenen Durchmessers belastet wurden. Der Ort der Einspannung wurde variiert und lag in den Kerben 1 bis 10. Dabei wurde der Hebelarm der Belastung so groß gewählt, daß die Querkraft offensichtlich noch keinen Einfluß auf die Biegetragfähigkeit der Schraube hatte.

Von denselben Schrauben wurden danach die Gewinde und der plastizierte Schaftbereich abgesägt. An den verbleibenden Schaftteilen wurden Biegeversuche durchgeführt. Es wurde die gleiche Versuchseinrichtung wie bei den eingeschraubten Schrauben verwendet, hier wurden die Schraubenschäfte in gewindefreie Löcher gesteckt. Damit bestand die Möglichkeit, die Biegetragfähigkeit der Schrauben im Gewindebereich unmittelbar mit der Tragfähigkeit im Schaftbereich zu vergleichen. Unter der Voraussetzung, daß im Schaft- und Gewindebereich identische Werkstoffkennwerte und Arbeitslinien vorliegen, ergibt sich die Möglichkeit, die reine Geometrieabhängigkeit der Tragfähigkeit zu bestimmen.

Wie jedoch die relativ großen Streuungen der Versuche vermuten ließen, ist dies leider nicht für alle Schrauben der Fall.

In den Anlagen 74-77 sind die Ergebnisse aufgetragen. Auf der Abszisse ist die Einschraubtiefe verzeichnet, auf der Ordinate die bezogene Biegetragfähigkeit \bar{M} .

Dabei ist: $\bar{M} = M^*_{\text{KERB}} / M^*_{\text{SCHAFT}}$

Im durchplastizierten Zustand haben die Kerbspannungen nur geringen Einfluss auf die Höhe des plastischen Momentes, das Bruchkriterium wird durch die großen Dehnungen im Kerbgrund jedoch früher erreicht. Für den Gewindebereich, in dem der Übergang vom Schaft zum Gewinde keine Rolle mehr spielt, ist daher theoretisch für das bezogene Moment das Verhältnis der plastischen Widerstandsmomente in Gewinde- und Schaftbereich zu erwarten, letztendlich also $d_{\text{e}}^3 / d_{\text{ch}}^3$, wobei der Gewindequerschnittsbereich durch den Spannungsquerschnitt mit dem Durchmesser d_{e} ersetzt wird.

Dieses Verhältnis ist für die verschiedenen Schraubendurchmesser in Tabelle 2 eingetragen.

Vergleich Schaftbereich - Gewinde

	$d_{s c h}$	$d_{s p}$	$d_{s p}^3 / d_{s c h}^3$
M 6	6	5,06	0,60
M 12	12	10,36	0,64
M 20	20	17,65	0,69
M 24	24	21,19	0,69
M 27	27	24,19	0,72
M 30	30	26,72	0,71

Tabelle 2. Verhältnis der Widerstandsmomente im Gewinde- und Schaftbereich

Diese Verhältniswerte sind als Linien in die Anlagen 74-77 eingetragen. Man erkennt, daß bei der Einspannung in der ersten Kerbe der Mittelwert der Biegetragfähigkeit deutlich über dem o.g. Verhältniswert liegt, während mit der Zunahme der freien Gewindegänge der Mittelwert der Biegetragfähigkeit gegen diesen Verhältniswert strebt. Ab ca. 4 -5 freien Gewindegängen ist keine weitere Änderung mehr ersichtlich.

Auffällig sind die Werte für Versuche mit A4-70-Schrauben sowie mit 4.6-Schrauben des Durchmessers M 6. Sie liegen deutlich über den Werten der anderen Schrauben.

Bei mit diesen Schrauben durchgeführten Ganzzugversuchen zeigte sich die Erklärung: Diese Schrauben hatten durch das Aufrollen des Gewindes einen stark verfestigten Gewindebereich, im Ganzzugversuch versagten sie im Schaftbereich, während der Gewindebereich nicht sichtbar plastizierte!

Damit wird auch die erhöhte Biegetragfähigkeit im Gewindebereich verständlich.

(In der Regel wird die beim Aufrollen des Gewindes auftretende Verfestigung durch eine Wärmebehandlung rückgängig gemacht, so daß die erhöhte Biegetragfähigkeit im Gewindebereich bei den meisten Schrauben mit gerolltem Gewinde nicht auftrat!)

Die beiden folgenden Fotos zeigen einen Teil der Schrauben, mit denen Ganzzugversuche durchgeführt wurden. Bild 25 zeigt Schrauben des Durchmessers M6. Hier versagten die Schrauben der Festigkeitsklassen A4-70 und 4.6 im Schaftbereich, die Schraube, die im Gewindebereich durch Bruch versagte, gehört der Festigkeitsklasse 8.8 an. Auf Bild 26 sind Schrauben des Durchmessers M12 zu sehen. Ganz links im Bild befinden sich zwei Schrauben der Festigkeitsklassen A4-70. Sie versagten bei den Versuchen im Schaftbereich, während sich die übrigen Schrauben im Gewindebereich einschnürten. Bei den Schrauben mit den Nummern 18 und 19 begann der Schaftbereich zu plastizieren, als sich der Gewindebereich zu verfestigen begann.

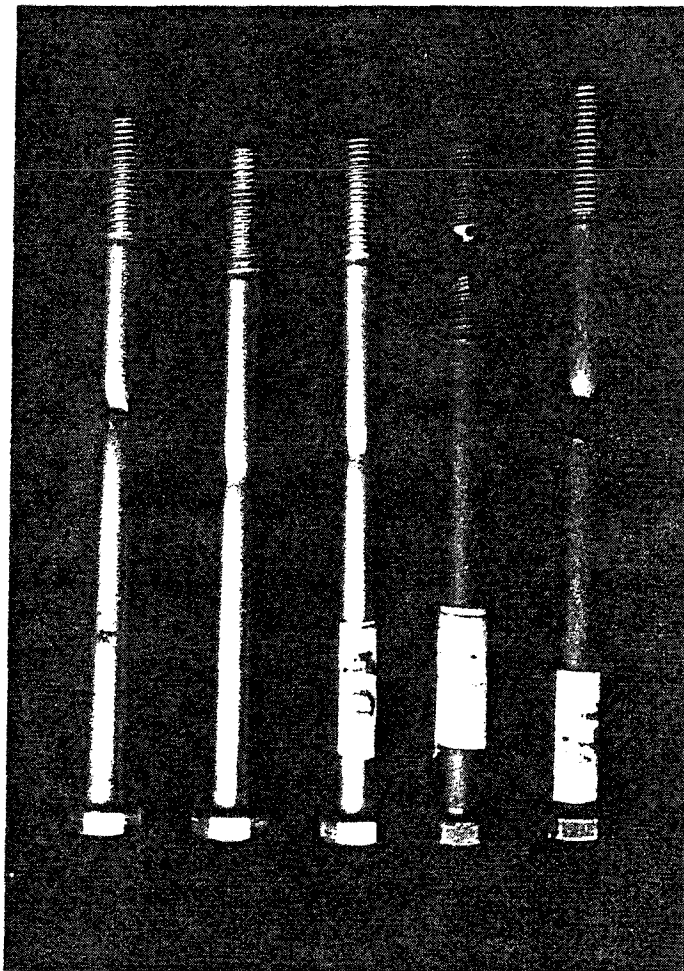


Bild 25: Schrauben M6 nach dem Ganzzugversuch

- a) - c) Festigkeitsklasse A4-70
- d) Festigkeitsklasse 8.8
- e) Festigkeitsklasse 4.6

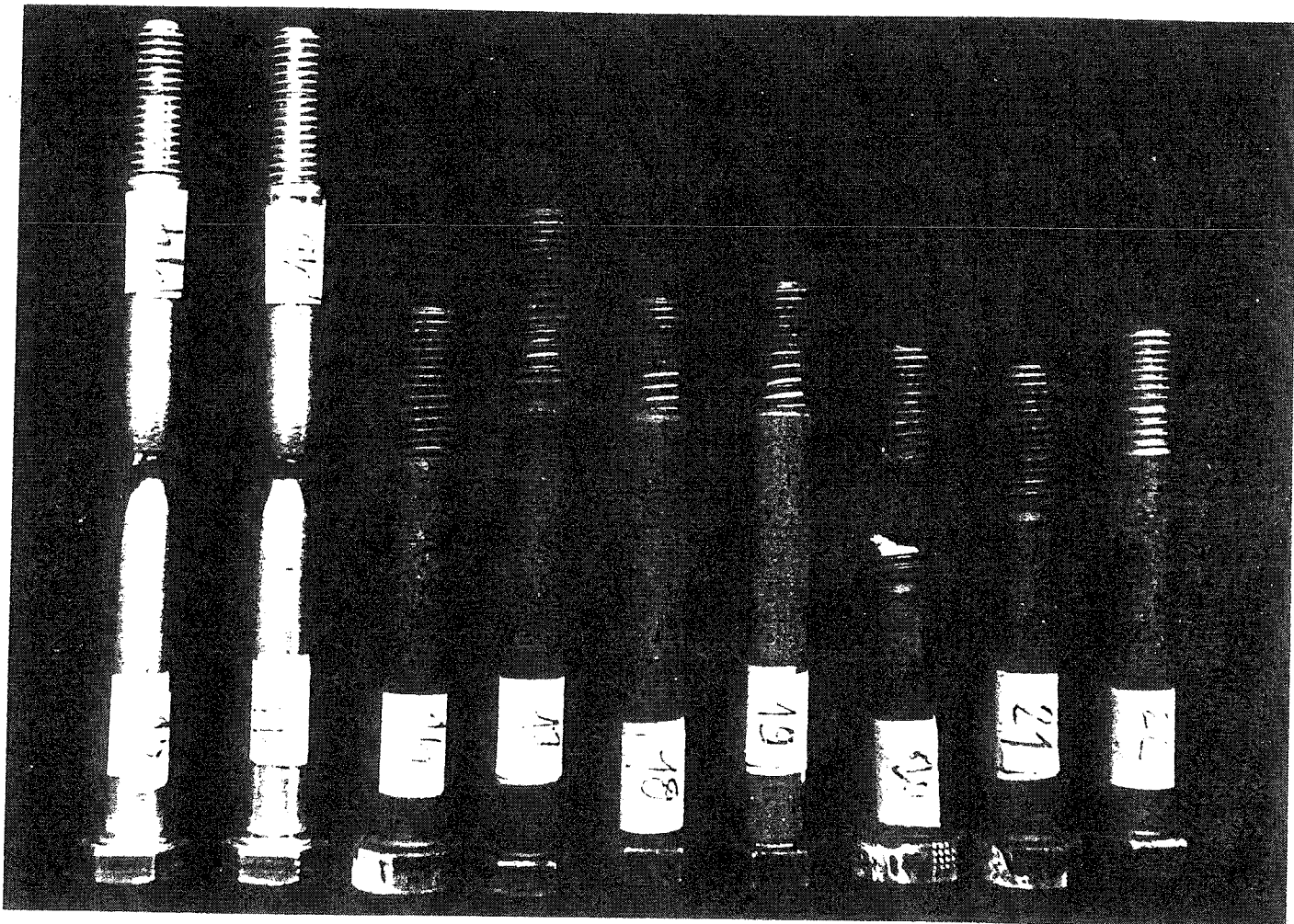


Bild 26: Schrauben des Durchmessers M12 nach dem Ganzzugversuch

Nr. 14-15	Festigkeitsklasse	A4-70
Nr. 16	-"-	10.9 (AF)
Nr. 17	-"-	8.8
Nr. 18-19	-"-	4.6
Nr. 20-21	-"-	10.9 (Peiner)
Nr. 22	Festigkeitsklasse	5.6

Analog zu der Auswertung der Versuche im Schaftbereich der Schrauben wurde nun auch eine Auswertung im Gewindebereich der Schrauben durchgeführt. Um eine Verzerrung der Ergebnisse nach oben zu vermeiden, wurden alle Versuchsergebnisse mit erhöhter Tragfähigkeit vernachlässigt, also die Versuche mit weniger als vier freien Gewindegängen außerhalb der Einspannung, sowie die oben beschriebenen Versuche an Schrauben mit auffällig verfestigtem Gewindebereich.

In den Anlagen 48-49, 52 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Wie schon bei den Versuchen im Schaftbereich wurden die gemessenen Grenzmomente zunächst auf das vollplastische Moment (hier des Spannungsquerschnittes) bezogen. Die statistischen Kennwerte gehen aus Anlage 57 hervor, für eine Normalverteilung beträgt die Standardabweichung 22,5 % und der 5 % Fraktilwert liegt bei 0,94, für eine dem Histogramm besser angepaßte logarithmische Normalverteilung liegt die 5 % Fraktile bei 0,97. Auch hier ergaben sich wieder sehr große Streuungen, vor allem die 4.6- und 5.6-Schrauben zeigten eine mittlere Biegetragfähigkeit, die das zugehörige vollplastische Moment deutlich übertraf. Dies ist wieder auf die Verfestigung der Randfasern zurückzuführen. Im folgenden wurde daher der Verfestigungseffekt mit den in Kapitel 6.3 angegebenen Laststeigerungsfaktoren \bar{M}_v rückgerechnet.

Es ergibt sich auch hier eine deutliche Verringerung der Streuung, der Mittelwert liegt bei 1,12 und für eine Normalverteilung ergibt sich eine Standardabweichung von 13,7 % und damit ein 5 % Fraktilwert von 0,89 (Anlage 59).

Um die unterschiedlichen Festigkeitsklassen in einer Bemessungsvorschrift zusammenfassen zu können, werden im Kapitel 7 die Tragreserven der Schrauben mit großem Verfestigungspotential im Rahmen der vorgeschlagenen Bemessungsvorschrift nicht berücksichtigt.

6.5 Einfluß des Hebelarmes, M-Q-Interaktion

Wie im Kapitel 3.1.3 erläutert, lagen die in den Versuchen realisierten e/d Verhältnisse etwa zwischen 1,0 und 8,0.

Da die Schrauben bei Einspannung in den Kerben 1 bis 3 eine höhere Tragfähigkeit aufweisen als bei Einspannung im übrigen Gewindebereich (vergl. Kap. 6.4), wurden solche Versuche in der folgenden Auswertung nicht mit berücksichtigt.

In den Anlagen 78-80 sind Versuche zusammengefaßt, die mindestens 4 freie Gewindegänge während der Versuche aufwiesen, so daß der Übergang vom Schaft in den Gewindebereich keine Rolle mehr spielt.

In den Diagrammen (Anlagen 81-82) sind für die Versuche folgende dimensionslosen Parameter dargestellt:

Abszisse e/d (Verhältnis von Exzentrizität zu Durchmesser)

$$\text{Ordinate } \bar{M} = \frac{M^*_{v,kerb}}{M^*_{v,sch}} \cdot \frac{d_{sch}^3}{d_{sp}^3}$$

\bar{M} gibt hier also den im Versuch gemessenen Wert für das Grenzbiegemoment an, bezogen auf die im Verhältnis der Widerstandsmomente in Gewinde- und Schaftbereich abgeminderte Tragfähigkeit der Schrauben im Schaftbereich.

Bei der Betrachtung des Diagrammes in Anlage 81 fällt ein gleichmäßig gefülltes Streuband für \bar{M} -Werte zwischen 0,9 und 1,20 auf. Darüber liegen noch einmal Werte zwischen 1,4 und 1,6. Diese Werte sind den Schrauben zuzuordnen, die im Gewindebereich eine höhere Festigkeit als im Schaftbereich aufweisen (vgl. Seite 43). Ein Einfluß der Querkraft auf die Biegetragfähigkeit ist bei den untersuchten Verhältnissen nicht zu erkennen.

Eine Interaktionsformel für die M-Q Interaktion anzugeben bereitet gewisse Schwierigkeiten, da das Grenzmoment in Abhängigkeit von der Fließgrenze β_1 und die Grenzabscherkraft in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit β_2 der Schrauben berechnet wird. Auch das

Grenzmoment auf die Zugfestigkeit zu beziehen hätte den Nachteil, daß man bei der Berechnung des Grenzmomentes 4.6-(u. 5.6-), 8.8- und 10.9-Schrauben unterschiedlich behandeln müßte, da sie unterschiedliche Verhältnisse β_1/β_2 haben.

Benutzt man nun trotzdem die Fließbedingung nach v. Mises für die Beschreibung der M-Q Interaktion (und liegt damit für den Fall des reinen Abscherens etwa um den Faktor β_2/β_1 auf der sicheren Seite) erhält man das in Anlage 82 dargestellte Bild. Hierbei wurden in die Fließbedingung

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2}$$

die Spannung aus Schub und Moment

$$\sigma_x = M/W_{p1} = \frac{M \cdot 32}{1,7 \cdot \pi \cdot d^3}$$

$$\tau = Q/A = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}$$

eingesetzt und so umgeformt, daß eine Beziehung zwischen M und e/d entsteht, wie sie in Anlage 82 (durchgezogene Kurve) aufgetragen ist.

Es ergibt sich

$$M = \frac{18,82 \cdot (e/d)}{\sqrt{354 (e/d)^2 + 48}}$$

Die Kurve zeigt deutlich, daß für e/d größer als 2,0 die Querkraftinteraktion vernachlässigbar ist, für e/d-Werte zwischen 1,0 und 2,0 spielt sie nur eine untergeordnete Rolle. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Versuche.

Der Bereich für e/d Werte kleiner als 1,0, in dem der Einfluß der Querkraft auf die Momententragfähigkeit von Bedeutung ist, konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht mehr näher untersucht werden. Reine Schubbeanspruchung kommt praktisch nicht vor. Selbst bei zweiseitigen Schraubenverbindungen, die so bemessen wurden, daß das Abscheren der Schraube maßgebend (also Lochleibung ausgeschlossen) ist, liegt in der Scherfuge eine Biegebeanspruchung allein aus dem Hebelarm der lasteinleitenden Lasche vor. Zur genauen Berechnung der Momentenbelastung ist eine genaue Kenntnis der Spannungsverteilung in der lasteinleitenden Lasche nötig. Bei Annahme einer konstanten Spannungsverteilung liegt der minimale e/d Wert bei 0,15. Bei Verwendung dickerer Laschen oder Futterblechen kann der e/d Wert rasch anwachsen. So enthalten die experimentell gefundenen Werte für die Grenztragfähigkeit bei Schubbeanspruchung immer gewisse Biegeanteile.

6.6 Einfluß der Normalkraft, M-N-Interaktion

Der Einfluß der Normalkraft wurde durch Schrägzugversuche (beschrieben im Kapitel 4.4) untersucht. Neben den Winkeln der Belastung (30° und 60°) wurden auch die Hebelarme variiert. Die Belastungsexzentrizität war jedoch immer so groß, daß eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch Querkraft gering gehalten wurde ($e/d > 2,0$).

Bei der gleichzeitigen Beanspruchung durch Biegung und Zug resultiert bei der vorgegebenen Belastungsanordnung der größere Teil der Normalspannungen aus den Biegemomenten, daher wurden bei den Versuchen nur bezogene Normalkräfte

$$\bar{N} = \frac{N_v^*}{N_u} \quad \text{von } \bar{N} = 0,1 \text{ erreicht.}$$

Dabei bedeuten:

N_v^* : Normalkraft im Versuch bei Erreichen von φ^*

N_u : Bruchkraft im Ganzzugversuch

In den Anlagen 83 bis 95 sind die Versuchsergebnisse tabelliert und in Diagrammen aufgetragen.

In den Diagrammen liegt der Wert $\bar{N} = 0$ auf der Abszisse nicht im Schnitt mit der Ordinate damit zur besseren Übersichtlichkeit die Werte der normalkraftfreien Versuche ($\varphi_0 = 0^\circ$) nicht auf der Ordinate liegen.

In den Diagrammen bedeutet

$$\bar{M} = \frac{M_{v,kerb}^*}{M_{v,sch}^*} \cdot \frac{d_{sp}^3}{d_{sch}^3}$$

Trotz der aufgetretenen Streuung ist deutlich ein Einfluß der Normalkraft erkennbar.

Eine einfache lineare Interaktionsbeziehung läßt sich wie folgt formulieren:

$$\beta_s = N/A_{s,p} + M/W_{p1}$$

$$\text{mit } \bar{M} = M/(W_{p1} \cdot \beta_s)$$

$$\text{und } \bar{N} = N/(A_{s,p} \cdot \beta_z)$$

$$\text{ergibt sich } \bar{M} = 1 - \bar{N} \cdot 1/(\beta_s/\beta_z)$$

Diese Geraden sind für $\beta_s/\beta_z = 0,9$ (10.9-Schrauben) und für $\beta_s/\beta_z = 0,6$ (4.6-, 5.6-Schrauben) in den Anlagen 93 bis 96 in die Diagramme mit den Versuchsergebnissen eingezeichnet. Die o.g. Beziehung beschreibt den Einfluß der Normalkraft im untersuchten Bereich recht gut, genauere Aussagen lassen die Streuung der Versuche und die Beschränkung von \bar{N} in den Versuchen auf Werte unter 0,1 nicht zu.

Die oben angegebene lineare Interaktionsbeziehung liegt auf der sicheren Seite, da M-N-Interaktionen im plastischen Bereich im allgemeinen "fülliger" sind.

7 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE, NORMENVORSCHLAG

7.1 Allgemeines

Die vorausgehenden Überlegungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei Schrauben mit planmäßiger Biegebeanspruchung muß unterschieden werden, ob die maximale Beanspruchung im Schaft- oder Gewindebereich auftritt.

Die im folgenden angegebenen charakteristischen Werte für die Biegetragfähigkeit der Schrauben enthalten keine Sicherheitsbeiwerte.

a) maximale Beanspruchung im Schaftbereich.

In diesem Fall liegen einfache Verhältnisse vor, da Kerbspannungseinflüsse entfallen. Die Schrauben erreichen schon bei Verdrehwinkeln von ca. 10° ihre vollplastischen Momente, da zwar innenliegende Fasern noch nicht fließen, außenliegende Fasern (die größeren Einfluß auf das Moment haben) aber bereits in den Verfestigungsbereich kommen.

Die Schrauben aller hier untersuchten Festigkeitsklassen weisen keine Gefahr von Sprödbrüchen im Schaftbereich auf. Als Grenzlast wird eine Last mit der zugehörigen Sehnendrehung der Schraube von 10° festgelegt.

Die in den Versuchen ermittelten Grenzmomente der Schrauben lagen im Mittel über dem vollplastischen Moment, unter Berücksichtigung der 5%-Fraktile der ermittelten Grenzmomente ergab sich folgender Wert für M^* im Schaftbereich (vergl Kap. 6.3) :

$$M_s^* = 0,97 \cdot W_{Pl, sch} \cdot \beta_s$$

mit

$$W_{Pl, sch} = 1,7 \cdot \pi / 32 \cdot d_{sch}^3$$

Im Normenvorschlag wird der Wert für das charakteristische Moment M_k auf der sicheren Seite liegend zur Vereinfachung auf

$$M_k = 0,90 \cdot W_{Pl, sch} \cdot \beta_s$$

abgemindert.

Damit ergibt sich für das Grenzmoment:

$$M_{gr} = 0,90 \cdot W_{Pl, sch} \cdot \beta_s / \gamma_M$$

Eine Querkraft - Interaktion braucht für e/d Werte größer als 1,0 nicht berücksichtigt zu werden.

Bei Zugkraft-Interaktion ist das Grenzmoment folgendermaßen abzumindern:

$$M_{gr} = 0,90 \cdot W_{Pl} \cdot \beta_s \cdot (1 - N/N_u) / \gamma_M$$

mit $N_u = A_{sp} \cdot \beta_z$ (A_{sp} = Spannungsquerschnitt)

b) Maximale Beanspruchung im Gewindebereich

Hier müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- 1) Die Einspannung liegt direkt am Übergang Schaft-Gewinde (Belastung 1. Kerbe)
- 2) Es liegen freie Gewindegänge zwischen Schaft und Einspannung (Belastung n. Kerbe)

Betrachtet wird zunächst der zweite Fall:

Die Schrauben weisen aufgrund der Entlastungswirkung der freien Gewindegänge ein ausreichend duktilen Verhalten auf, bei keinem der Versuche kam es vor Erreichen von φ^* zum Bruch.

In den Versuchen (vgl. Kap. 5.3) wurde eine mittlere Grenztragfähigkeit im Gewindebereich von

$$M_{SP}^* = M_{SCH}^* \cdot (d_{SP}^3 / d_{SCH}^3)$$

gefunden, wobei d_{SP} für den mittleren Durchmesser im Gewindebereich steht (d_{SP} wird zur Berechnung des Spannungsquerschnittes verwendet).

Vernachlässigt man auf sicherer Seite die Versuche, die durch Aufrollen des Gewindes eine z.T. erheblich höhere Tragfähigkeit im Gewindebereich besitzen, so ergibt sich analog zum Schaftbereich ein Grenzmoment von

$$M_{GR,SP} = 0,90 \cdot W_{PL,SP} \cdot \beta_S / \gamma_M$$

mit $W_{PL,SP} = 1,7 \cdot \pi / 32 \cdot d_{SP}^3$

Das oben angegebene $M_{GR,SP}$ liegt damit unterhalb des 5%-Fraktilwertes der gemessenen Grenzmomente im Gewindebereich (vergl Kap. 6.4, Seite 48).

Bei gleichzeitig auftretender Belastung aus Normal- oder Querkraften gelten dieselben Aussagen bzw. Zusammenhänge wie im Schaftbereich:

Eine Querkraft-Interaktion braucht für e/d Werte größer als 1,0 nicht berücksichtigt zu werden.

Die Normalkraft-Interaktion ist wie auf Seite 52 angegeben zu berücksichtigen.

Wenn das maximale Biegemoment direkt am Übergang zwischen Schaft und Einspannung liegt (Einspannung in der 1. Kerbe) tritt häufig ein Versagen durch Sprödbbruch ein, bei einigen

Schrauben der Festigkeitsklassen 10.9 und 8.8 auch schon vor Erreichen des Grenzwinkels φ^* . Gleichzeitig liegt die Tragfähigkeit in diesem Falle deutlich über der Tragfähigkeit im Falle mehrerer vorliegender freier Gewindegänge.

So können auch in diesem Bereich die Bemessungsvorschläge für den Gewindebereich angewendet werden.

Die ermittelten Biegetragfähigkeiten liegen damit deutlich über den zulässigen Biegebeanspruchungen für Schrauben und Gewindebolzen bei Metallspreizdübeln und Schwerlastankern (zul $M = W_{0,1} \cdot B_0 / 1,5$). Die angegebene Zugkraftinteraktion sowie die in der Regel nicht zu berücksichtigende Querkraftinteraktion entsprechen den Zulassungsangaben.

An dieser Stelle sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß alle Ergebnisse nur für den statischen Fall gelten, und Aussagen über Dauerfestigkeit bei wechselnder Beanspruchung nicht gemacht werden können.

7.2 Entwurf eines Normtextes

Schrauben mit planmäßiger Biegebeanspruchung bei ruhender Belastung.

Grenzbiegemoment

Das Grenzbiegemoment M_{gr} von Schrauben ist

$$M_{gr} = 0,90 W_{PL} \cdot \beta_s / \tau_H \quad (1)$$

mit

$$W_{PL} = 1,7 \cdot \pi / 32 \cdot d^3. \quad (2)$$

Hierbei ist für d der Schaftdurchmesser d_{sh} einzusetzen, wenn der Schaft im Bereich der Biegebeanspruchung liegt. Liegt Biegebeanspruchung auch im Gewinde vor, so ist beim Nachweis des Gewindebereiches für d der Durchmesser des Spannungsquerschnittes d_s einzusetzen.

Interaktion Biegung und Abscheren

Eine Querkraftinteraktion braucht für

$$e/d > 1,0 \quad \text{bzw.} \quad M / (Q \cdot d) > 1,0$$

nicht berücksichtigt zu werden.

Interaktion Biegung und Zug

Bei Zugkraft-Interaktion ist das Grenzmoment $M_{g,r}$ auf $M^*_{g,r}$ folgendermaßen abzumindern:

$$M^*_{g,r} = M_{g,r} \cdot (1 - N/N_u) \quad (4)$$

mit $N_u = A_{s,p} \cdot \beta_z / \gamma_M$ ($A_{s,p}$ = Spannungsquerschnitt)

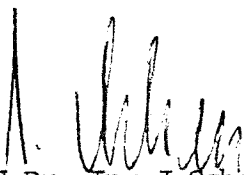
Im Gewindeteil der Schraube sind für W_{pL} und d die Werte des Spannungsquerschnittes einzusetzen.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Schrauben mit planmäßiger Biegebeanspruchung sind häufig eingesetzte Verbindungsmittel im gesamten Bauwesen. Beispiele hierfür sind z. B. Fassadenabhängungen mit Hilfe von Metallspreizdübeln, Konstruktionen mit Futterblechen im Stahlbau, Verbindungen im Gerüstbau.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden theoretische und praktische Untersuchungen durchgeführt, die zur Klärung des Tragverhaltens von Schrauben mit Biegebeanspruchung dienten. Ferner wurden innerhalb gewisser Grenzen die Wirkung gleichzeitiger Beanspruchung durch Quer- und Zugkräfte untersucht.

Die Ergebnisse werden als Normvorschlag dargestellt und sind als Ergänzung für DIN 18800 Teil 1 vorgesehen.



Prof. Dr.-Ing. J. Scheer
Leiter der Abteilung
Stahlbau



Dr.-Ing. U. Peil
Projektleiter



Dipl.-Ing. H. Nölle
Sachbearbeiter

9 LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Scheer, J.; Peil, U.; Paustian, O.:
Zum Tragverhalten einschnittiger, ungestützter
Einschraubverbindungen
Bauingenieur 59 (1984) 389 - 396.
- 2 Scheer, J.; Peil, U.; Paustian, O.:
Einfache Schraubverbindungen. Ber. Nr. 6061
Inst. Stahlbau, TU Braunschweig 1980.
- 3 Scheer, J.; Peil, U.; Paustian, O.:
Einfache Schraubverbindungen. Ber. Nr. 6064
Inst. Stahlbau, TU Braunschweig 1983.
- 4 Fischer, J.-W.; Struick, J. H. A.;
Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints.
New York, London, Sydney, Toronto. J. Wiley & Sons 1974.
- 5 Scheer, J.; Maier, W.; Paustian, O.:
Statistik, Planung und Auswertung von Versuchen an
geschraubten Verbindungen. Ber. Nr. 6065
Inst. Stahlbau, TU Braunschweig
- 6 Scheer, J.; Maier, W.; Paustian, O.:
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Tragver-
halten von Trägerklemmen
Bauingenieur 59 (1984) 415 - 421.
- 7 Scheer, J.; Peil, U.; Grüter, A.:
Untersuchungen zu Ursachen des Lockerns von Trägerklemmen
Ber. Nr. 6068, Inst. Stahlbau, TU Braunschweig 1983.
- 8 Utscher, G.:
Beurteilungsgrundlagen für Fassadenverankerungen
W. Ernst u. Sohn.

- 9 Feldmann, H.:
Spannungsberechnung an Gewinden von Schraube-Mutter-
Verbindungen mittels der Methode der Finiten Elemente.
Diss. TU Braunschweig 1981
- 10 Kober, A.:
Schäden an großen Schraubenverbindungen. Der Maschinenscha-
den, 59. Jahrgang, Heft 1, (1986). Allianz Versicherungs AG.
- 11 Neuber, H.:
Über die Spannungsverteilung in Zahnstangen
Forsch. Ing. Wesen Bd. 29 (1963) S. 176 - 181.
- 12 Neuber, H.:
Kerbspannungslehre
3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin
- 13 Schmid, J.:
Beitrag zur genaueren Bestimmung des Kerbfaktors von
Schraube-Mutter-Verbindungen
Diss. TU München 1974.
- 14 Bretl, J. L.:
Modelling the Load Transfer in Threaded Connections by the
Finite Element Method
Int. Journ. Num. Meth. Eng. (1979) S. 1359 - 1377.
- 15 Scheer, J.; Maier, W.; Rohde, M.:
Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Baustahl
Bericht 6087, Inst. Stahlbau, TU Braunschweig 1987

-Vorversuche-

Versuch	Hersteller	Festigk. klasse	D Exzentr.		Einschr.- tiefe	F*	M _v *
			[mm]	[mm]			
01	Friedb.	10.9	16	90	1.K.	7.6	684
02	Friedb.	10.9	16	90	1.K.	7.8	702
03	Peiner	10.9	16	40	1.K.	17.0	680
04	Peiner	10.9	16	45	1.K.	13.8	621
05	Peiner	10.9	16	52	4.K.	10.3	535
06	Friedb.	10.9	16	51	1.K.	15.1	770.1
07	Friedb.	10.9	16	50	Schaft	13.9	695
08	Fuchs	4.6	16	81	1.K.	3.3	267.3
09	Fuchs	4.6	16	80	1.K.	3.2	256
10	Fuchs	4.6	16	48	1.K.	6.8	326.4
11	Fuchs	4.6	16	46	Schaft	7.5	345
12	SM	4.6	16	35	1.K.	9.7	339.5
13	SM	4.6	16	49	6.K.	5.1	249.9
14	SM	4.6	16	36	1.K.	9.3	334.8
15	Fuchs	4.6	24	68	1.K.	13.2	897.6
16	Fuchs	4.6	24	78	5.K.	9.1	709.8
17	Peiner	10.9	24	87	1.K.	24.8	2158
18	Peiner	10.9	24	86	1.K.	27.1	2331
19	Peiner	10.9	24	86	4.K.	23.9	2055
20	Thyssen	4.6	24	48	1.K.	15.7	753.6
21	Thyssen	4.6	24	48	4.K.	14.6	700.8
22	Thyssen	4.6	24	48	4.K.	13.6	652.8
23	Peiner	10.9	24	38	1.K.	57.5	2185
24	Peiner	10.9	24	38	1.K.	58.9	2238
25	Peiner	10.9	24	40	6.K.	54.5	2180
26		4.6	12	46	1.K.	2.8	128.8
27		4.6	12	46	1.K.	3.0	138
28		4.6	12	46	6.K.	1.9	87.4
29	Peiner	10.9	12	52	1.K.	5.0	260
30	Peiner	10.9	12	52	1.K.	5.0	260

Versuch	Hersteller	Festigk.- klasse	D Exzentr.		Einschr.- tiefe	F*	M _v *
			[mm]	[mm]			
31	Peiner	10.9	12	52	3.K.	3.8	197.6
32	Fuchs	4.6	12	89	1.K.	1.1	97.9
33	Fuchs	4.6	12	89	1.K.	1.4	124.6
34	Fuchs	4.6	12	90	5.K.	1.1	99
35	Verbus	10.9	12	82	1.K.	3.8	311.6
36	Verbus	10.9	12	82	1.K.	3.4	278.8
37	Verbus	10.9	12	83	4.K.	2.7	224.1

Tabelle der Versuchsparameter

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _v *	Bem.
				[mm]	[mm]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Hersteller/jahre
001	7990	Fuchs	5.6	12	22	1.K	(4.6)	(101)	H2/H4
002	7990	Fuchs	5.6	12	22	1.K	5.9	130	H2/H4
003	7990	Fuchs	5.6	12	21	1.K	5.6	118	H2/H4
004	7990	Fuchs	5.6	12	21	1.K	5.4	113	H2/H4
005	7990	Fuchs	5.6	12	23	3.K	4.5	103.5	H2/H4
006	7990	Fuchs	5.6	12	23	4.K	4.0	92	H2/H4
007	7990	Fuchs	5.6	12	23	5.K	3.8	87.4	H2/H4
008	7990	Fuchs	5.6	12	24	6.K	3.9	94	H2/H4
009	7990	Fuchs	4.6	12	20	1.K	5.2	104	H1/H3
010	7990	Fuchs	4.6	12	20	4.K	3.6	72	H1/H3
011	7990	Fuchs	4.6	12	20	1.K	4.6	92	H1/H3
012	7990	Fuchs	4.6	12	20	4.K	4.0	80	H1/H3
013	7990	Fuchs	5.6	12	46	1.K	2.3	106	H2/H4
014	7990	Fuchs	5.6	12	46	2.K	2.3	106	H2/H4
015	7990	Fuchs	5.6	12	45	3.K	2.25	101	H2/H4
016	7990	Fuchs	5.6	12	47	4.K	2.0	94	H2/H4
017	7990	Fuchs	4.6	12	45	1.K	2.7	121.5	H1/H3
018	7990	Fuchs	4.6	12	45	4.K	2.2	99	H1/H3
019	7990	Fuchs	5.6	12	70	1.K	1.5	105	H2/H4
020	7990	Fuchs	5.6	12	69	2.K	1.5	103.5	H2/H4
021	7990	Fuchs	5.6	12	70	3.K	1.4	98	H2/H4
022	7990	Fuchs	5.6	12	70	4.K	1.4	98	H2/H4
023	7990	Fuchs	5.6	12	70	5.K	1.3	91	H2/H4
024	7990	Fuchs	4.6	12	68	1.K	1.8	122.4	H1/H3
025	7990	Fuchs	4.6	12	69	4.K	1.4	97	H1/H3
026	7990	Fuchs	4.6	12	75	1.K	1.6	120	H1/H3
027	7990	Fuchs	5.6	24	156	1.K	5.5	858	H2/H4
028	7990	Fuchs	5.6	24	155	1.K	(6.4)	(992)	H2/H4
029	7990	Fuchs	5.6	24	155	4.K	5.2	806	H2/H4
030	7990	Fuchs	5.6	24	100	1.K	9.9	990	H2/H4

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschw

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr. tiefe	F*	M _v *	Bemerk.
				[mm]	[mm]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellverfahren
031	7990	Fuchs	5.6	24	98	4.K	(8.6)	(843)	H2/H4
032	7990	Fuchs	5.6	24	60	1.K	(17.0)	1020)	H2/H4
033	931	Friedb.	5.6	12	20	1.K	(7.0)	140)	H1/H3
034	931	Friedb.	5.6	12	20	4.K	(6.8)	135)	H1/H3
035	931	Friedb.	5.6	12	45	1.K	3.1	140	H1/H3
036	931	Friedb.	5.6	12	47	2.K	(2.6)	122)	H1/H3
037	7990	Fuchs	5.6	24	60	4.K	(13.5)	810)	H2/H4
038	7990	Fuchs	5.6	24	60	1.K	17.4	1044	H2/H4
039	7990	Fuchs	4.6	24	60	1.K	15.8	948	H2/H4
040	7990	Fuchs	4.6	24	59	4.K	12.2	720	H2/H4
041	7990	Fuchs	4.6	20	128	1.K	4.2	538	H2/H4
042	7990	Fuchs	4.6	20	128	4.K	3.6	461	H2/H4
043	7990	Fuchs	4.6	20	91	1.K	4.7	428	H2/H4
044	7990	Fuchs	4.6	20	45	1.K	(12.2)	549)	H2/H4
045	7990	Fuchs	4.6	20	44	4.K	10.7	471	H2/H4
046	7990	Fuchs	4.6	20	44	1.K	12.7	559	H2/H4
047	7990	Fuchs	4.6	20	46	1.K	12.0	552	H1/H3
048	7990	Fuchs	4.6	20	44	4.K	9.9	436	H1/H3
049	7990	Fuchs	5.6	20	45	1.K	13.5	608	H2/H4
050	7990	Fuchs	5.6	20	44	4.K	11.6	510	H2/H4
051	7990	Fuchs	5.6	24	47	1.K	22.3	1048	H2/H4
052	7990	Fuchs	5.6	24	44	4.K	18.4	810	H2/H4
053	931	Friedb.	5.6	12	44	3.K	2.6	113	H1/H3
054	931	Friedb.	5.6	12	45	4.K	2.6	116	H1/H3
055	931	Friedb.	5.6	12	44	5.K	2.4	106	H1/H3
056	931	Friedb.	5.6	12	45	6.K	2.35	106	H1/H3
057	931	Friedb.	5.6	12	68	1.K	1.9	128	H1/H3
058	931	Friedb.	5.6	12	68	1.K	1.9	129	H1/H3
059	931	Friedb.	5.6	12	69	3.K	1.7	117	H1/H3
060	931	Friedb.	5.6	12	69	5.K	1.5	103.5	H1/H3

H1 = Kaltform
H2 = Warmform
H3 = Gewinde ges
H4 = Gewinde ges

Versuch	Din	Herst.	Festigk. Klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _V *	Bem.
				[mm]	[mm]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellverjahren
061	931	Friedb.	5.6	12	71	7.K	1.4	99.4	H1H3
062	931	Friedb.	5.6	12	70	9.K	1.4	98	H1H3
063	601	Graeka	4.6	12	70	1.K	1.9	133	H1H3
064	601	Graeka	4.6	12	70	4.K	1.3	91	H1H3
065	7990	Friedb.	4.6	12	20	1.K	4.5	90	H1H3
066	601	Friedb.	4.6	24	109	1.K	9.5	1035	H1H3
067	601	Friedb.	4.6	24	108	4.K	8.2	886	H1H3
068	601	Friedb.	4.6	24	61	1.K	13.6	830	H1H3
069	601	Friedb.	4.6	24	61	4.K	12.2	744	H1H3
070	931	Friedb.	5.6	24	156	1.K	6.5	1014	H1H3
071	931	Friedb.	5.6	24	157	4.K	6.0	942	H1H3
072	931	Friedb.	5.6	24	185	1.K	6.0	1110	H1H3
073	931	Friedb.	5.6	24	186	4.K	5.0	930	H1H3
074	931	Friedb.	5.6	24	60	4.K	15.7	942	H1H3
075	931	Friedb.	5.6	24	59	1.K	18.9	1115	H1H3
076	601	Friedb.	4.6	20	49	1.K	9.4	461	H1H3
077	601	Friedb.	4.6	20	49	4.K	8.0	392	H1H3
078	601	Friedb.	4.6	20	130	1.K	3.5	468	H1H3
079	601	Friedb.	4.6	20	130	4.K	3.1	403	H1H3
080	931	Friedb.	5.6	20	129	1.K	5.4	697	H1H3
081	931	Friedb.	5.6	20	128	4.K	4.8	614.4	H1H3
082	931	Friedb.	5.6	20	129	6.K	4.5	580.5	H1H3
083	931	Friedb.	5.6	20	130	8.K	4.2	546	H1H3
084	931	Friedb.	5.6	20	80	1.K	9.0	720	H1H3
085	931	Friedb.	5.6	20	78	4.K	8.1	631	H1H3
086	931	Friedb.	5.6	20	48	1.K	13.0	624	H1H3
087	931	Friedb.	5.6	20	49	4.K	11.7	573	H1H3
088	931	Friedb.	5.6	12	21	1.K	6.3	132	H1H3
089	931	Friedb.	5.6	12	44	1.K	3.1	136	H1H3
090	7990	Fuchs	5.6	24	102	1.K	8.8	898	H2H4

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschm.

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _v *	Bemerk.
				[mm]	[mm]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellerverfahren
091	7990	Fuchs	5.6	24	100	4.K	7.8	780	H2/H4
092	7990	Fuchs	5.6	24	60	4.K	13.8	828	H2/H4
093	7990	Fuchs	5.6	24	58	1.K	16.3	945	H2/H4
094	7990	Fuchs	4.6	24	60	1.K	15.7	942	H2/H4
095	6914	Friedb.	10.9	12	42.5	1.K	6.8	288	H1/H3
096	6914	Friedb.	10.9	12	42.5	4.K	5.4	230	H1/H3
097	6914	Friedb.	10.9	12	19	1.K	15.5	285	H1/H3
098	6914	Friedb.	10.9	12	20.5	4.K	11.0	225	H1/H3
099	6914	Friedb.	10.9	12	21	5.K	10.2	214	H1/H3
100	6914	Friedb.	10.9	12	20.5	6.K	10.5	215	H1/H3
101	6914	Friedb.	10.9	12	71	1.K	4.0	284	H1/H3
102	6914	Friedb.	10.9	12	71.5	4.K	3.0	214.5	H1/H3
103	6914	Friedb.	10.9	12	72.5	5.K	3.0	217.5	H1/H3
104	6914	Friedb.	10.9	12	71	6.K	2.9	206	H1/H3
105	6914	Friedb.	10.9	20	72	1.K	16.5	1188	H1/H3
106	6914	Friedb.	10.9	20	74	4.K	14.5	1073	H1/H3
107	931	Friedb.	10.9	20	129	1.K	10.7	1380	H1/H3
108	931	Friedb.	10.9	20	130	4.K	9.1	1183	H1/H3
109	6914	Friedb.	10.9	24	58	1.K	40.1	2326	H1/H3
110	6914	Friedb.	10.9	24	58	4.K	35.4	2053	H1/H3
111	6914	Friedb.	10.9	24	118	1.K	20.6	2431	H1/H3
112	6914	Friedb.	10.9	24	119	4.K	17.7	2106	H1/H3
113	6914	Friedb.	10.9	24	32	1.K			H1/H3
114	6914	Peiner	10.9	12	17	1.K	18.4	313	H1/H3
115	6914	Peiner	10.9	12	18	4.K	13.5	243	H1/H3
116	6914	Peiner	10.9	12	42	1.K	6.5	273	H1/H3
117	6914	Peiner	10.9	12	43	4.K	5.5	237	H1/H3
118	6914	Peiner	10.9	12	62	1.K	4.4	273	H1/H3
119	6914	Peiner	10.9	12	62	4.K	3.8	236	H1/H3
120	6914	Peiner	10.9	12	20	1.K	12.8	256	H1/H3

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewindegerollt
H4 = Gewindegeschm.

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _v *	Bemerk.
				[mm]	[mm]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellverf.wr.
121	6914	Peiner	10.9	12	22	6.K	10.1	222	H1/H3
122	6914	Peiner	10.9	12	20	8.K	12.0	240	H1/H3
123	6914	Peiner	10.9	12	10	1.K	22.8	228	H1/H3
124	6914	Peiner	10.9	12	9	4.K	22.6	203	H1/H3
125	6914	Peiner	10.9	12	9	6.K	25.9	233	H1/H3
126	6914	Friedb.	10.9	12	10	6.K	18.9	189	H1/H3
127	6914	Friedb.	10.9	12	9	1.K	26.1	235	H1/H3
128	6914	Peiner	10.9	24	143	1.K			H1/H3
129	6914	Peiner	10.9	24	143	4.K			H1/H3
130	6914	Peiner	10.9	24	49	1.K	43.9	2151	H1/H3
131	6914	Peiner	10.9	24	48	4.K	40.0	1920	H1/H3
132	6914	Peiner	10.9	24	33	1.K			H1/H3
133	931	Friedb.	5.6	24	33	1.K	35.0	1155	H1/H3
134	931	Friedb.	5.6	24	29	7.K	32.1	931	H1/H3
135	6914	Peiner	10.9	24	145	1.K	16.5	2392	H1/H3
136	931	Friedb.	5.6	12	15	4.K	7.2	108	H1/H3
137	7990	Fuchs	5.6	12	9	1.K	9.9	89	H2/H4
138	931	Friedb.	5.6	20	19	1.K	37.4	711	H1/H3
139	931	Friedb.	10.9	20	21	1.K	63.0	1323	H1/H3
140	931	Friedb.	10.9	20	51	1.K	28.0	1428	H1/H3
141	931	Friedb.	10.9	20	50	4.K	24.8	1240	H1/H3
142	931	Friedb.	10.9	20	52	8.K	24.6	1212	H1/H3
143	6914	Peiner	10.9	20	61	1.K	22.6	1379	H1/H3
144	6914	Peiner	10.9	20	60	4.K	20.6	1236	H1/H3
145	6914	Peiner	10.9	20	120	1.K	11.3	1356	H1/H3
146	6914	Peiner	10.9	20	120	4.K	9.8	1176	H1/H3
147	6914	Peiner	10.9	20	37	1.K	34.8	1278	H1/H3
148	6914	Peiner	10.9	20	36	6.K	33.3	1199	H1/H3
149	6914	Peiner	10.9	20	17	4.K	62.9	1069	H1/H3
150	6914	Peiner	10.9	20	20	1.K	60.0	1200	H1/H3

H1 = Kaltformun

H2 = Warmformun

H3 = Gewinde ge

H4 = Gewinde st

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _v *	Bemerk.
				[mm]	[mm,°]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellverfahren
151	7990	Fuchs	5.6	24	65,2/30°	1.K	14.5	945	H2IH4
152	7990	Fuchs	5.6	12	18.4/30°	1.K			H2IH4
153	7990	Fuchs	5.6	12	18.4/30°	1.K	6.8	125.2	H2IH4
154	7990	Fuchs	4.6	12	18.4/30°	1.K	5.25	96.6	H1IH3
155	7990	Fuchs	4.6	12	17.6/30°	4.K	4.5	79.4	H1IH3
156	7990	Fuchs	4.6	12	29.1/30°	1.K	3.9	113.6	H1IH3
157	7990	Fuchs	4.6	12	29.1/30°	4.K	2.85	83.0	H1IH3
158									
159									
160	7990	Fuchs	4.6	12	51.3/30°	1.K	2.3	118.1	H1IH3
161	7990	Fuchs	4.6	12	50.6/30°	4.K	1.8	91.0	H1IH3
162	7990	Fuchs	5.6	12	52.1/30°	1.K	2.0	104.2	H2IH4
163	7990	Fuchs	5.6	12	53.6/30°	4.K	1.9	101.9	H2IH4
164	7990	Fuchs	5.6	12	27.6/30°	1.K	4.1	113.2	H2IH4
165	7990	Fuchs	5.6	12	27.6/30°	4.K	3.8	104.9	H2IH4
166	7990	Fuchs	4.6	12	26.5/60°	1.K	3.4	90.1	H1IH3
167	7990	Fuchs	4.6	12	26.2/60°	4.K	3.0	78.5	H1IH3
168	7990	Fuchs	5.6	12	26.2/60°	1.K	3.2	83.7	H2IH4
169	7990	Fuchs	5.6	12	25.8/60°	4.K	2.75	71.0	H2IH4
170	7990	Friedb.	4.6	12	27.6/30°	1.K	3.75	103.5	H1IH3
171	931	Friedb.	5.6	12	26.8/30°	1.K	5.5	147.6	H1IH3
172	601	Friedb.	4.6	12	48.3/30°	1.K	2.5	120.7	H1IH3
173	601	Friedb.	4.6	12	49.0/30°	8.K	1.8	88.3	H1IH3
174	931	Friedb.	5.6	12	59.3/30°	1.K	2.3	118.1	H1IH3
175	7990	Friedb.	4.6	12	18.4/30°	1.K	5.6	103.1	H1IH3
176	931	Friedb.	5.6	12	17.6/30°	1.K	7.0	123.5	H1IH3
177	931	Friedb.	5.6	12	16.9/30°	8.K	6.2	104.6	H1IH3
178	601	Friedb.	4.6	12	27.2/60°	1.K	4.1	111.5	H1IH3
179	931	Friedb.	5.6	12	27.5/60°	1.K	3.25	89.5	H1IH3
180	6914	Friedb.	10.9	12	25.5/60°	1.K	8.6	219.1	H1IH3

H1 = Kälteformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschnitten

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D	Exz.	Einschr.- tiefe	F*	M _v *	Bemerk.
				[mm]	[mm,°]	[Kerbe]	[kN]	[Nm]	Herstellerverfahren
181	6914	Friedb.	10.9	12	58/60°	4.K	6.6	168.1	H1H3
182	6914	Friedb.	10.9	12	58/60°	6.K	6.6	168.1	H1H3
183	6914	Friedb.	10.9	12	60/60°	8.K	6.4	167.4	H1H3
184	6914	Peiner	10.9	12	56/60°	1.K	8.4	208.3	H1H3
185	6914	Peiner	10.9	12	57/60°	6.K	7.0	175.9	H1H3
186	6914	Peiner	10.9	12	57/60°	8.K	6.7	168.4	H1H3
187	6914	Friedb.	10.9	12	58/30°	1.K	5.8	280.0	H1H3
188	6914	Friedb.	10.9	12	59/30°	4.K	4.0	196.2	H1H3
189	6914	Friedb.	10.9	12	61/30°	6.K	4.0	202.3	H1H3
190	6914	Friedb.	10.9	12	60/30°	8.K	4.1	204.2	H1H3
191	6914	Peiner	10.9	12	62/30°	1.K	4.7	241.3	H1H3
192	6914	Peiner	10.9	12	62/30°	6.K	4.15	213.1	H1H3
193	6914	Peiner	10.9	12	30/30°	1.K	10.0	268.3	H1H3
194	6914	Friedb.	10.9	12	30/30°	1.K	9.6	257.6	H1H3
195	6914	Friedb.	10.9	12	18/30°	1.K	12.9	227.6	H1H3
196	6914	Friedb.	10.9	12	18/30°	4.K	13.3	234.6	H1H3
197	6914	Peiner	10.9	12	18/30°	1.K	15.8	278.7	H1H3
198	6914	Peiner	10.9	12	18/30°	6.K	11.9	209.9	H1H3
199	7990	Fuchs	4.6	20	105/30°	1.K	6.3	547.1	H2H4
200	7990	Fuchs	4.6	20	105/30°	4.K	5.5	477.7	H2H4
201	7990	Fuchs	4.6	20	106/30°	6.K	5.0	438.1	H2H4
202	7990	Fuchs	4.6	20	43/30°	1.K	14.5	570.7	H1H3
203	7990	Fuchs	5.6	20	42/30°	1.K	16.6	640.6	H2H4
204	7990	Fuchs	5.6	20	24/30°	1.K	21.9	543.2	H2H4
205	7990	Fuchs	4.6	20	25/30°	1.K	18.3	467.9	H1H3
206	7990	Fuchs	4.6	20	63/60°	1.K	13.3	411.6	H2H4
207	7990	Fuchs	4.6	20	64/60°	4.K	11.0	344.2	H2H4
208	7990	Fuchs	4.6	20	68/60°	6.K	9.6	313.5	H2H4
209	7990	Fuchs	4.6	20	103/60°	1.K	10.2	455.2	H2H4
210	931	Friedb.	5.6	20	124/60°	1.K	11.7	606.2	H1H3

H1 = Kaltformung

H2 = Warmformung

H3 = Gewinde gestülpt

H4 = Gewinde geschliffen

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm,°]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M* [Nm]	Bemerk. Herstellverfahren
211	931	Friedb.	5.6	20	123/60°	8.K	9.7	499.2	H1H3
212	931	Friedb.	5.6	20	61/60°	1.K	16.9	511.4	H1H3
213	931	Friedb.	5.6	20	59/60°	6.K	14.3	423.0	H1H3
214	931	Friedb.	5.6	20	60/60°	8.K	13.5	403.9	H1H3
215	601	Friedb.	4.6	20	63/60°	1.K	11.4	352.8	H1H3
216	931	Friedb.	5.6	20	104/30°	1.K	8.7	748.9	H1H3
217	931	Friedb.	5.6	20	99/30°	6.K	7.5	616.9	H1H3
218	931	Friedb.	5.6	20	101/30°	8.K	7.0	586.5	H1H3
219	601	Friedb.	4.6	20	100/30°	1.K	6.2	514.7	H1H3
220	601	Friedb.	4.6	20	98/30°	6.K	5.2	423.7	H1H3
221	931	Friedb.	10.9	20	100/30°	1.K			H1H3
222	931	Friedb.	10.9	20	101/30°	6.K	14.2	1190	H1H3
223	931	Friedb.	10.9	20	101/30°	1.K	16.8	1408	H1H3
224	6914	Peiner	10.9	20	100/30°	1.K	16.7	1386	H1H3
225	6914	Peiner	10.9	20	100/30°	6.K			H1H3
226	6914	Peiner	10.9	20	101/30°	8.K	13.0	1089	H1H3
227	931	Friedb.	5.6	20	43/30°	1.K	17.7	696.6	H1H3
228	931	Friedb.	5.6	20	45/30°	6.K	14.3	584.7	H1H3
229	931	Friedb.	10.9	20	43/30°	1.K	33.1	1302	H1H3
230	931	Friedb.	10.9	20	46/30°	6.K	26.7	1112	H1H3
231	6914	Peiner	10.9	20	43/30°	1.K	35.8	1409	H1H3
232	6914	Peiner	10.9	20	42/30°	6.K	30.7	1185	H1H3
233	931	Friedb.	5.6	20	23/30°	1.K	25.7	617.8	H1H3
234	931	Friedb.	5.6	20	25/30°	6.K	23.3	595.8	H1H3
235	931	Friedb.	5.6	20	24/30°	8.K	21.2	525.8	H1H3
236	931	Friedb.	10.9	20	24/30°	1.K	44.2	1096	H1H3
237	931	Friedb.	10.9	20	24/30°	6.K	40.9	1014	H1H3
238	6914	Peiner	10.9	20	22/30°	1.K			H1H3
239	6914	Peiner	10.9	20	23/30°	1.K	51.3	1233	H1H3
240	6914	Peiner	10.9	20	23/30°	6.K	47.1	1132	H1H3

H1= Kaltformung
H2= Warmformung
H3= Gewindegeroll
H4= Gewindegeschn

Versuch	Din	Herst.	Festigk. klasse	D [mm]	Exz. [mm,°]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bemerk. Herstellerverfahren
241	6914	Peiner	10.9	20	23/30°	8.K	46.4	1115	H1H3
242	6914	Friedb.	10.9	20	60/60°	1.K	34.3	1027	H1H3
243	6914	Friedb.	10.9	20	63/45°	6.K	23.9	1059	H1H3
244	6914	Peiner	10.9	20	64/45°	1.K	27.1	1217	H1H3
245	6914	Peiner	10.9	20	64/45°	6.K	24.2	1087	H1H3
246	6914	Peiner	10.9	20	62/60°	6.K	28.2	863.0	H1H3
247	6914	Peiner	10.9	20	60/60°	1.K	32.4	969.4	H1H3
248	6914	Friedb.	10.9	20	58/60°	6.K	30.5	891.7	H1H3
249	6914	Peiner	10.9	20	121/60°	1.K	23.3	1183.2	H1H3
250	931	Friedb.	10.9	20	123/60°	1.K	23.6	1215	H1H3
251	6914	Friedb.	10.9	20	117/60°	6.K	19.6	968.5	H1H3
252	7990	Fuchs	4.6	24	60/30°	1.K	18.9	1014	H2H4
253	7990	Fuchs	4.6	24	26/30°	1.K	30.8	850.7	H2H4
254	7990	Fuchs	4.6	24	30/30°	6.K	27.6	846.9	H2H4
255	7990	Fuchs	5.6	24	64/60°	1.K	19.8	656.7	H2H4
256	7990	Fuchs	5.6	24	64/60°	5.K	18.0	597.0	H2H4
257	931	Friedb.	5.6	24	61/60°	1.K	23.5	755.3	H1H3
258	931	Friedb.	5.6	24	58/60°	10.K	21.2	659.7	H1H3
259	6914	Friedb.	10.9	24	61/60°	6.K	45.6	1466	H1H3
260	6914	Friedb.	10.9	24	61/60°	1.K	52.6	1691	H1H3
261	6914	Peiner	10.9	24	62/60°	1.K	51.2	1663	H1H3
262	6914	Peiner	10.9	24	61/60°	5.K	46.0	1478	H1H3
263	6914	Friedb.	10.9	24	116/60°	1.K	42.6	2170	H1H3
264	6914	Friedb.	10.9	24	115/60°	10.K	33.6	1700	H1H3
265	6914	Peiner	10.9	24	117/30°	1.K	25.6	2492	H1H3
266	6914	Peiner	10.9	24	117/30°	6.K	20.6	2005	H1H3
267	931	Friedb.	10.9	24	117/30°	1.K	26.3	2560	H1H3
268	931	Friedb.	10.9	24	114/30°	10.K	20.4	1939	H1H3
269	931	Friedb.	5.6	24	120/30°	1.K	11.4	1136	H1H3
270	931	Friedb.	5.6	24	120/30°	5.K	9.8	976.3	H1H3

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gefüllt
H4 = Gewinde geschliffen

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm,°]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bem. Herstellverfah
271	931	Friedb.	5.6	24	124/30°	10.K	8.3	852.3	H1H3
272	931	Friedb.	5.6	24	130/30°	15.K	8.0	858.3	H1H3
273	931	Friedb.	4.6	24	61/30°	1.K	22.1	1202	H1H3
274	931	Friedb.	5.6	24	61/30°	1.K	20.3	1105	H1H3
275	931	Friedb.	5.6	24	64/30°	6.K	16.2	919	H1H3
276	931	Friedb.	5.6	24	65/30°	10.K	15.5	891.2	H1H3
277	931	Friedb.	5.6	24	60/30°	15.K	16.2	869.4	H1H3
278	931	Friedb.	10.9	24	62/30°	1.K	41.2	2274	H1H3
279	931	Friedb.	4.6	24	34/30°	1.K	25.2	850.4	H1H3
280	931	Friedb.	4.6	24	35/30°	5.K	23.7	818.0	H1H3
281	931	Friedb.	5.6	24	32/30°	1.K	28.4	914.9	H1H3
282	931	Friedb.	5.6	24	33/30°	6.K	27.4	903.7	H1H3
283	931	Friedb.	5.6	24	34/30°	10.K	26.6	897.7	H1H3
284	6914	Friedb.	10.9	24	30/30°	5.K	65.0	1994	H1H3
285	6914	Peiner	10.9	24	32/30°	5.K	61.3	1975	H1H3
286	6914	Peiner	10.9	24	31/30°	1.K	71.5	2249	H1H3
287	6914	Friedb.	10.9	24	32/30°	1.K	70.8	2281	H1H3
288	931	Friedb.	5.6	12	60	Schaft	2.54	152	H1H3
289	931	Friedb.	5.6	12	65	Schaft	2.35	153	H1H3
290	931	Friedb.	5.6	12	70	Schaft	2.10	147	H1H3
291	601	Graeka	4.6	12	61	Schaft	2.65	162	H1H3
292	601	Graeka	4.6	12	51	Schaft	3.10	158	H1H3
293	7990	Fuchs	4.6	12	33	Schaft	3.70	122	H1H3
294	7990	Fuchs	4.6	12	47	Schaft	3.00	141	H1H3
295	7990	Fuchs	4.6	12	31	Schaft	4.08	126	H1H3
296	7990	Fuchs	5.6	12	33	Schaft	3.75	124	H2H4
297	7990	Fuchs	5.6	12	30	Schaft	4.25	127	H2H4
298	7990	Fuchs	5.6	12	34	Schaft	3.7	126	H2H4
299	6914	Friedb.	10.9	12	19	Schaft	17.1	325	H1H3
300	6914	Friedb.	10.9	12	41	Schaft	8.2	336	H1H3

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschmitten

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bem. Herstellverfahren
301	6914	Friedb.	10.9	12	40	Schaft	8.3	332	H1H3
302	6914	Peiner	10.9	12	19	Schaft	14.9	283	H1H3
303	6914	Peiner	10.9	12	20	Schaft	14.2	284	H1H3
304	6914	Peiner	10.9	12	33	Schaft	9.5	313	H1H3
305	6914	Peiner	10.9	12	33	Schaft	8.75	289	H1H3
306	7990	Fuchs	4.6	20	59	Schaft	9.65	569	H2H4
307	7990	Fuchs	4.6	20	83	Schaft	6.5	540	H2H4
308	7990	Fuchs	4.6	20	58	Schaft	9.5	551	H2H4
309	601	Friedb.	4.6	20	29	Schaft			H1H3
310	601	Friedb.	4.6	20	38	Schaft	14.6	555	H1H3
311	601	Friedb.	4.6	20	70	Schaft	8.05	564	H1H3
312	601	Friedb.	4.6	20	99	Schaft	5.55	549	H1H3
313	931	Friedb.	5.6	20	95	Schaft	8.5	808	H1H3
314	931	Friedb.	5.6	20	118	Schaft	6.75	796	H1H3
315	931	Friedb.	5.6	20	111	Schaft	7.1	788	H1H3
316	931	Friedb.	5.6	20	50	Schaft	15.6	780	H1H3
317	931	Friedb.	5.6	20	32	Schaft	23.5	790	H1H3
318	931	Friedb.	10.9	20	97	Schaft	16.0	1630	H1H3
319	931	Friedb.	10.9	20	107	Schaft	14.3	1606	H1H3
320	6914	Peiner	10.9	20	93	Schaft	17.1	1590	H1H3
321	6914	Peiner	10.9	20	71	Schaft	20.9	1484	H1H3
322	6914	Friedb.	10.9	20	35	Schaft	41.1	1532	H1H3
323	6914	Friedb.	10.9	20	32	Schaft	46.4	1559	H1H3
324	601	Friedb.	4.6	24	50	Schaft	24.4	1220	H1H3
325	601	Friedb.	4.6	24	40	Schaft	26.1	1044	H1H3
326	601	Friedb.	4.6	24	41	Schaft	31.2	1279	H1H3
327	7990	Fuchs	5.6	24	77	Schaft	12.9	993	H2H4
328	931	Friedb.	5.6	24	144	Schaft	8.5	1217	H1H3
329	931	Friedb.	5.6	24	137	Schaft	9.2	1260	H1H3
330	931	Friedb.	5.6	24	132	Schaft	9.1	1201	H1H3

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschm.

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bem. Herstellverfahren
331	7990	Fuchs	5.6	24	79	Schaft	12.75	1007	H2H4
332	7990	Fuchs	5.6	24	60	Schaft	17.1	1026	H2H4
333	931	Friedb.	5.6	24	45	Schaft	28.1	1264	H1H3
334	931	Friedb.	5.6	24	29	Schaft	42.4	1230	H1H3
335	6914	Friedb.	10.9	24	111	Schaft	23.9	2653	H1H3
336	6914	Friedb.	10.9	24	124	Schaft	22.2	2753	H1H3
337	6914	Peiner	10.9	24	81	Schaft	31.6	2560	H1H3
338	6914	Peiner	10.9	24	68	Schaft	38.0	2584	H1H3
339	6914	Friedb.	10.9	24	45	Schaft	57.5	2588	H1H3
340	6914	Friedb.	10.9	24	41	Schaft	62.0	2542	H1H3
341	6914	Peiner	10.9	24	33	Schaft	69.5	2293	H1H3
342	6914	Peiner	10.9	20	93	Schaft	17.5	1628	H1H3
343	6914	Peiner	10.9	20	74	Schaft	21.8	1613	H1H3
344	931	Peiner	8.8	12	58	1.K.	3.8	220	H1H3
345	931	Peiner	8.8	12	60	6.K.	3.0	160	H1H3
346	931	Peiner	8.8	12	57	10.K.	2.9	165	H1H3
347	931	Peiner	8.8	12	22	1.K.	8.1	178	H1H3
348	931	Peiner	8.8	12	21	6.K.	7.8	164	H1H3
349	931	Peiner	8.8	12	20	10.K.	8.0	160	H1H3
350	931	Gebi	A4-70	12	24	10.K.	7.8	187	H1H3
351	931	Gebi	A4-70	12	20	6.K.	9.3	186	H1H3
352	931	Gebi	A4-70	12	19	1.K.	11.3	215	H1H3
353	931	Gebi	A4-70	12	59	1.K.	3.5	206.5	H1H3
354	931	Gebi	A4-70	12	59	6.K.	3.32	196	H1H3
355	931	Gebi	A4-70	12	60	10.K.	3.25	195	H1H3
356	931	Gebi	A4-70	12	58	1.K.	3.5	203	H1H3
357	931	Nedur	8.8	24	77	1.K.	27.1	2087	H1H3
358	931	Nedur	8.8	24	76	6.K.	22.7	1725	H1H3
359	931	Nedur	8.8	24	73	10.K.	23.5	1715	H1H3
360	931	Nedur	8.8	24	32	1.K.	62.5	2000	H1H3

H1 = KALTformung
H2 = WARMformung
H3 = Gewinde gerollt
H4 = Gewinde geschmiedet

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bemerk. Herstellverfahren
361	931	Nedur	8.8	24	33	6.K.			H1H3
362	931	Friedb.	8.8	24	35	10.K.	42.0	1470	H1H3
363	931	PL	A4-70	20	56	1.K.	13.5	756	H1H3
364	931	Vefe	A4-70	20	56	6.K.	16.4	918	H1H3
365	931	PL	A4-70	20	55	10.K.			H1H3
366	931	Vefe	A4-70	20	21	1.K.	47.0	987	H1H3
367	931	Vefe	A4-70	20	20	6.K.	43.5	870	H1H3
368	931	Vefe	A4-70	20	20	10.K.	43.0	860	H1H3
369	931	Dorn	4.6	6	40	1.K.	0.31	12.4	H1H3
370	931	Dorn	4.6	6	40	6.K.	0.31	12.4	H1H3
371	931	Dorn	4.6	6	40	10.K.	0.29	11.6	H1H3
372	931	Dorn	4.6	6	10	1.K.	1.12	11.2	H1H3
373	931	Dorn	4.6	6	10	6.K.	0.99	9.9	H1H3
374	931	Dorn	4.6	6	10	10.K.	1.02	10.2	H1H3
375	931	Gebi	A4-70	6	39	1.K.	0.56	21.8	H1H3
376	931	Gebi	A4-70	6	38	6.K.	0.54	20.5	H1H3
377	931	Gebi	A4-70	6	38	10.K.	0.54	20.3	H1H3
378	931	Gebi	A4-70	6	11	1.K.	1.99	21.8	H1H3
379	931	Gebi	A4-70	6	11	6.K.	1.71	18.8	H1H3
380	931	Gebi	A4-70	6	12	10.K.	1.75	21.0	H1H3
381	931	3F	8.8	6	39	1.K.	0.58	22.6	H1H3
382	931	3F	8.8	6	39.5	6.K.	0.43	17.0	H1H3
383	931	3F	8.8	6	40	10.K.	0.44	17.6	H1H3
384	931	3F	8.8	6	11.5	1.K.	2.29	26.3	H1H3
385	931	3F	8.8	6	11	6.K.	1.48	16.3	H1H3
386	931	3F	8.8	6	12	10.K.	1.48	17.8	H1H3
387	931	3F	8.8	6	38	2.K.	0.58	22.04	H1H3
388	931	Dorn	4.6	6	46	Schaft	0.29	13.3	H1H3
389	931	Gebi	A4-70	6	41	Schaft	0.55	22.6	H1H3
390	931	3F	8.8	6	51	Schaft	0.60	30.6	H1H3

H1 = Kälteformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewindegeteilte
H4 = Gewindegeschliff

Versuch	Din	Herst.	Festigk.- klasse	D [mm]	Exz. [mm]	Einschr.- tiefe [Kerbe]	F* [kN]	M _v * [Nm]	Bemerk. Herstellverfahren
391	931	Nedur	8.8	24	31	6.K.	55.4	1717	H1H3
392	931	Nedur	8.8	24	31	10.K.	53.0	1643	H1H3
393	931	Nedur	8.8	24	31	6.K.	53.3	1652	H1H3
394	931	Nedur	8.8	24	60	Schaft	43.8	2628	H1H3
395	931	Gebi	A4-70	12	50	Schaft	4.1	205	H1H3
396	931	Peiner	8.8	12	45.5	Schaft	6.1	278	H1H3
397	931	Vefe	A4-70	20	43	Schaft	19.65	845	H1H3
398	931	PL	A4-70	20	49	Schaft	15.6	764	H1H3
399	931	Friedb.	5.6	30	162	1.K.	13.7	2219	H1H3
400	931	Friedb.	5.6	30	162	1.K.	14.0	2268	H1H3
401	931	Friedb.	5.6	30	162	6.K.	11.4	1847	H1H3
402	931	Friedb.	3.6	30	127	1.K.	12.0	1524	H1H3
403	931	Friedb.	3.6	30	123	6.K.	10.2	1255	H1H3
404	7990	Fuchs	4.6	30	54.5	1.K.	36.7	2000	H2H4
405	7990	Fuchs	4.6	30	57	6.K.	27.3	1556	H2H4
406	6914	Friedb.	10.9	30	130	1.K.	34.6	4498	H1H3
407	931	3F	8.8	6	50	Schaft	0.59	29.5	H1H3
408	931	3F	8.8	6	49	Schaft	0.65	31.85	H1H3
409	931	Gebi	A4-70	6	40	Schaft	0.55	22	H1H3
410	931	Gebi	A4-70	6	41	Schaft	0.54	21.5	H1H3
411	931	Dorn	4.6	6	40	6.K.	0.32	12.8	H1H3
412	931	Dorn	4.6	6	52	Schaft			H1H3
413	931	Dorn	4.6	6	50	Schaft	0.28	14.2	H1H3
414	931	Dorn	4.6	6	50	Schaft	0.25	12.7	H1H3
415	931	Gebi	A4-70	12	48	Schaft	4.3	206	H1H3
416	931	Gebi	A4-70	12	46	Schaft	4.4	202	H1H3
417	931	Peiner	8.8	12	44	Schaft	6.3	294	H1H3
418	931	Peiner	8.8	12	47	Schaft	5.8	273	H1H3
419	931	Nedur	8.8	24	55.5	Schaft	46.9	2603	H1H3

H1 = Kaltformung
H2 = Warmformung
H3 = Gewinde getollt
H4 = Gewinde geschm.

Forschende Stelle: *Institut für Stahlbau, TU Braunschweig*

Lieferdatum:

Schrauben	DIN-Norm:
	Anzahl:
	Festigkeitsklasse:
	Nenndurchmesser:
	Länge:

Hersteller

aus einer Charge	Schrauben ja: <input type="checkbox"/> nein: <input type="checkbox"/>
aus einer Wärmebehandlung	ja: <input type="checkbox"/> nein: <input type="checkbox"/>

Stahlsorte der Schrauben	Automatenstahl	<input type="checkbox"/>
	Stahl mit niedrigem C-Gehalt	<input type="checkbox"/>
	Stahl mit mittlerem C-Gehalt	<input type="checkbox"/>
	Stahl mit niedrigem C-Gehalt u. Zusätze, abgeschreckt und angelassen	<input type="checkbox"/>
	Stahl mit mittlerem C-Gehalt, abgeschreckt und angelassen	<input type="checkbox"/>
	Stahl mit mittlerem C-Gehalt und Zusätze	<input type="checkbox"/>
	legierter Stahl	<input type="checkbox"/>

Herstellungsverfahren	Spanende Formung	Schrauben	<input type="checkbox"/>
		Kaltformung	<input type="checkbox"/>
	Spanlose Formung		
		Warmformung	<input type="checkbox"/>
	Gewinde	gerollt	<input type="checkbox"/>
		geschnitten	<input type="checkbox"/>

Ergebnisse der Gütekontrolle:

Ergebnisse der Materialproben nach DIN 50125

Schraube	β_s	$\beta_{s,STAT}$	β_z	ϵ_B
Fuchs 4.6 M12/100	244	223	428	34,0
A.F.Graeka 4.6 M12/120	444	423	550	31,7
Fuchs 5.6 M12/95	303	286	548	30,3
A.Friedb. 5.6 M12/140	417	400	562	36,0
Fuchs 4.6 M20/75	289	289	457	20,0
Fuchs 4.6 M20/160	298	284	430	37,3
A.Friedb. 4.6 M20/140	293	274	400	36,0
Fuchs 5.6 M20/75	281	260	527	31,7
A.Friedb. 5.6 M20/220	440	420	625	28,8
Peiner 10.9 M20/160	1061	1023	1079	15,0
Fuchs 4.6 M24/95	298	281	439	36,7
A.Friedb. 4.6 M24/180	435	420	517	28,8
Fuchs 5.6 M24/100	364	334	597	31,7
Fuchs 5.6 M24/190	231	207	509	36,0
A.Friedb. 5.6 M24/280	413	393	556	29,5
Nedur 8.8 M24/150	867	831	966	16,4
Fuchs 4.6 M27/100	323	315	529	28,7
Fuchs 4.6 M30/100	319	285	474	34,0
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]

Ergebnisse der Materialproben (Ganzzugversuche)

Schraube	β_s	$\beta_{s,STAT}$	β_z	Bemerk.
Dorn 4.6 M6/90	322	293	388	Versagen im Schaft
	322	282	384	Versagen im Schaft
Gebi A4-70 M6/80	606	536	632	Versagen im Schaft
	587	560	625	Versagen im Schaft
3F 8.8 M6/90	845	780	845	
Fuchs(K) 4.6 M12/100	400		496	
	392	368	508	
	320	297	475	
Fuchs 5.6 M12/95	415	382	582	
Gebi A4-70 M12/120	632	591	670	Versagen im Schaft
	642	600	684	Versagen im Schaft
Peiner 8.8 M12/120	813	783	843	
Peiner 10.9 M12/75	1021	979	1032	
Peiner 10.9 M12/90	1015	979	1038	
A. Friedb. 10.9 M12/100	997	961	1009	
Fuchs 5.6 M24/190	289	284	567	
	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	

Vickershärteprüfungen

Probe Nr.	Festigkeitskl.	HV 10	
		Mitte	Rand
1	5.6	158.5	160.4
2	4.6	140	146
3	5.6	172	178
4	5.6	164	169
5	5.6	168	166
6	4.6	146	142
7	4.6	135	137
8	4.6	174	166
9	4.6	164	150
10	4.6	145	136

Die angegebenen Werte wurden als Mittel von sechs Messungen bestimmt.

Lastabfall durch Stoppen des Versuchs für 10 Min.

VersuchNr.	F^* [kN]	$F_{\text{Halt, oben}}$	$F_{\text{Halt, unten}}$	Abfall [%]
11	4,6	4,0	3,6	10,0
13	2,9	1,7	1,6	5,9
14	2,3	2,5	2,4	4,0
15	2,25	2,4	2,25	6,25
27	5,5	3,9	3,7	5,1
28	6,4	6,2	5,8	6,5
29	5,2	5,0	4,7	6,0
32	17,0	18,0	16,8	6,7
33	7,0	8,3	7,6	8,4
37	13,5	12,0	10,7	10,8
38	17,4	13,2	12,3	6,8
39	15,8	12,9	11,9	7,8
39	15,8	20,7	18,7	9,7
40	12,2	14,1	12,8	9,2
41	4,2	4,3	4,0	7,0
42	3,6	3,7	3,5	5,4
43	4,7	6,5	6,1	6,2
49	13,5	14,7	13,7	6,8
49	13,5	18,2	17,0	6,6
56	2,4	2,4	2,2	8,3
66	9,5	10,3	9,8	4,9
67	8,2	8,7	8,3	4,6
71	6,0	4,7	4,5	4,3
71	6,0	5,5	5,3	3,6
75	18,9	25,0	23,2	7,2
80	5,4	6,1	5,6	8,2

Lastabfall durch Stoppen des Versuchs für 10 Min.

VersuchNr.	F^* [kN]	$F_{\text{Halt, oben}}$	$F_{\text{Halt, unten}}$	Abfall [%]
86	13,0	19,5	18,0	7,7
91	7,8	8,9	8,3	6,7
96	5,4	5,4	5,2	3,7
98	11,0	10,0	9,5	5,0
99	10,2	9,6	9,1	5,2
100	10,5	9,6	9,2	4,2
102	3,0	2,7	2,6	3,7
105	16,5	16,0	15,5	3,0
107	10,7	5,9	5,7	3,4
107	10,7	8,5	8,3	2,4
107	10,7	10,0	9,7	3,0
108	9,1	7,6	7,4	2,6
142	23,3	22,4	21,3	4,9
146	9,8	9,8	9,5	3,1
205	18,3	13,1	12,4	5,3
205	18,3	24,1	22,8	5,4
208	46,8	50,0	47,7	4,6
239	51,3	50,7	47,7	5,9

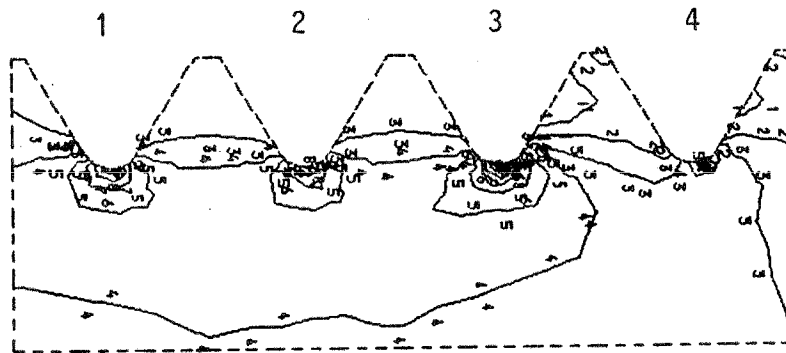
Statistische Auswertung:

Abfall: $n = 44$ $\Sigma x = 256$ $\Sigma x^2 = 1673,2$

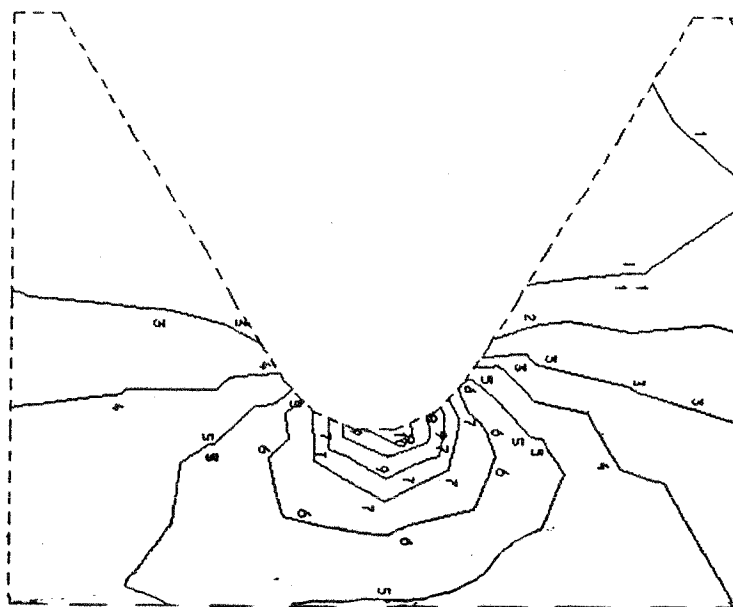
Mittelwert: $\bar{x} = 256/44 = 5,82\%$

Standardabweichung: $s = 2,07\%$

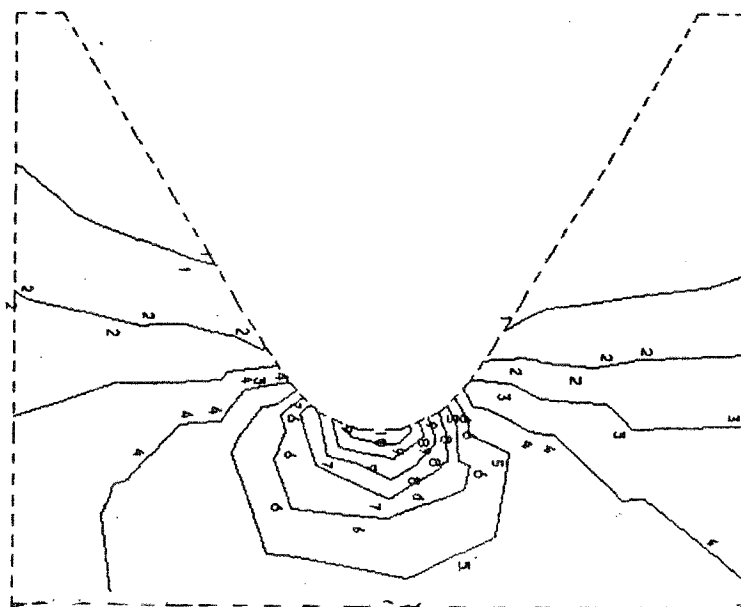
Für Normalverteilung: 5%-Fraktile bei 9,22%



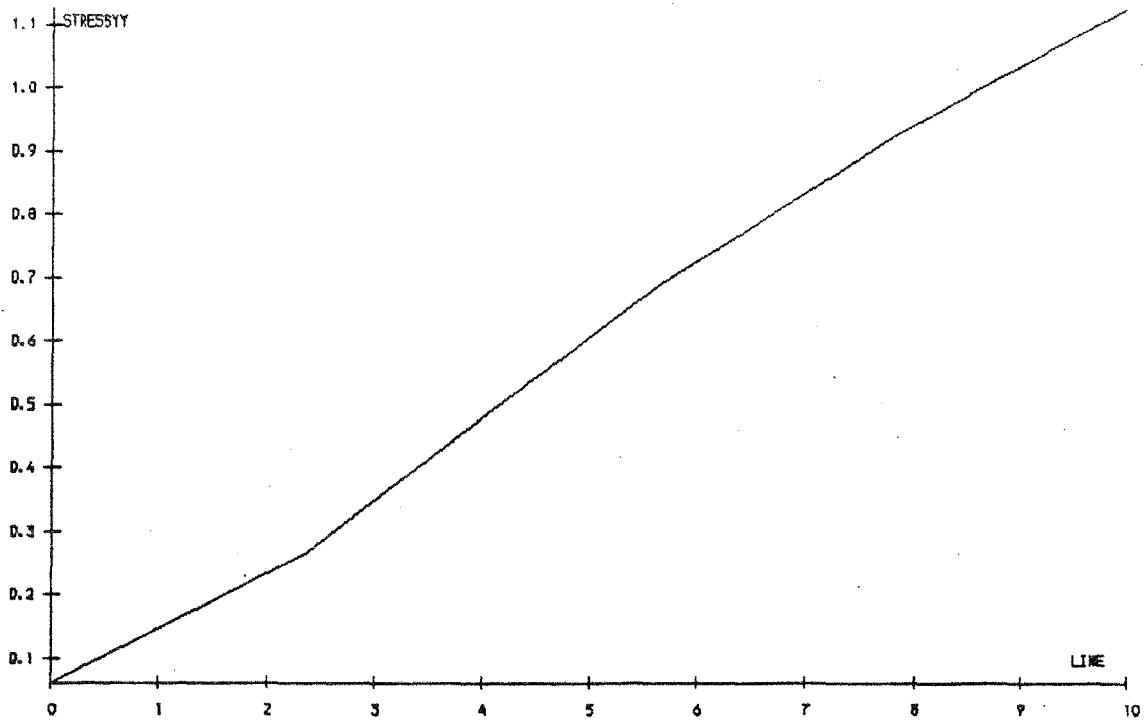
Normalspannungen σ_{yy} im Bereich der Kerben 1-4
bei Belastung der Kerben 3-5



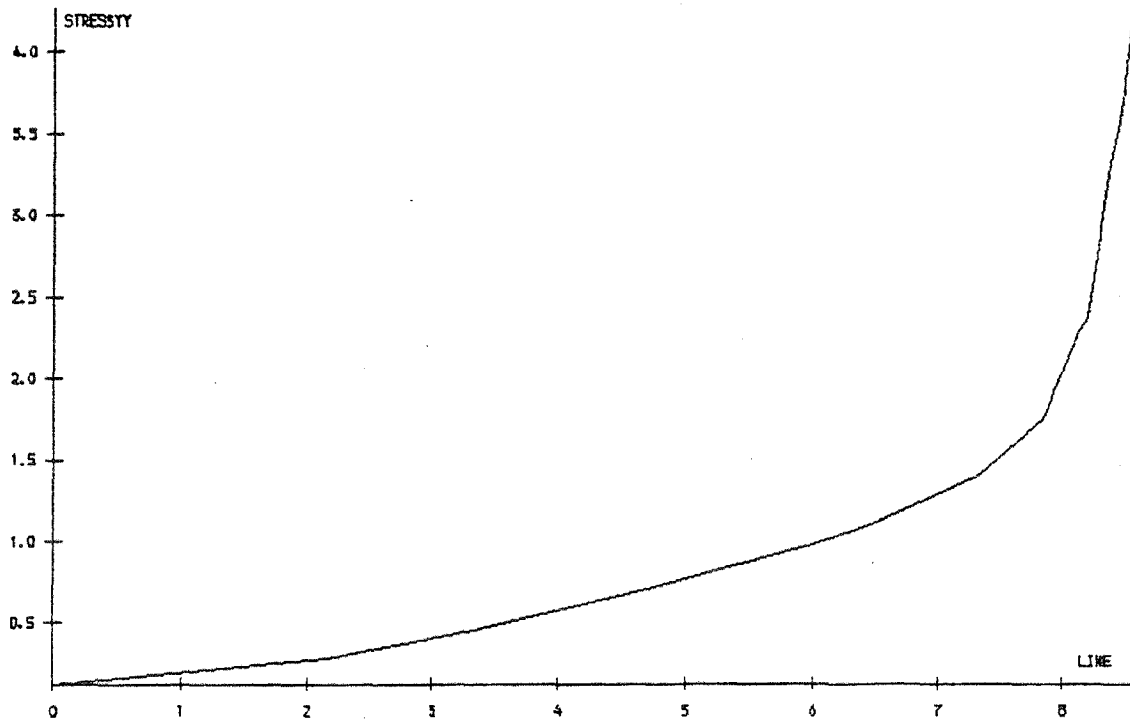
σ_{yy} in Kerbe 3 , max $\sigma_{yy} = 5.8$
Gewindeflanke belastet



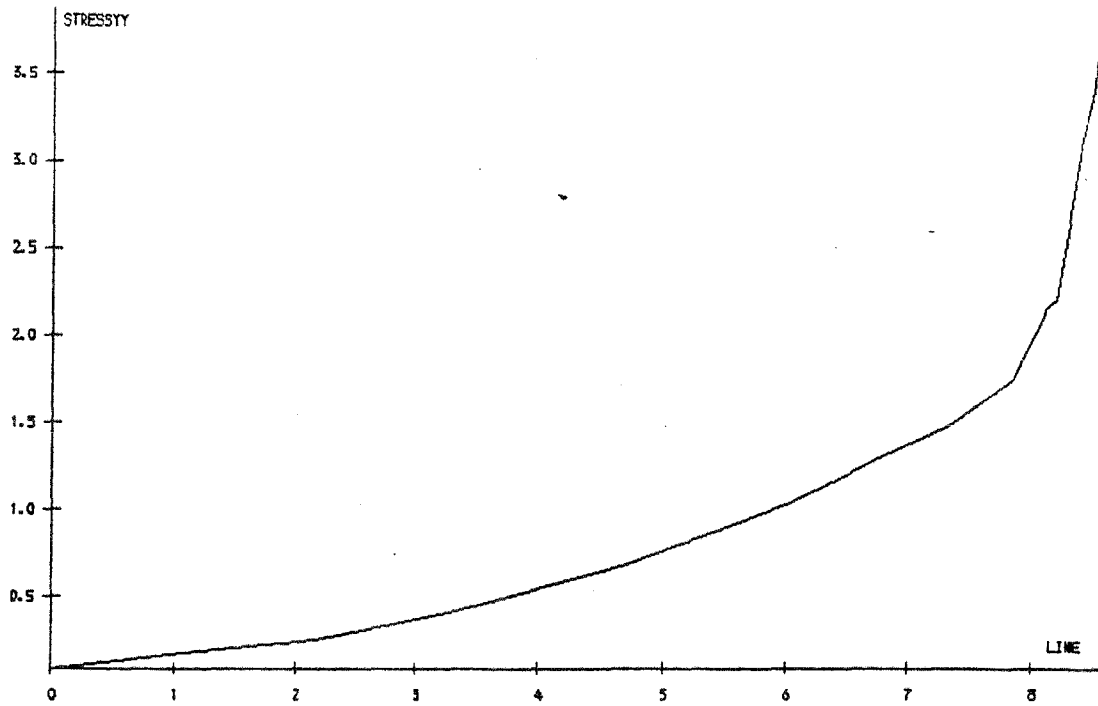
σ_{yy} in Kerbe 1 , max $\sigma_{yy} = 4.3$
Gewindeflanke unbelastet



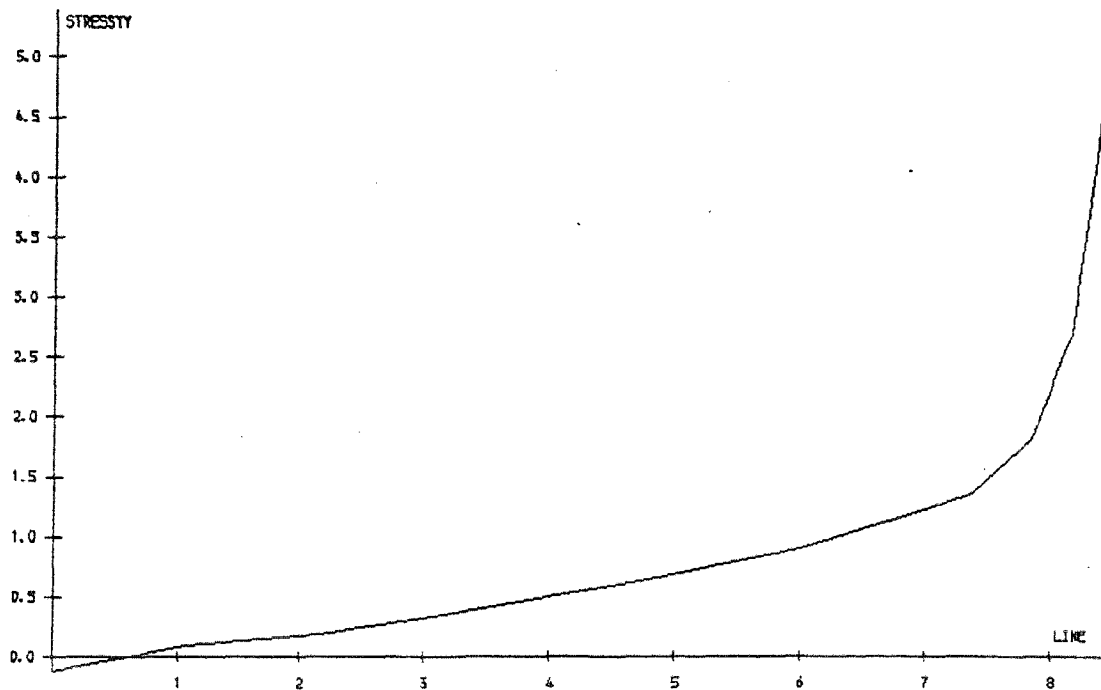
σ_{yy} im Schaft bei Belastung der Kerben 3-5



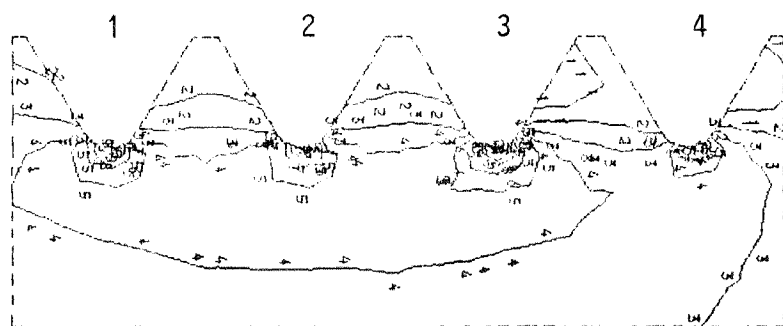
σ_{yy} in Kerbe 1 bei Belastung der Kerben 3-5



σ_{yy} in Kerbe 2 bei Belastung der Kerben 3-5



σ_{yy} in Kerbe 3 bei Belastung der Kerben 3-5

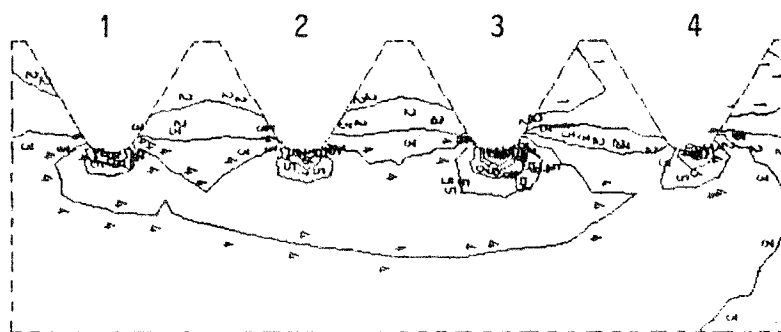


σ_{yy} in den Kerben 1-4

Belastung der Kerben 3-5

Einleitung von Zug- und Querkräften am Schaft

(simuliertes $e=10\text{cm}$)

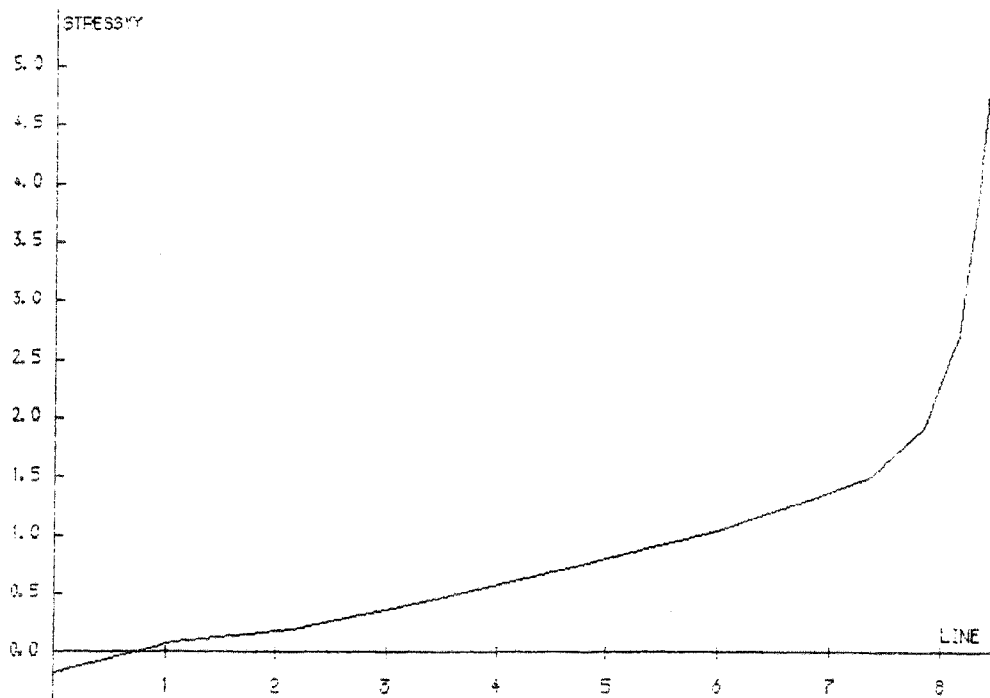
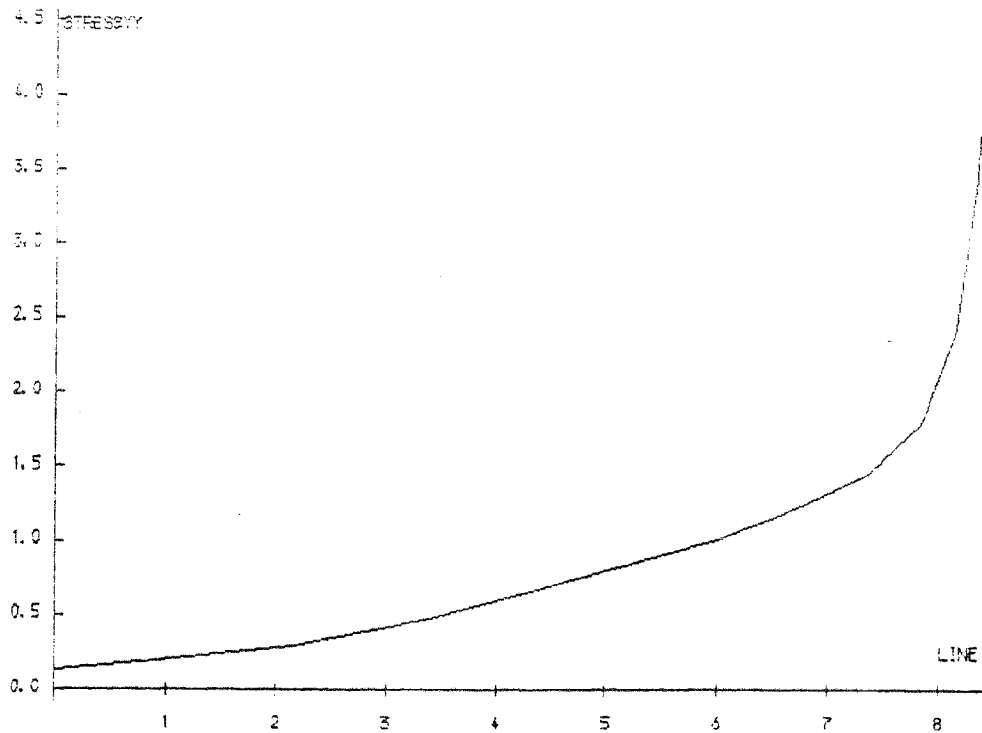


σ_{yy} in den Kerben 1-4

Belastung der Kerben 3-5

Einleitung nur von Querkräften am Schaft

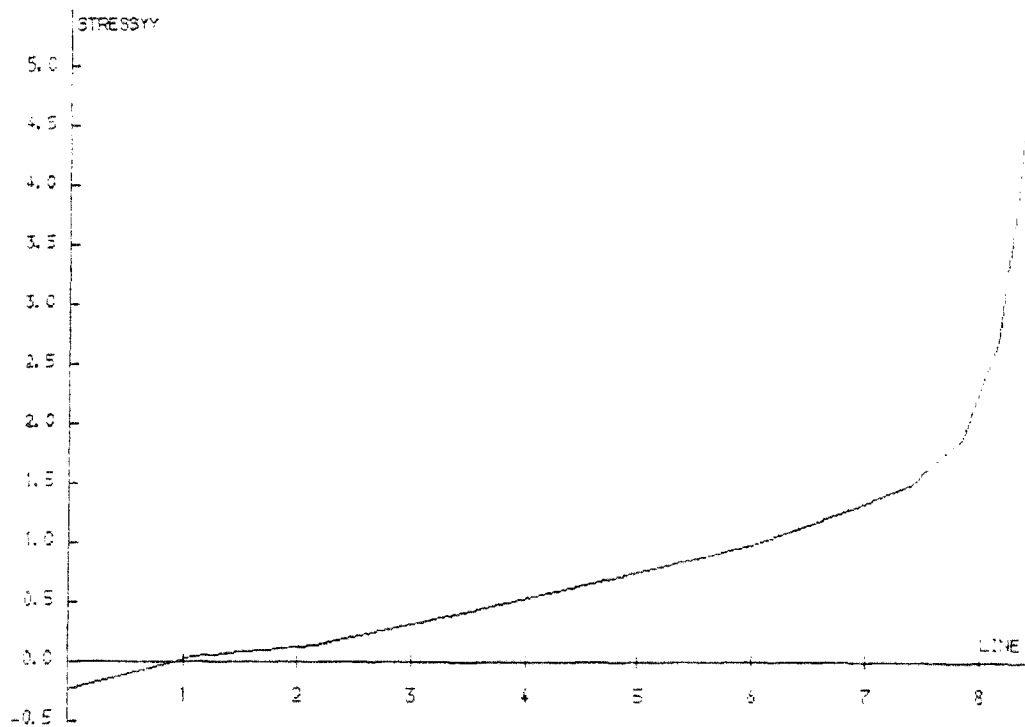
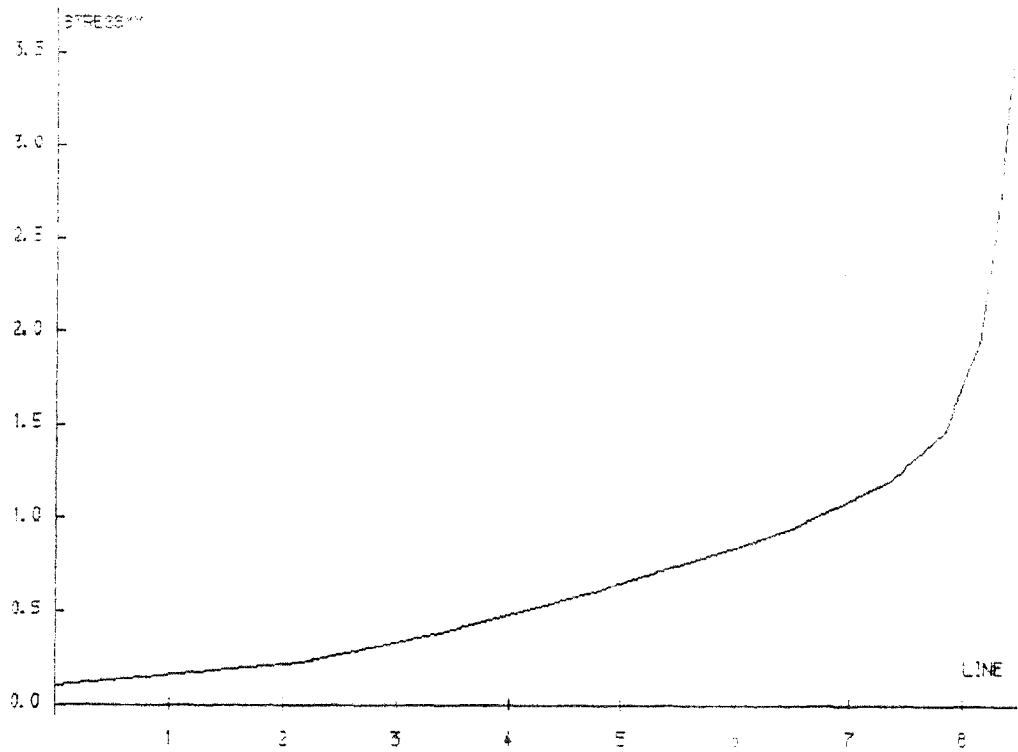
($e=2.625\text{cm}$)



σ_{yy} in Kerbe 1 (oben) und in Kerbe 3 (unten)

Belastung der Kerben 3-5

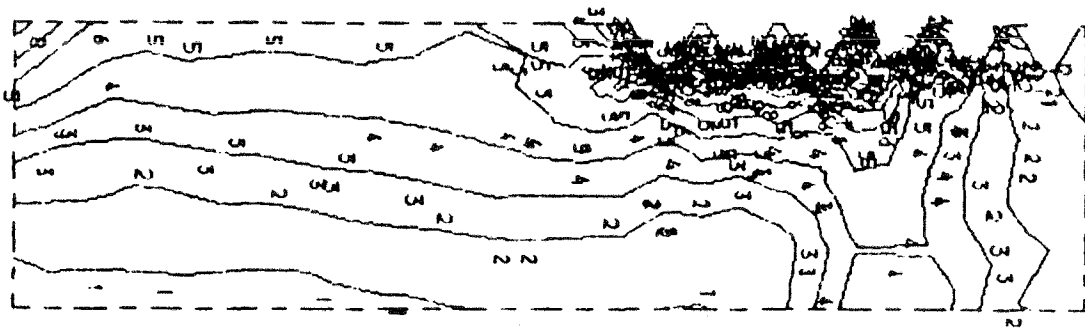
Einleitung von Zug- und Querkräften am Schaft
($e=10\text{cm}$)



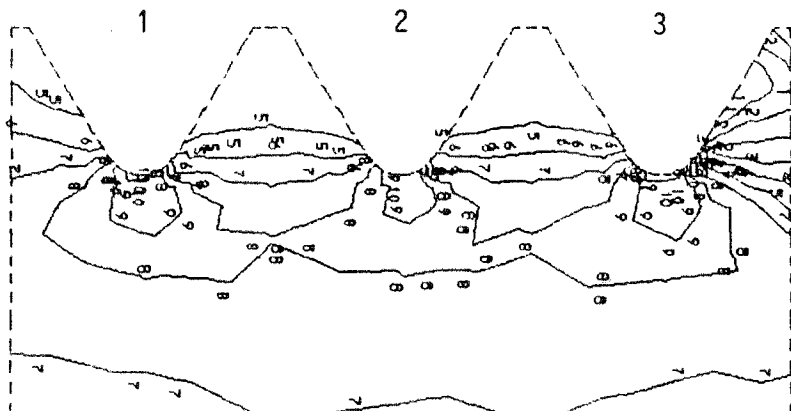
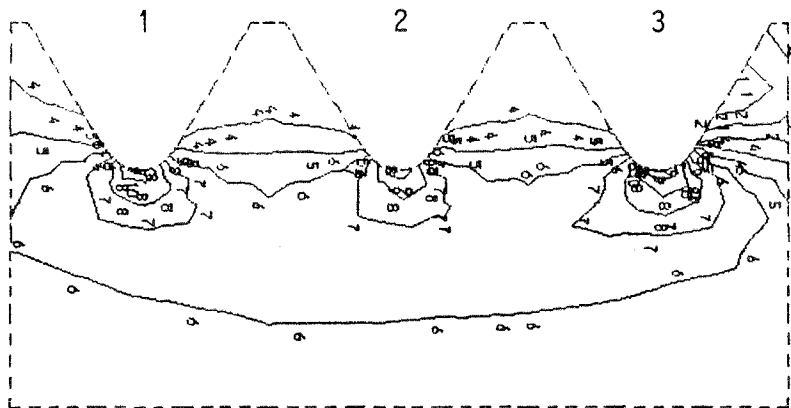
σ_{yy} in Kerbe 1 (oben) und in Kerbe 3 (unten)

Belastung der Kerben 3-5

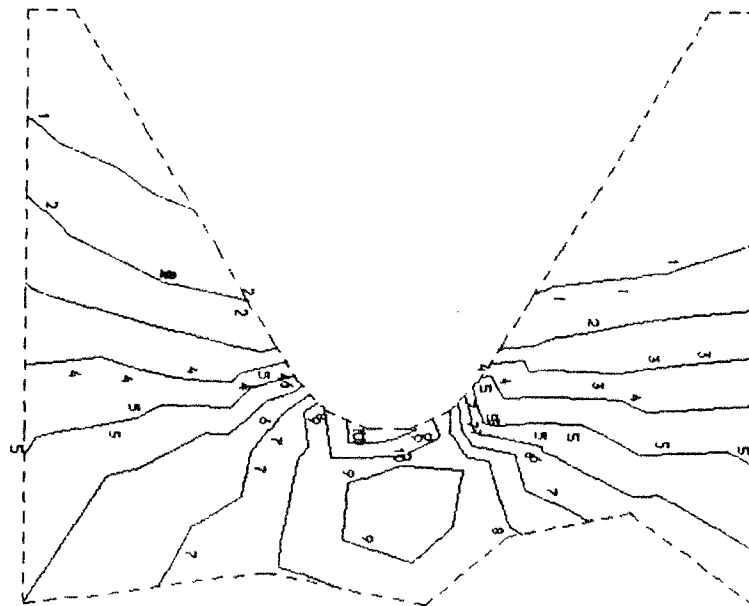
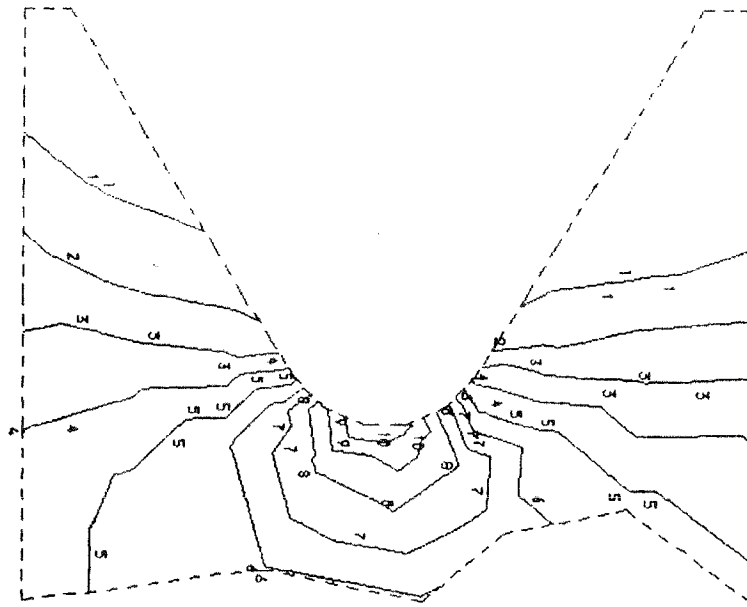
Einleitung nur von Querkräften am Schaft



Isolinien der Normalspannungen σ_{yy} (Gesamtstruktur). Hier ist der lineare Spannungsverlauf im Schaftbereich zu erkennen. Die Spannungsverteilung im Gewindebereich, hier nicht zu erkennen, ist in den folgenden Anlagen dargestellt.



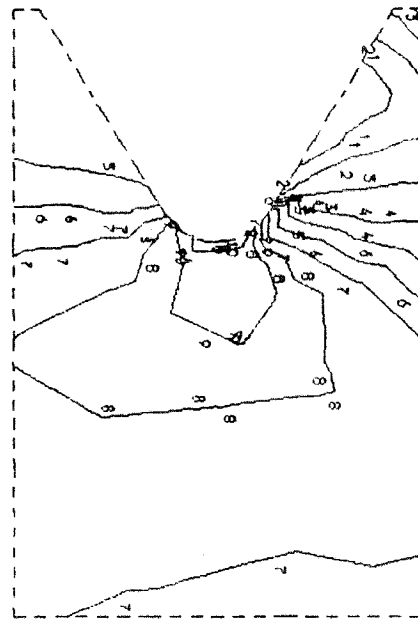
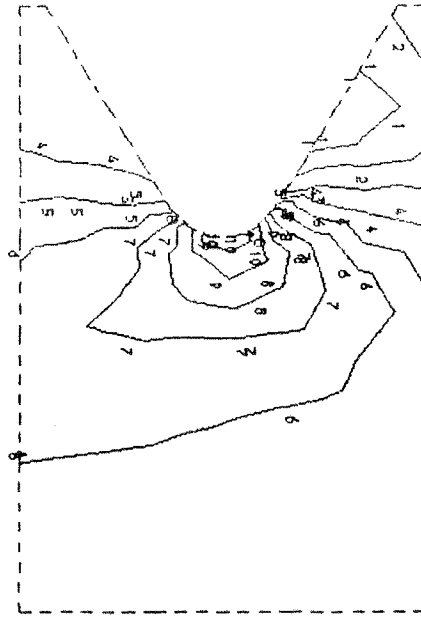
σ_{yy} im Bereich der Kerben 1-3
für die Laststufen 1.0 (oben) und 1.3 (unten)
bei Belastung der Kerben 3-5



σ_{yy} in Kerbe 1

Laststufe 1.0 (oben) und 1.3 (unten)

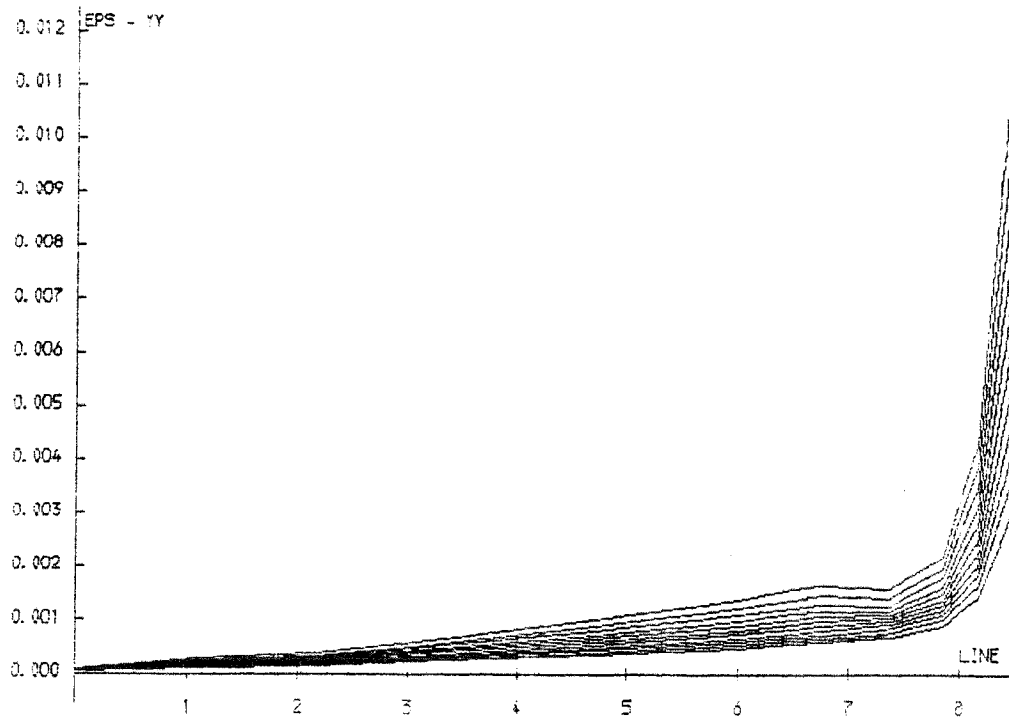
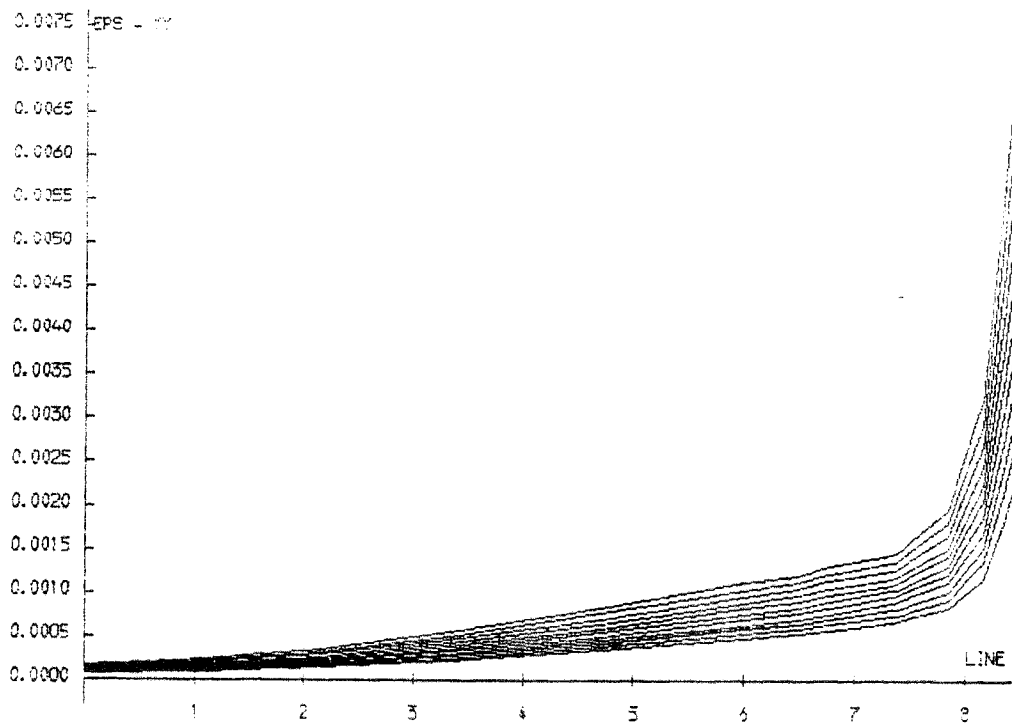
Belastung der Kerben 3-5



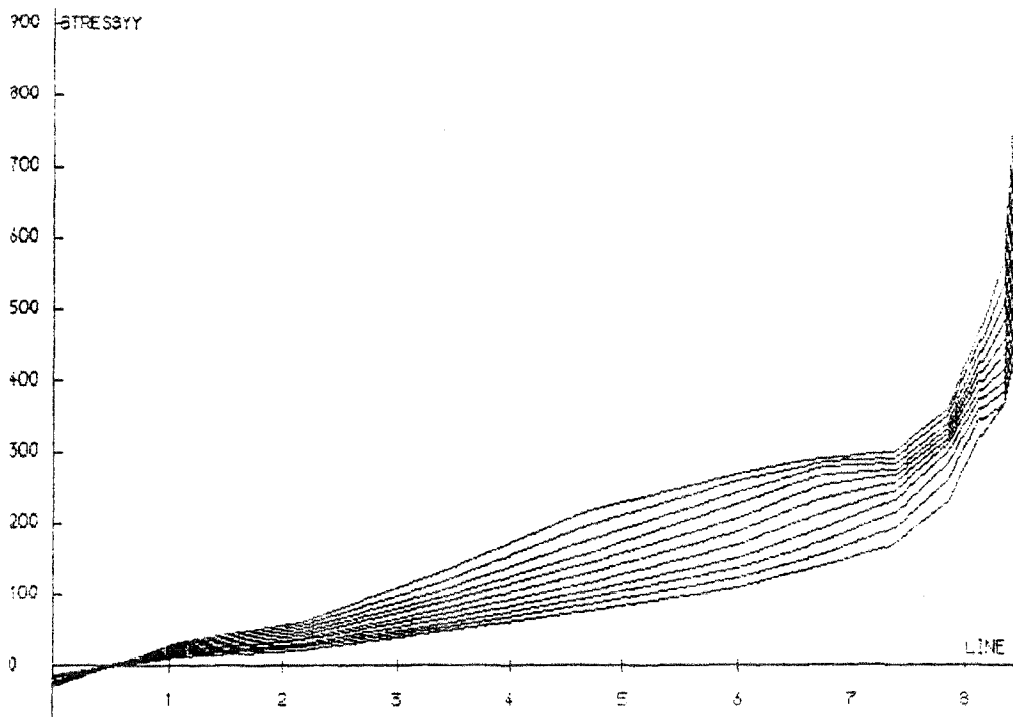
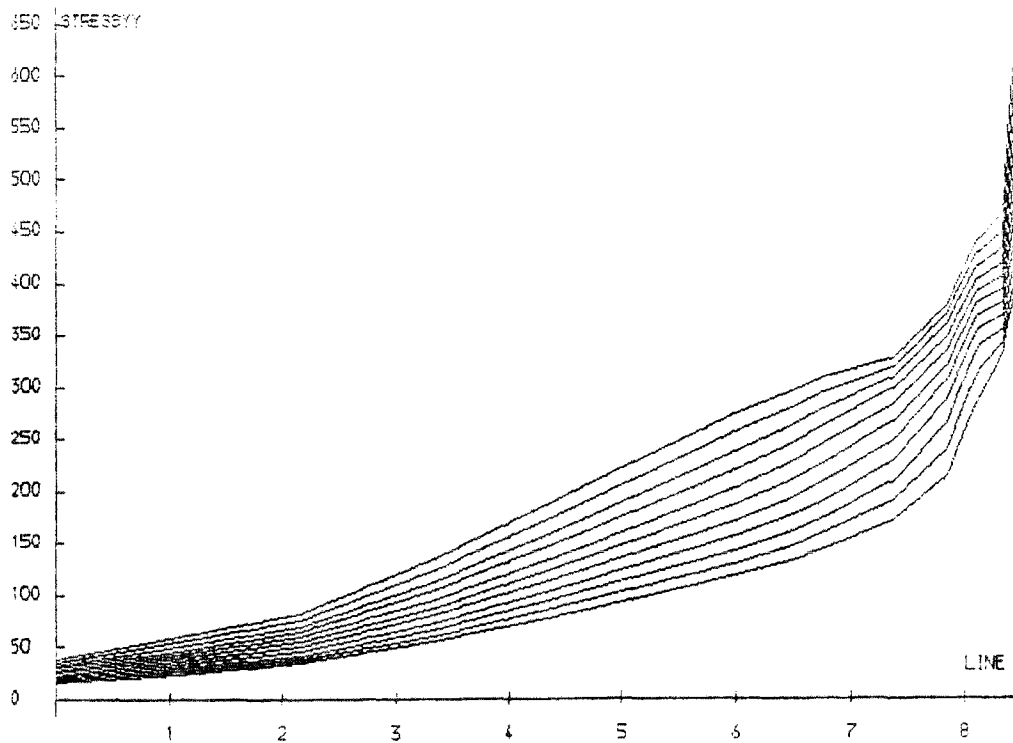
σ_{yy} in Kerbe 3

Laststufe 1.0 (oben) und 1.3 (unten)

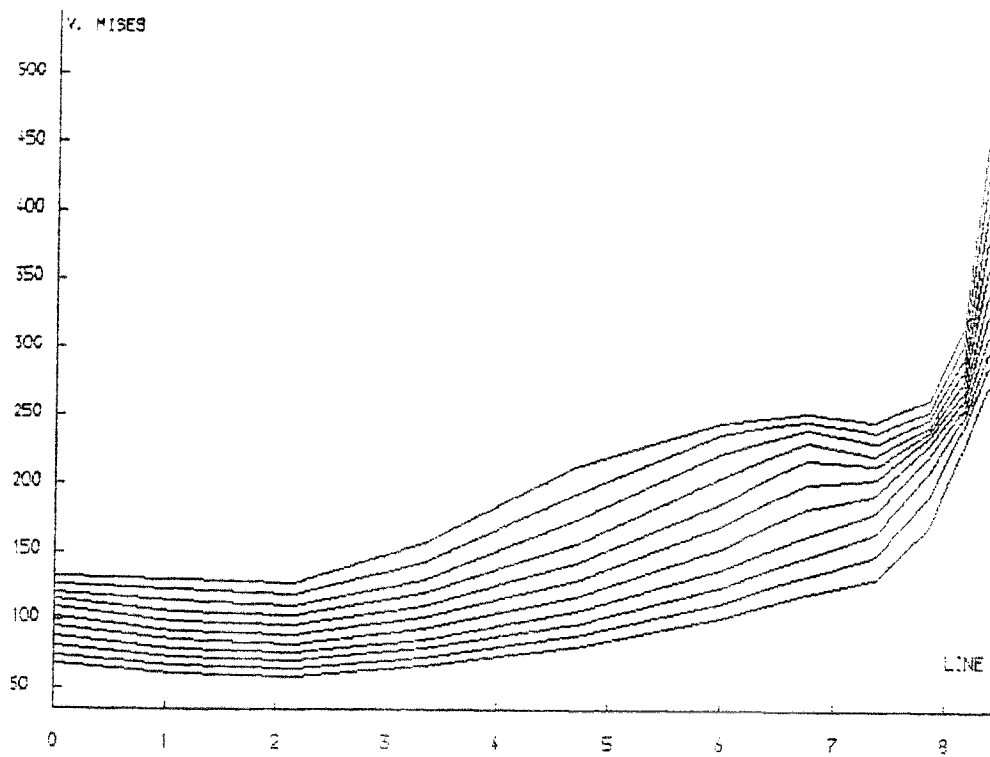
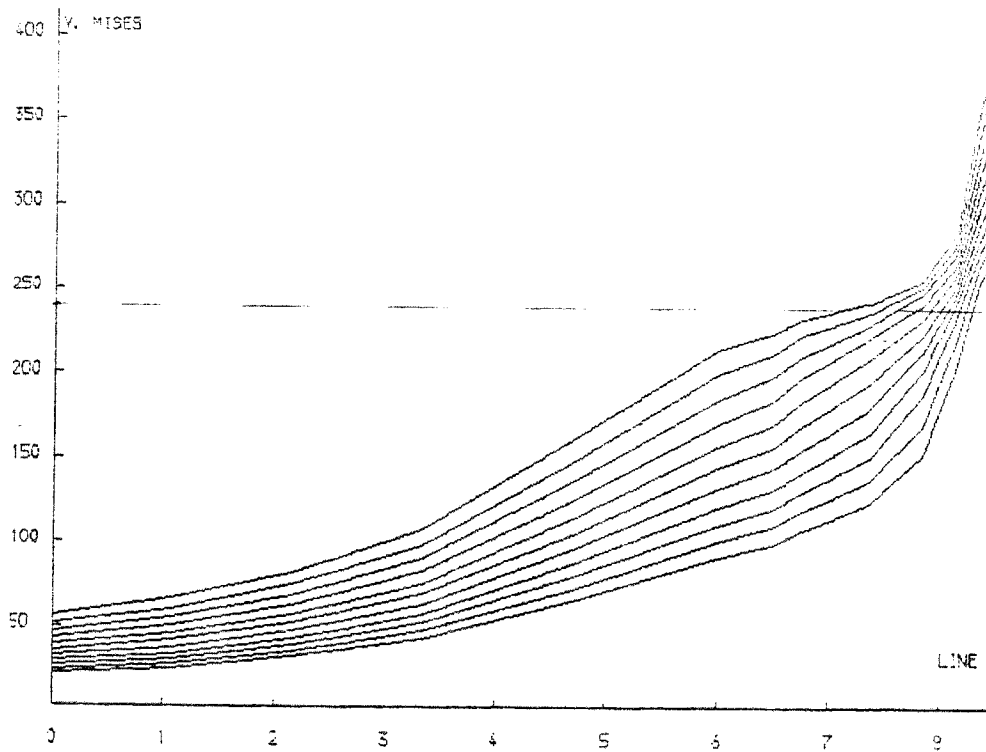
Belastung der Kerben 3-5



Dehnungen ϵ_{yy} für 11 Laststufen
Kerbe 1 (oben) und Kerbe 3 (unten)
Belastung der Kerben 3-5



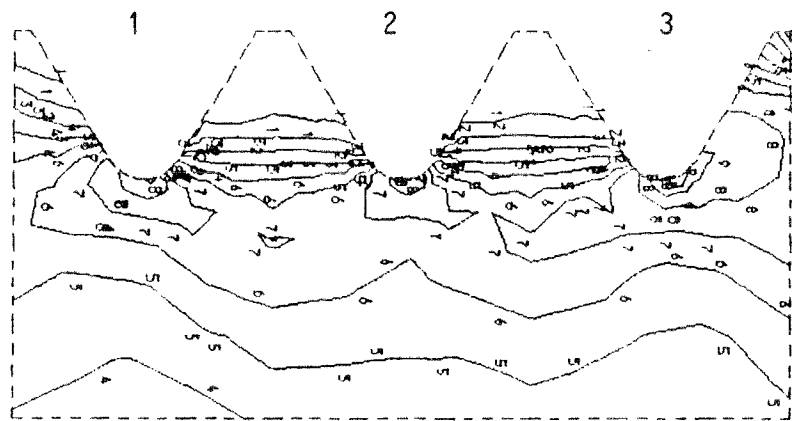
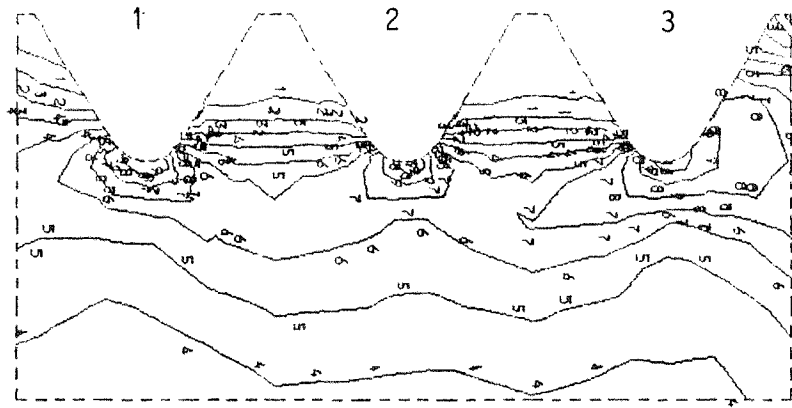
Normalspannungen σ_{yy} für 11 Laststufen
Kerbe 1 (oben) und Kerbe 3 (unten)
Belastung der Kerben 3-5



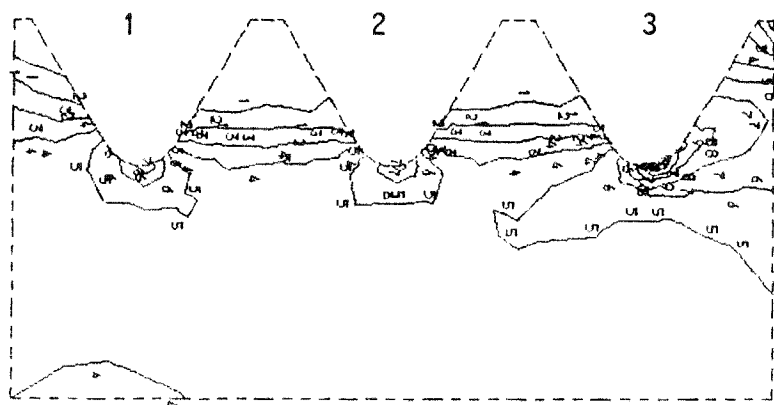
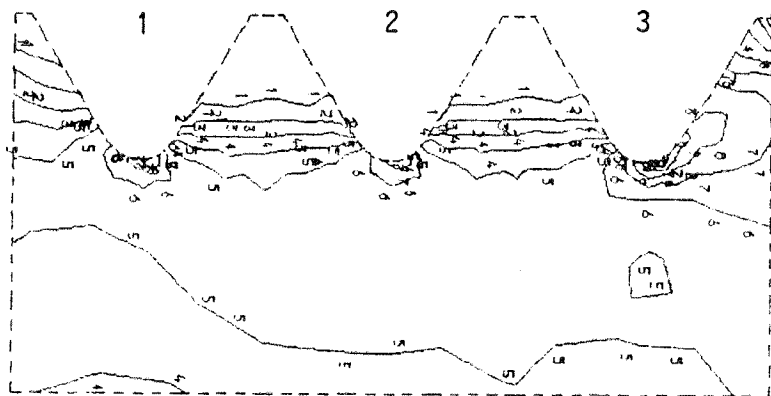
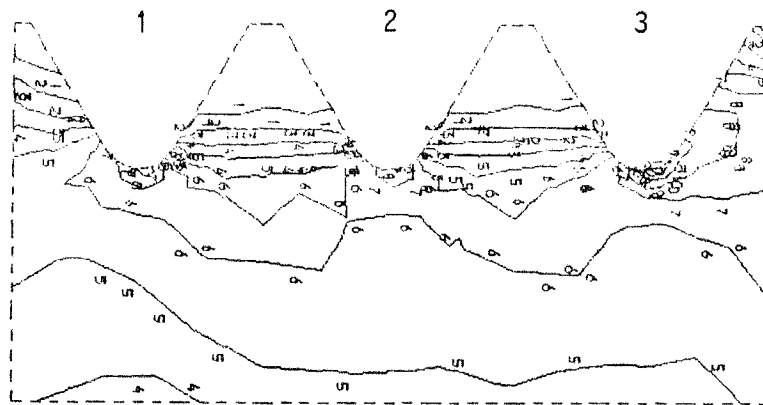
Vergleichsspannungen σ_{eff} für 11 Laststufen

Kerbe 1 (oben) und Kerbe 3 (unten)

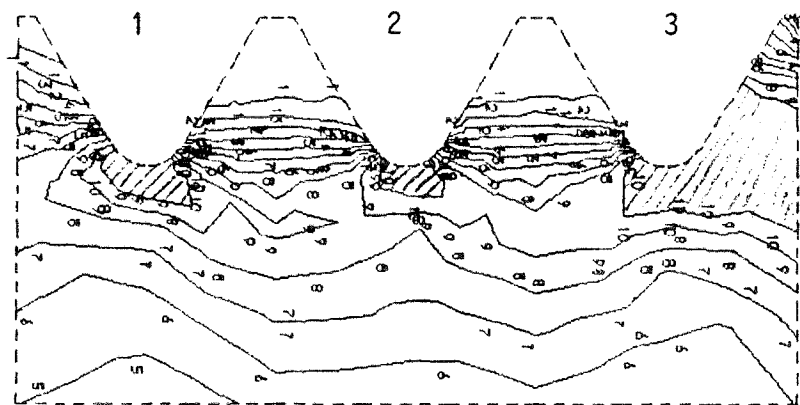
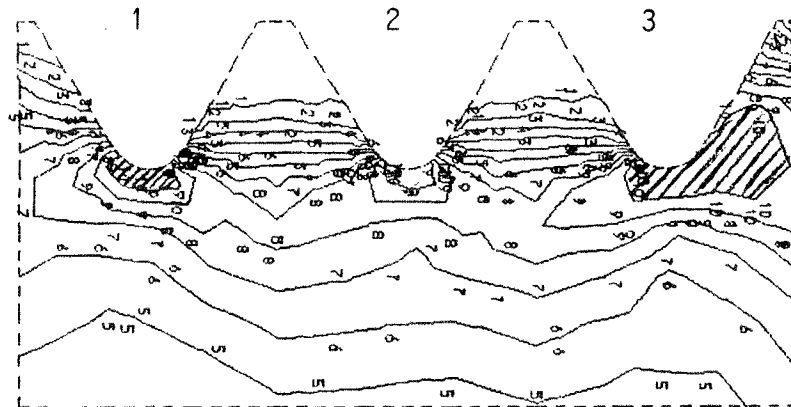
Belastung der Kerben 3-5



Vergleichsspannungen σ_{eff} für die Laststufen
1 (oben) und 4 (unten) in den Kerben 1-3
Belastung der Kerben 3-5



Vergleichsspannungen σ_{eff} für die Laststufen
 7 (oben), 9 (Mitte) und 11 (unten) in den Kerben 1-3
 Belastung der Kerben 3-5

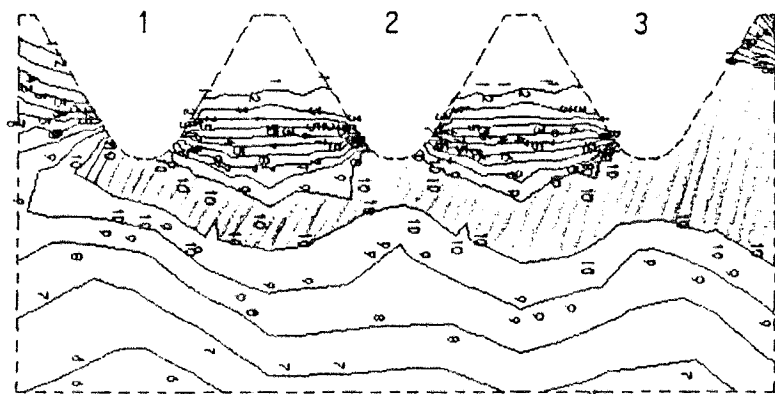
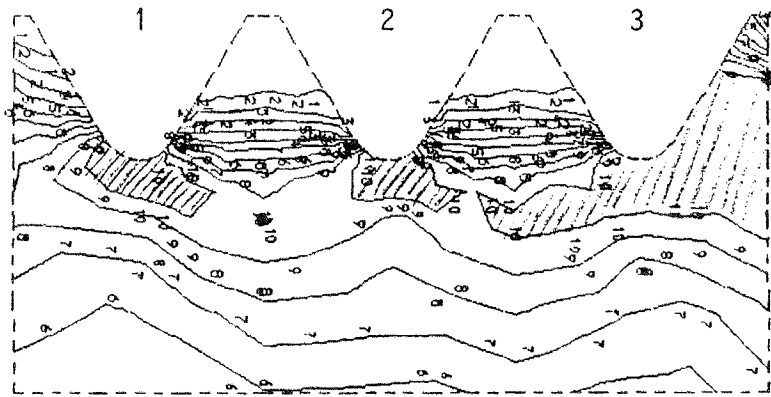


Vergleichsspannungen σ_{eff} für die Laststufen

1.0 (oben) und 1.1 (unten) in den Kerben 1-3

Belastung der Kerben 3-5

Der schraffierte Bereich ist plastiziert.

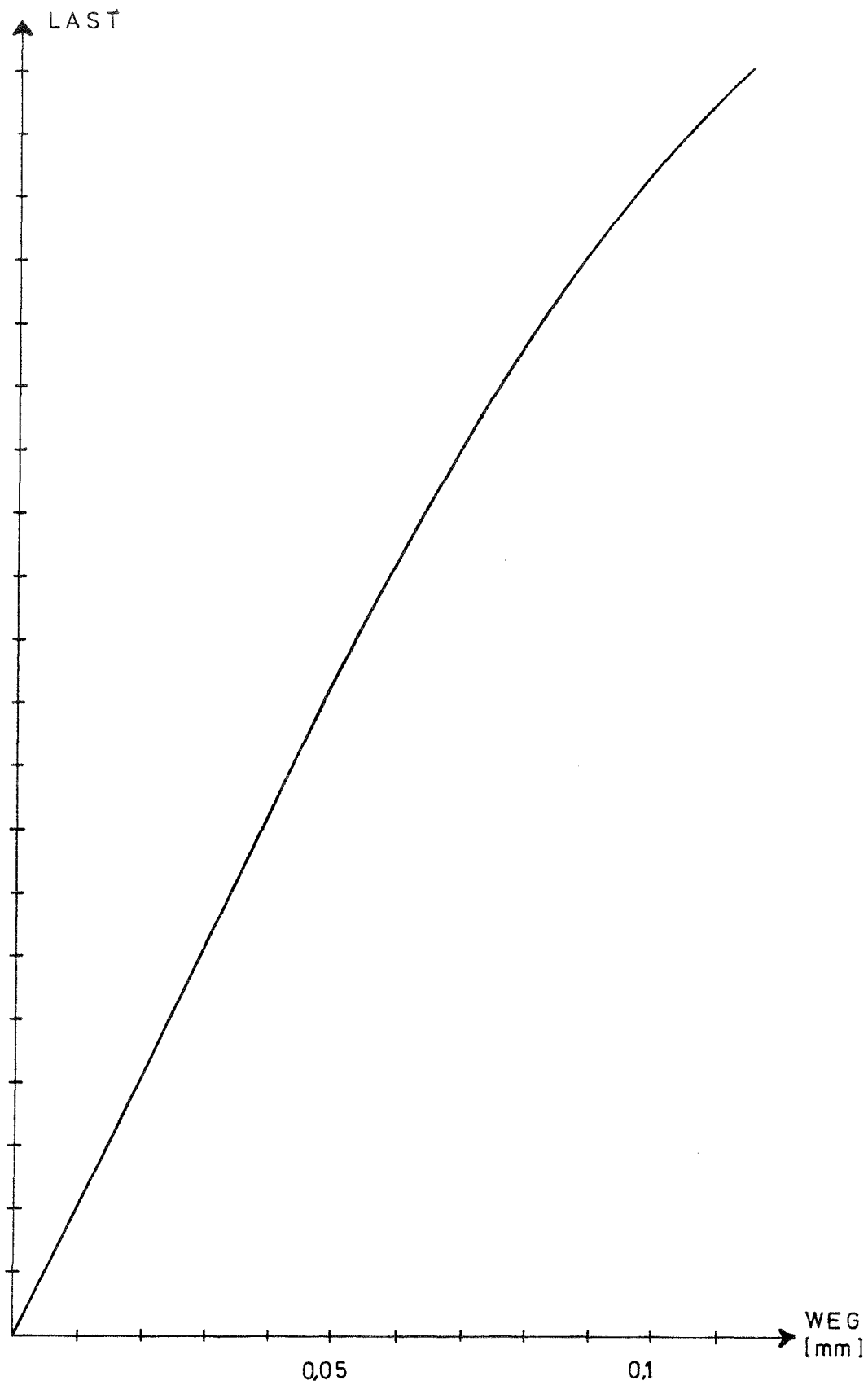


Vergleichsspannungen σ_{eff} für die Laststufen

1.2 (oben) und 1.3 (unten) in den Kerben 1-3

Belastung der Kerben 3-5

Der schraffierte Bereich ist plastiziert.



Last-Verschiebungsdiagramm

$$E_{p1} = 10\% E_{e1}$$

Belastung der Kerben 3-5

Berechnung des plastischen Momentes der Schrauben im Schaftbereich

Schraube	d _{nenn}	d _{vorh}	β_s (nenn)	$\beta_{s,stat}$, (vorh)	M _{pl} (nenn)	M _{pl} (vorh)
	[mm]	[mm]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[Nm]	[Nm]
Dorn 4.6 6/90	6	5,85	0,24	0,288 ¹⁾	8,65	9,62
Gebi A4-70 6/80	6	5,8	0,45	0,536	16,22	17,45
3F 8.8 6/90	6	6,0	0,64	0,78	23,02	28,12
Fuchs 4.6 12/100	12	11,85	0,24	0,368 ²⁾	69,22	102,20
RF(Grade) 4.6 12/100	12	11,85	0,24	0,423	69,22	117,47
Fuchs 5.6 12/95	12	11,8	0,3	0,286	86,52	78,43
RF 5.6 12/100	12	11,9	0,3	0,400	86,52	112,50
Gebi A4-70 12/100	12	11,7	0,45	0,596	129,78	159,18
Peiner 8.8 12/100	12	11,95	0,64	0,783	184,57	223,00
RF 10.9 12/70	12	11,95	0,9	/	259,56	/
RF 10.9 12/100	12	11,9	0,9	0,961	259,56	270,28
Peiner 10.9 12/125	12	11,5	0,9	0,979	259,56	248,50
Peiner 10.9 12/190	12	11,5	0,9	0,979	259,56	248,50
Fuchs 4.6 20/160	20	19,75	0,24	0,284	320,44	365,15
RF 4.6 20/140	20	19,95	0,24	0,274	320,44	363,10
RF 4.6 20/200	20	19,95	0,24	/	320,44	/
RF 5.6 20/140	20	19,9	0,3	/	400,55	/
RF 5.6 20/220	20	19,65	0,3	0,420	400,55	531,85
VEFE A4-70 20/100	20	19,85	0,45	/	600,83	/
PL A4-70 20/140	20	20,1	0,45	/	600,83	/
RF 10.9 20/115	20	19,4	0,9	/	1201,66	/
RF 10.9 20/200	20	19,9	0,9	/	1201,66	/
Peiner 10.9 20/160	20	19,8	0,9	1,023	1201,66	1325,33

Schraube	d _{nenn}	d _{vorh}	β_s (nenn)	$\beta_{s,stat,}$ (vorh)	M _{pI} (nenn)	M _{pI} (vorh)
	[mm]	[mm]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[Nm]	[Nm]
A.F. 4.6-24/160	24	23,9	0,24	/	553,72	/
A.F. 4.6 24/180	24	23,85	0,24	0,420	553,72	956,96
Fuchs 5.6 24/190	24	23,8	0,3	0,284 ¹⁾	692,16	639,38
A.F. 5.6 24/170	24	23,9	0,3	/	692,16	/
A.F. 5.6-24/280	24	23,75	0,3	0,393	692,16	878,68
Neolux-8.8 24/150	24	23,8	0,64	0,831	1476,60	1869,74
A.F. 10.9 24/110	24	23,4	0,9	/	2076,47	/
A.F. 10.9 24/235	24	23,65	0,9	/	2076,47	/
Reiner 10.9 24/195	24	23,35	0,9	0,958*	2076,47	2036,01
Reiner 10.9-24/190	24	23,3	0,9	1,053*	2076,47	2223,52

$$* \beta_{s,stat} = 0,95 \beta_s$$

1) Werte aus Anlage 19 (Ganzzugversuche)

Gemessene Grenzmomente der Schrauben im Schaftbereich

$$(M^* = M_{v, \text{schaft}}^* \cdot 0.9 \cdot \cos 10^\circ) \quad (\text{vgl. Anl. 50, 51, 55, 56})$$

Schraube	Vers.	$M_{v, \text{sch.}}^*$	e	$M_{pl}(\text{nenn})$	$M_{pl}(\text{vorh})$	$\frac{M^*}{M_{pl}(\text{nenn})}$	$\frac{M^*}{M_{pl}(\text{vorh})}$
		[Nm]	[mm]	[Nm]	[Nm]	[-]	[-]
Dorn 4.6 6190	388	13,3	46	8,65	9,62	1,37	1,23
	413	14,2	50	8,65	9,62	1,45	1,31
	414	12,7	50	8,65	9,62	1,30	1,17
Gebi A4-70 6180	389	22,6	41	16,22	17,45	1,23	1,15
	409	22,0	40	16,22	17,45	1,21	1,12
	410	21,5	41	16,22	17,45	1,18	1,09
3F8.8 6190	390	30,6	51	23,07	28,12	1,18	0,96
	407	29,5	50	23,07	28,12	1,13	0,93
	408	31,85	49	23,07	28,12	1,22	1,00
Fuchs 4.6 121100	293	122	33	69,22	102,20	1,56	1,06
	294	141	47	69,22	102,20	1,81	1,22
	295	126	31	69,22	102,20	1,61	1,09
R.F.Graeka 4.6 121120	291	162	61	69,22	117,47	2,07	1,22
	292	158	51	69,22	117,47	2,02	1,19
Fuchs 5.6 12195	296	124	33	86,52	78,43	1,27	1,40
	297	127	30	86,52	78,43	1,30	1,44
	298	126	34	86,52	78,43	1,29	1,42
R.F.5.6 121140	288	152	60	86,52	112,50	1,56	1,20
	289	153	65	86,52	112,50	1,57	1,21
	290	147	70	86,52	112,50	1,51	1,16
Gebi A4-70 121120	416	202	46	129,78	159,18	1,38	1,12
	395	205	50	129,78	159,18	1,40	1,14
	415	206	48	129,78	159,18	1,41	1,15

Schraube	Vers.	$M_{v, sch.}^*$	e	$M_{pl(nenn)}$	$M_{pl(vorh)}$	$\frac{M^*}{M_{pl(nenn)}}$	$\frac{M'}{M_{pl(vorh)}}$
		[Nm]	[mm]	[Nm]	[Nm]	[-]	[-]
Peiner 8.8	396	278	45,5	184,57	223,00	1,34	1,11
	417	294	44	184,57	223,00	1,41	1,17
	121120	273	47	184,57	223,00	1,31	1,09
R.F. 10.9 12170	299	325	19	259,56		1,11	
R.F. 10.9 121100	300	336	41	259,56	270,28	1,14	1,10
	301	332	40	259,56	270,28	1,13	1,09
Peiner 10.9 12175	302	283	19	259,56	248,50	0,97	1,01
	303	284	20	259,56	248,50	0,97	1,01
Peiner 10.9 12190	304	313	33	259,56	248,50	1,07	1,12
	305	289	33	259,56	248,50	0,98	1,03
Fuchs 4.6	308	551	58	320,44	365,15	1,52	1,34
	306	569	59	320,44	365,15	1,58	1,38
	201160	540	83	320,44	365,15	1,50	1,31
R.F. 4.6 201140	310	555	38	320,44	363,10	1,53	1,36
R.F. 4.6 201200	311	564	70	320,44		1,56	
	312	549	99	320,44		1,52	
R.F. 5.6 201140	317	790	32	400,55		1,75	
	316	780	50	400,55		1,73	
R.F. 5.6 201220	313	798	95	400,55	531,85	1,79	1,35
	315	788	111	400,55	531,85	1,75	1,31
	314	796	118	400,55	531,85	1,76	1,33
VEFE R4-70 201140	397	845	43	600,33		1,75	
PL R4-70 201140	398	764	49	600,33		1,69	

Schraube	Vers.	$M_{v, sch.}^*$	e	$M_{pl(nenn)}$	$M_{pl(vorh)}$	$\frac{M^*}{M_{pl(nenn)}}$	$\frac{M^k}{M_{pl(vorh)}}$
		[Nm]				[mm]	[Nm]
R.F. 10.9 201115	323	1559	32	1201,66		1,15	
	322	1532	35,5	1201,66		1,13	
R.F. 10.9 201200	318	1630	97	1201,66		1,21	
	319	1606	107	1201,66		1,19	
Peiner 10.9 201160	321	1484	71	1201,66	1325,23	1,09	0,99
	343	1613	74	1201,66	1325,23	1,19	1,08
	320	1590	93	1201,66	1325,23	1,17	1,06
	342	1628	93	1201,66	1325,23	1,20	1,09
R.F. 4.6 241160	325	1044	40	553,72		1,68	
R.F. 4.6 241180	326	1279	41	553,72	956,96	2,05	1,18
	324	1220	50	553,72	956,96	1,95	1,13
Fuchs 5.6 241190	332	1026	60	692,16	639,38	1,31	1,60
	327	993	77	692,16	639,38	1,27	1,55
	331	1007	79	692,16	639,38	1,29	1,57
R.F. 5.6 241170	334	1230	29	692,16		1,58	
	333	1264	45	692,16		1,62	
R.F. 5.6 241280	330	1201	132	692,16	878,68	1,54	1,21
	329	1260	137	692,16	878,68	1,61	1,27
	328	1217	144	692,16	878,68	1,56	1,23
Nedur 8.8 241150	419	2603	55,5	1476,60	1869,74	1,56	1,23
	394	2628	60	1476,60	1869,74	1,58	1,25
R.F. 10.9 241140	340	2542	41	2076,47		1,08	
	339	2588	45	2076,47		1,11	

Schraube	Vers.	$M_{v, sch.}^*$	e	$M_{pl(nenn)}$	$M_{pl(vorh)}$	$\frac{M^*}{M_{pl(nenn)}}$	$\frac{M^*}{M_{pl(vorh)}}$
		[Nm]	[mm]	[Nm]	[Nm]	[-]	[-]
A.F. 10.9	335	2653	111	2076,47		1,13	
241235	336	2753	124	2076,47		1,18	
Peiner 10.9 24195	341	2293	33	2076,47	2036,01	0,98	1,00
Peiner 10.9	338	2584	68	2076,47	2223,52	1,10	1,03
241190	337	2560	81	2076,47	2223,52	1,04	1,02

Gemessene Grenzmomente der Schrauben im Gewindebereich

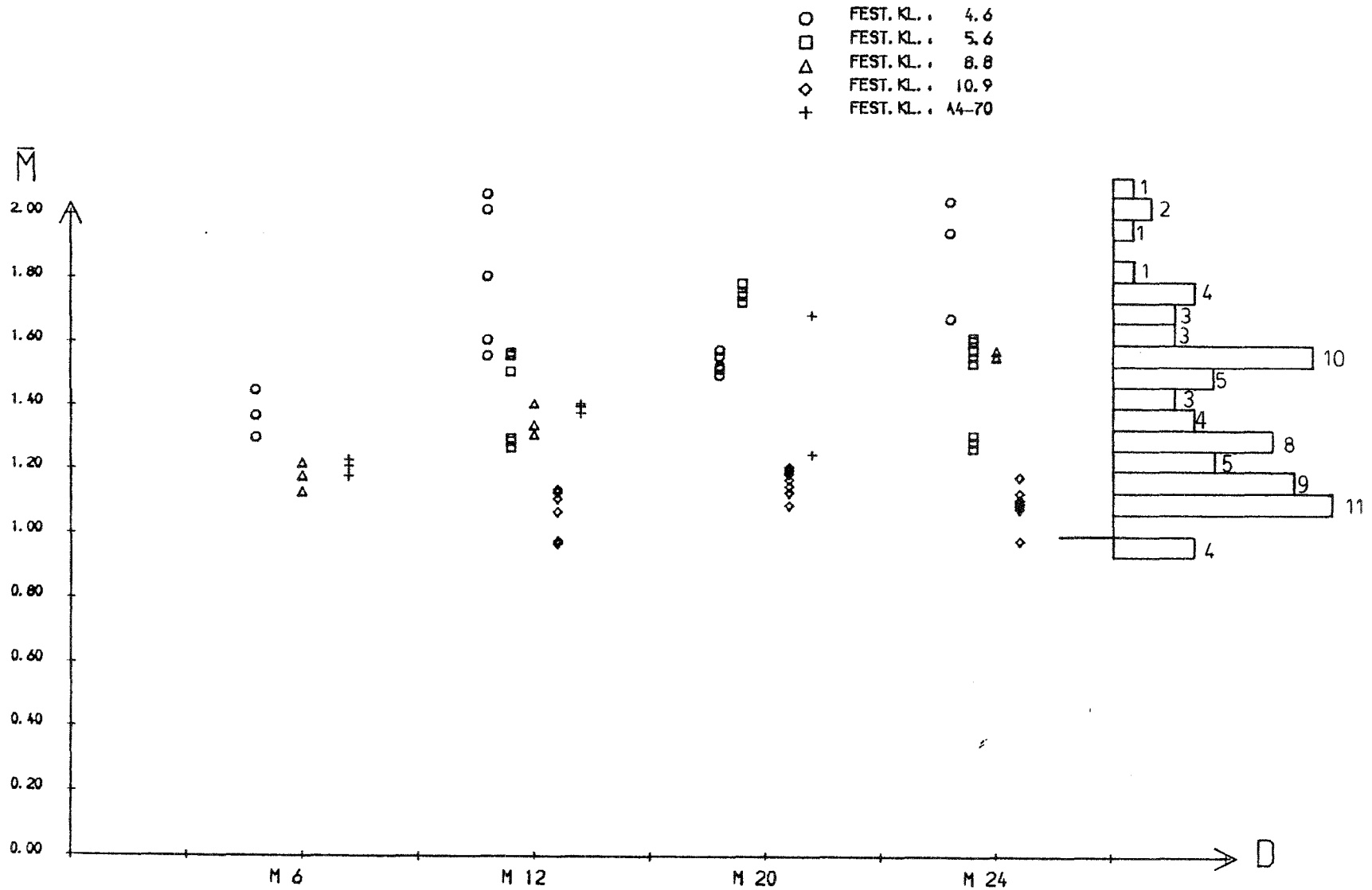
$$M_{\text{Gew.}}^* = M_{\text{v,Gew.}}^* \cdot 0.9 \cdot \cos 10^\circ \quad (\text{vgl. Anl. 52, 57})$$

Schraube	$M_{\text{v,Gew.}}^*$ [Nm]	e [mm]	$M_{\text{pl}}(\text{vorh,Gew})$ [Nm]	$\frac{M_{\text{Gew.}}^*}{M_{\text{pl}}(\text{vorh,Gew})}$	Versuch
3F 8.8	17.0	39.5	16.87	0.89	382
6/90	17.6	40	16.87	0.92	383
	17.8	12	16.87	0.94	386
Fuchs 4.6	99	45	65.76	1.33	018
12/100	97	69	65.76	1.31	025
A.F.Graeka	91	70	75.59	1.07	064
12/120					
Fuchs 5.6	94	47	50.47	1.65	016
12/95	98	70	50.47	1.72	022
	91	70	50.47	1.59	023
	95	24	50.47	1.66	008
A.Friedb.5.6	116	43.5	72.39	1.42	054
12/140	106	44	72.39	1.29	055
	103.5	69	72.39	1.26	060
	105	45	72.39	1.28	056
	99.4	71	72.39	1.21	061
	98	70	72.39	1.20	062
Peiner 8.8	160	60	143.50	0.99	345
12/120	165	57	143.50	1.02	346
A.Friedb.	214.5	71.5	173.92	1.09	102
10.9 12/100	217.5	72.5	173.92	1.11	103
	206	71	173.92	1.05	104
Peiner 10.9	237	43	159.90	1.31	117
12/75					
Peiner 10.9	236	62	160.28	1.30	119
12/90					
Fuchs 4.6	461	128	250.97	1.63	042
20/160					
A.Friedb.4.6	392	49	249.56	1.39	077
20/140					

Schraube	$M_{v,Gew}^*$	e	$M_{pl}(vorh,Gew)$	$\frac{M_{Gew}^r}{M_{pl}(vorh,Gew)}$	Versuch
	[Nm]			[mm]	
A.Friedb.5.6	614.4	128	365.54	1.49	081
20/220	631	78	365.54	1.53	085
	580.5	129	365.54	1.41	082
	546	130	365.54	1.32	083
Peiner 10.9	1176	120	910.89	1.14	146
20/160					
A.Friedb.4.6	886	108	658.65	1.19	067
24/180					
Fuchs5.6	806	155	440.00	1.62	029
24/190	780	100	440.00	1.57	091
	828	60	440.00	1.66	092
A.Friedb.5.6	942	157	604.77	1.38	071
24/ 80	930	186	604.77	1.36	073
Nedur 8.8	1725	76	1286.89	1.19	358
24/150	1715	73	1286.89	1.18	359
Peiner 10.9	1920	48	1401.32	1.21	131
24/95					

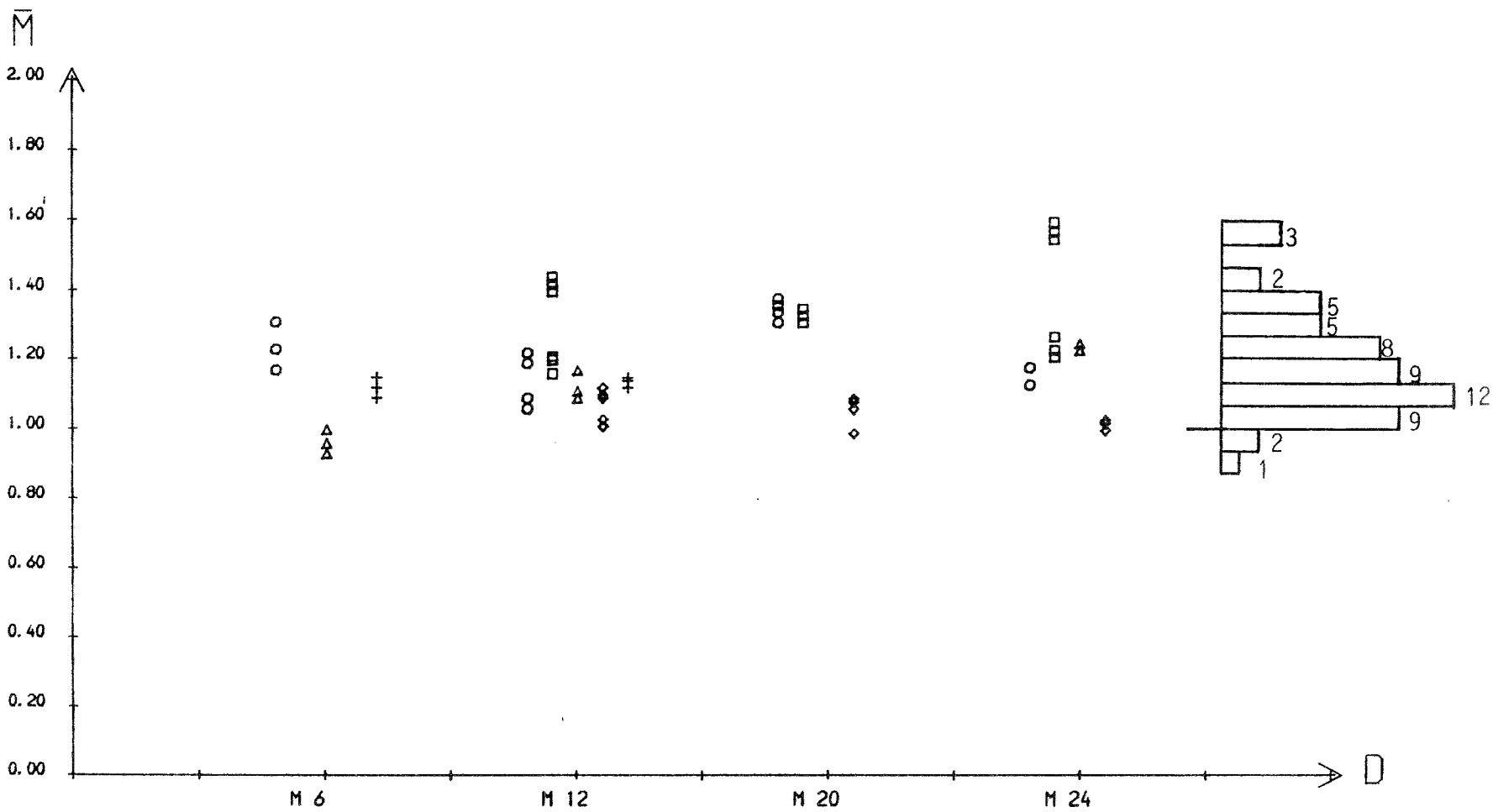
Folgende Schrauben sind im Gewindebereich durch das Aufrollen des Gewindes verfestigt (vergl. Seite 43-44) und werden deshalb in Anlage 52 und der statistischen Auswertung vernachlässigt:

Dorn 4.6	12.4	40	5.77	1.90	370
6/90	12.8	40	5.77	1.97	411
	11.6	40	5.77	1.78	371
Gebi A4-70	20.5	38	10.47	1.74	376
6/80	20.3	38	10.47	1.72	377
	21	12	10.47	1.78	380
Gebi A4-70	196	59	102.43	1.69	354
12/120	187	24	102.43	1.61	350
	195	60	102.43	1.68	355



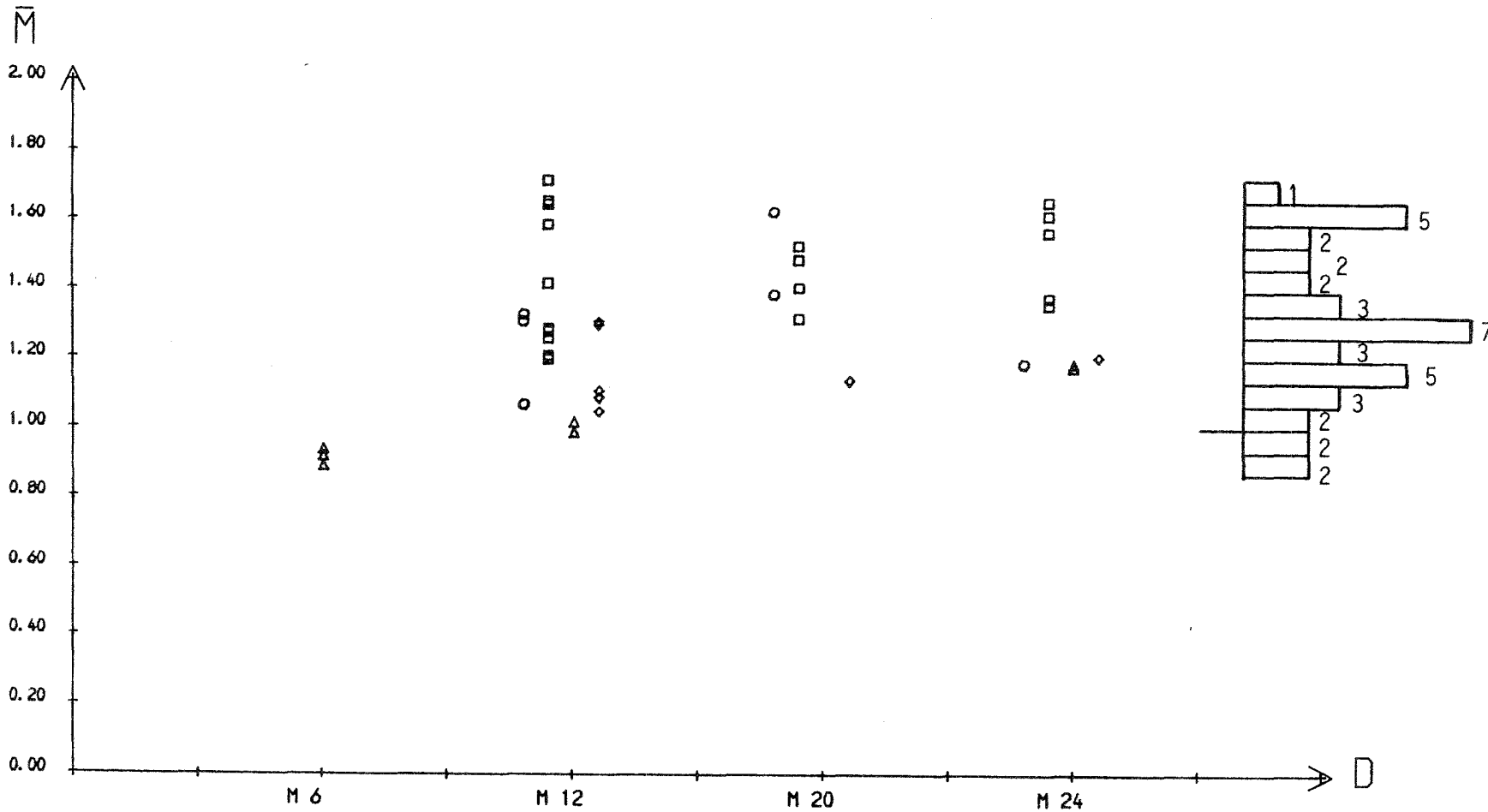
Gemessene Grenzmomente der Schrauben im Schaftbereich (bez. auf $M_{pl(nenn)}$)
 (vergl. Anlagen 44-47, 55)

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- △ FEST. KL. : 8.8
- ◇ FEST. KL. : 10.9
- + FEST. KL. : A4-70



GEM. GRENZMOMENTE DER SCHRAUBEN IM SCHAFTBEREICH (BEZ. AUF MPLVORH)
(vergl. Anlagen 44-47 ,56)

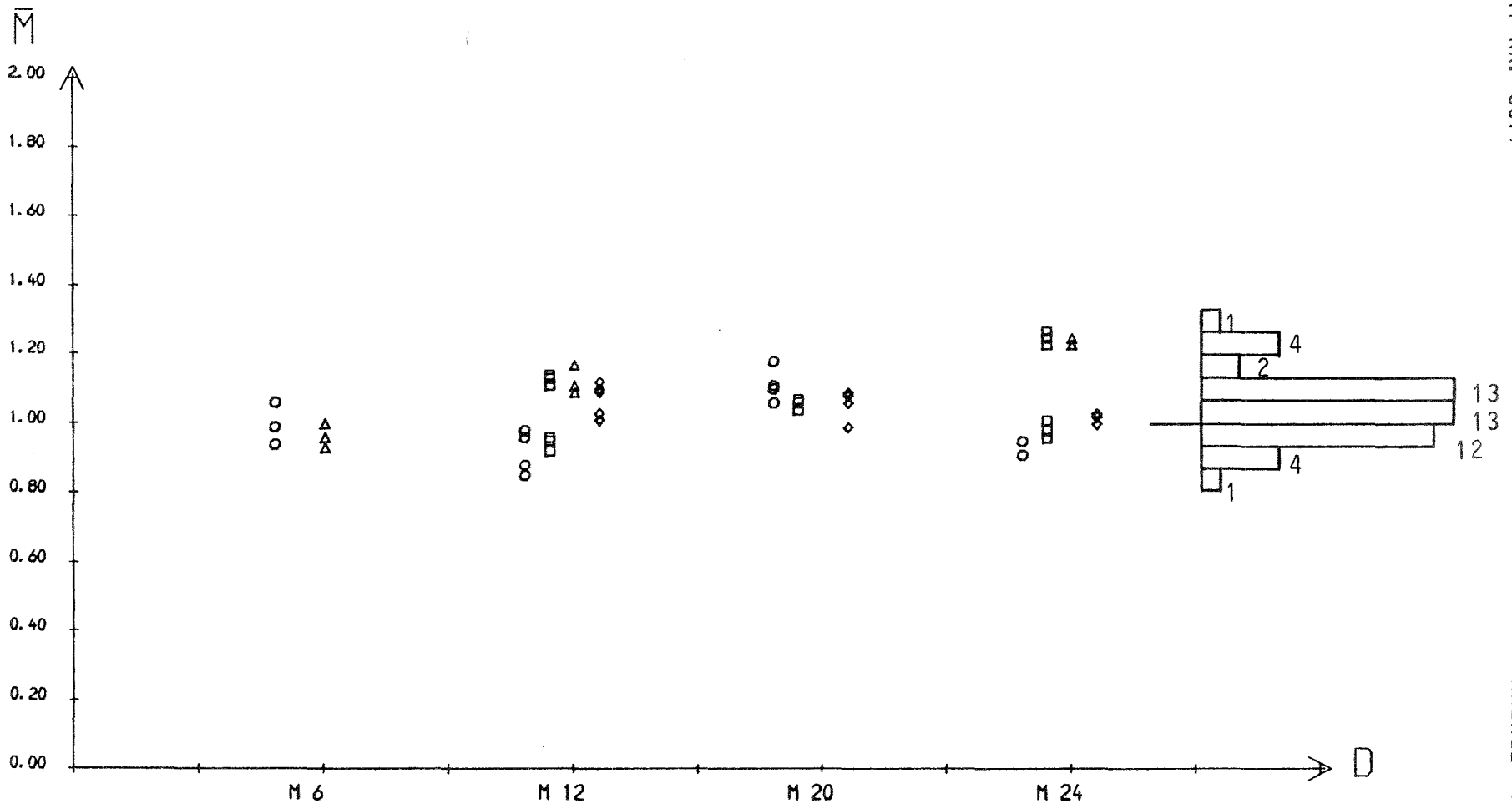
- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- △ FEST. KL. : 8.8
- ◇ FEST. KL. : 10.9
- + FEST. KL. : A4-70



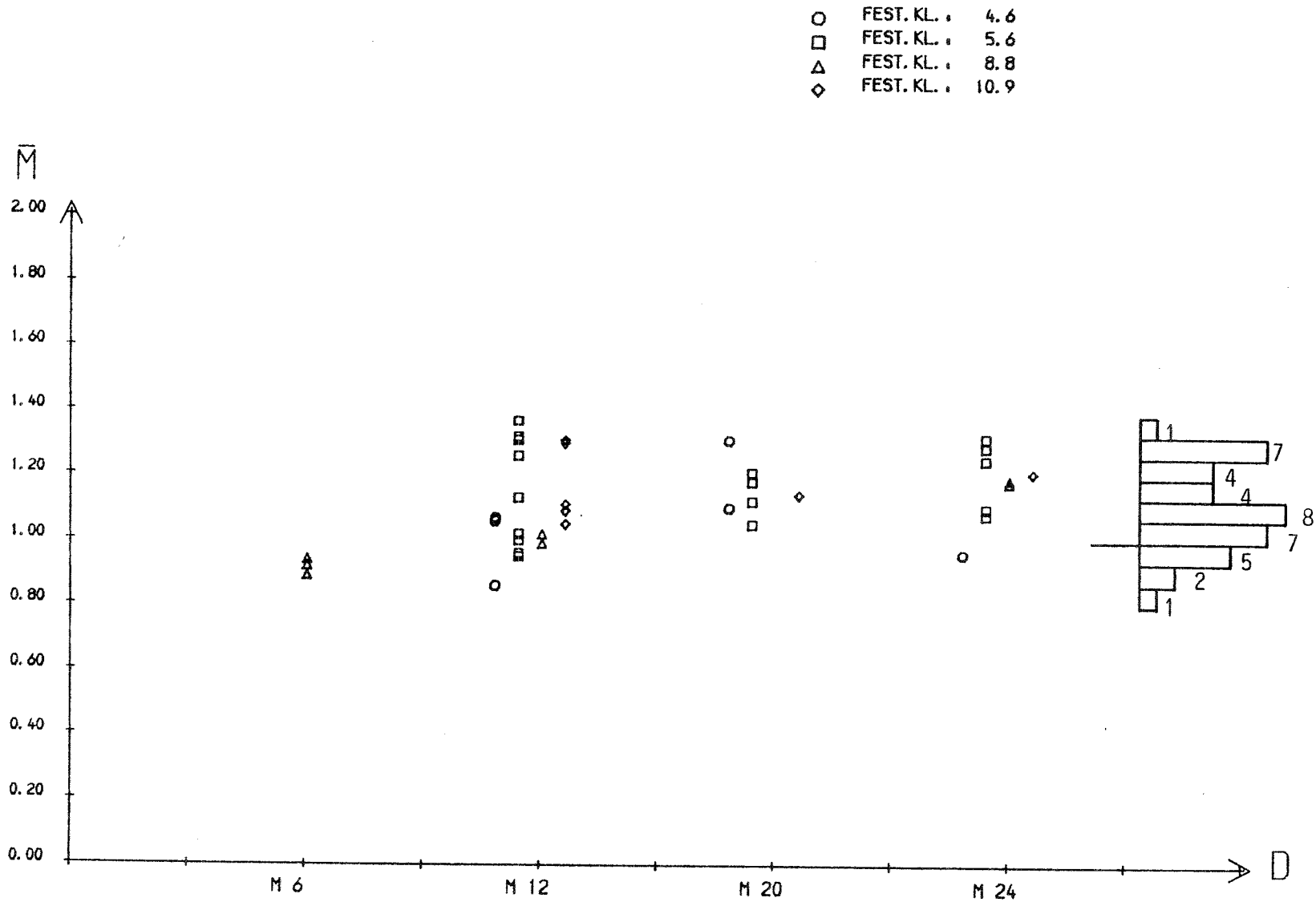
GEM. GRENZMOMENTE DER SCHRAUBEN IM GEWINDEBEREICH (BEZ. AUF MPLVORH)

(vergl. Anlagen 48-49 ,57)

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- △ FEST. KL. : 8.8
- ◇ FEST. KL. : 10.9



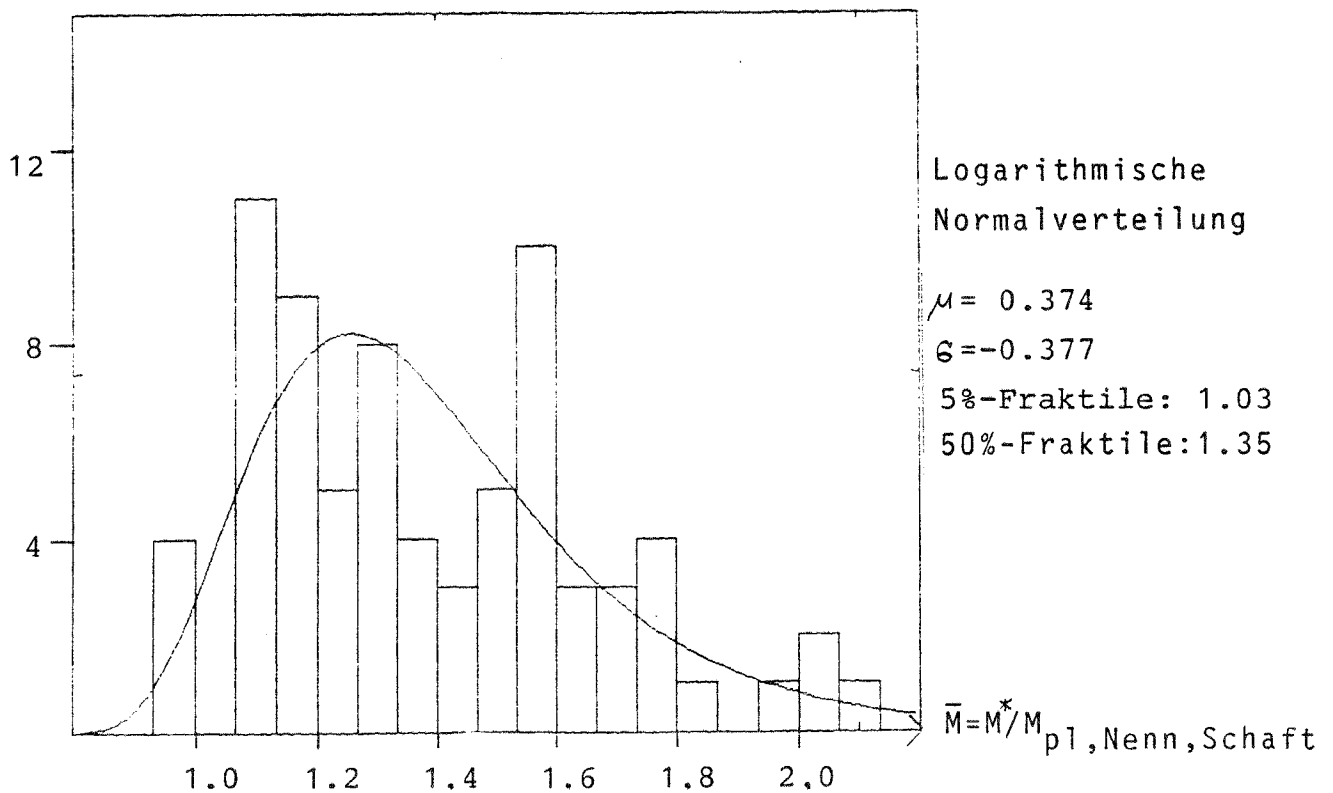
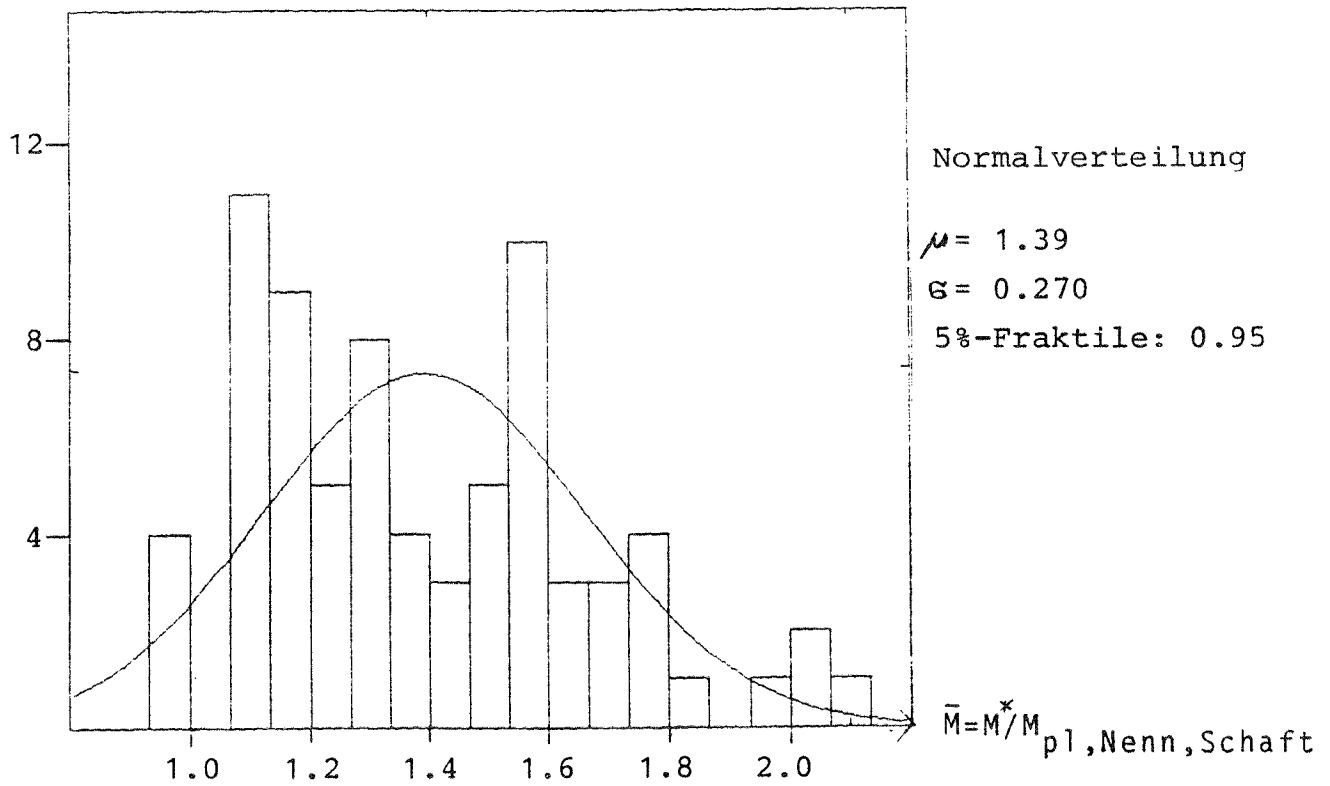
GEM. GRENZMOMENTE DER SCHRAUBEN IM SCHAFTBEREICH (BEZ. AUF $M_{p1, vorh.} \cdot \bar{M}_{Vf}$)



GEM. GRENZMOMENTE DER SCHRAUBEN IM GEWINDEBEREICH (BEZ. AUF $M_{p1, vorh, Gew} \cdot \bar{M}_{Vf}$)

Statistische Auswertung

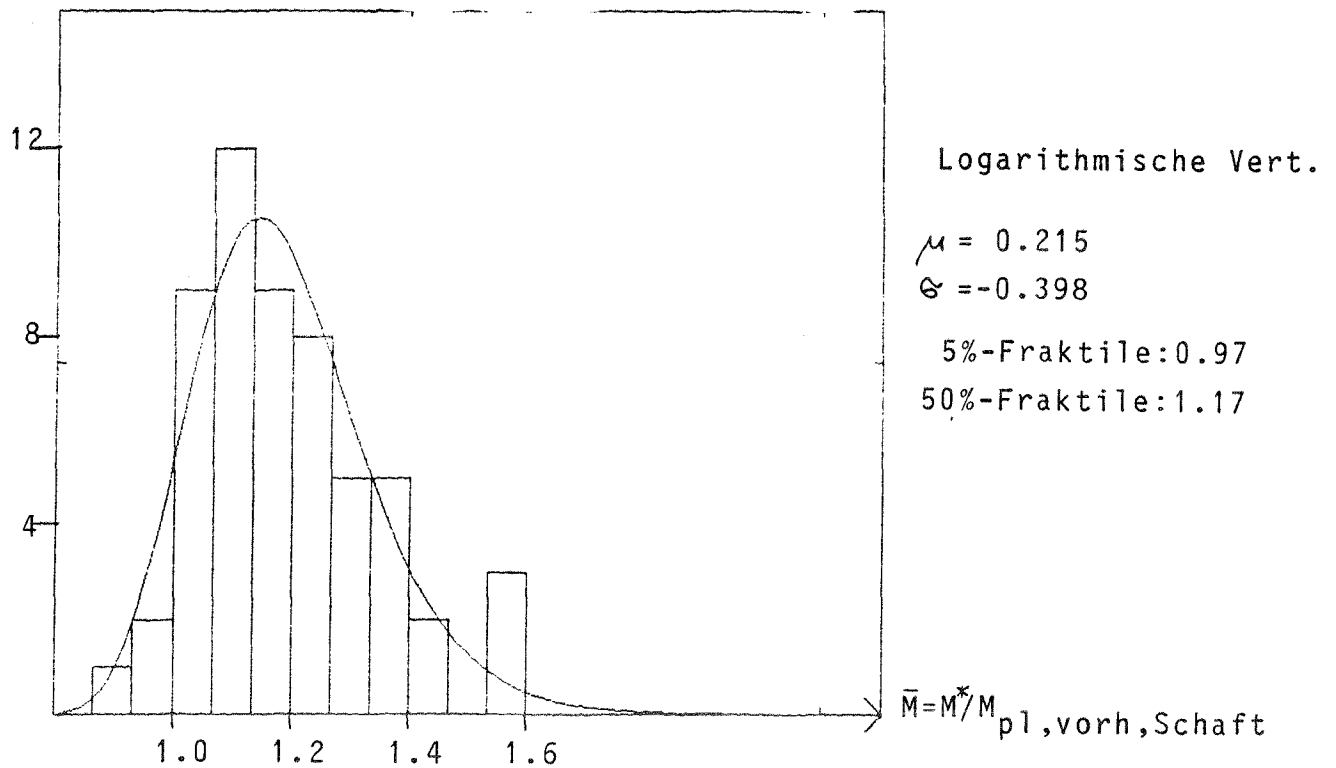
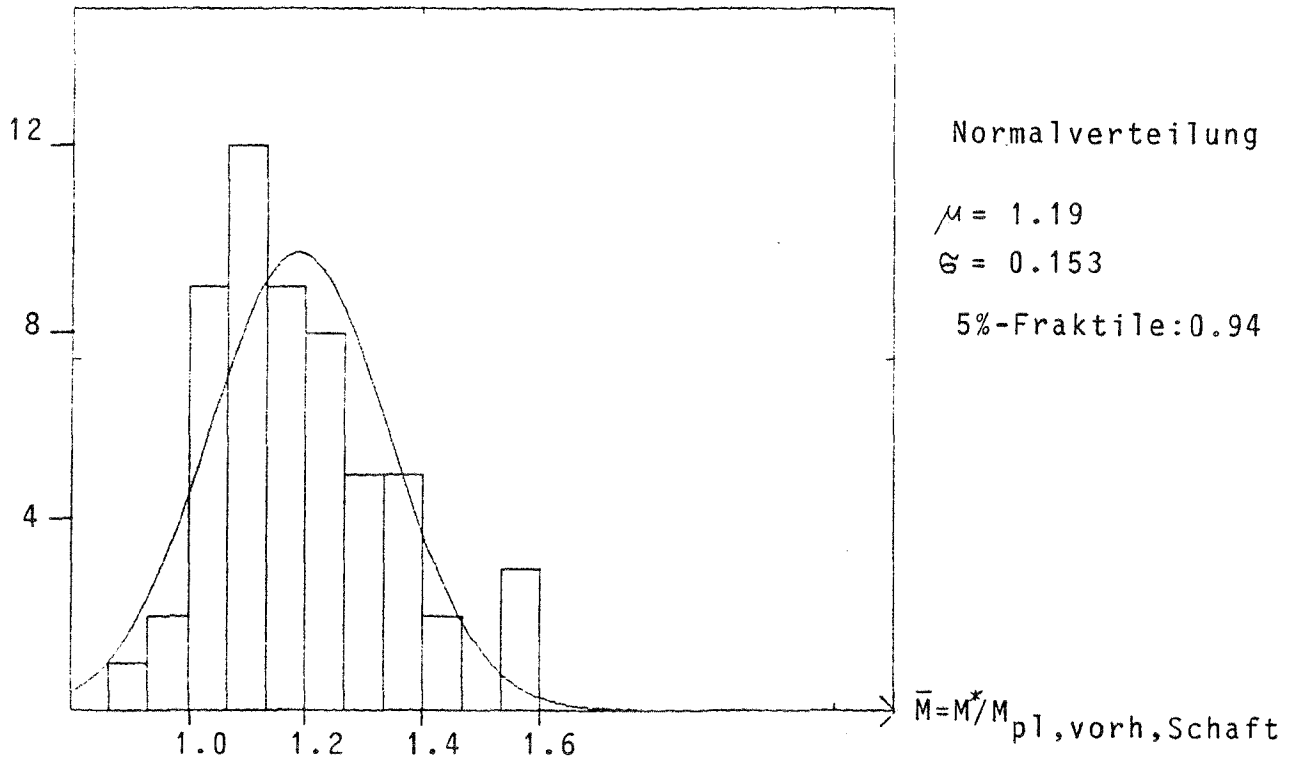
\bar{M} ($M_{pl, Nenn, Schaft}$)



vergl. Anlagen 44-47,50

Statistische Auswertung

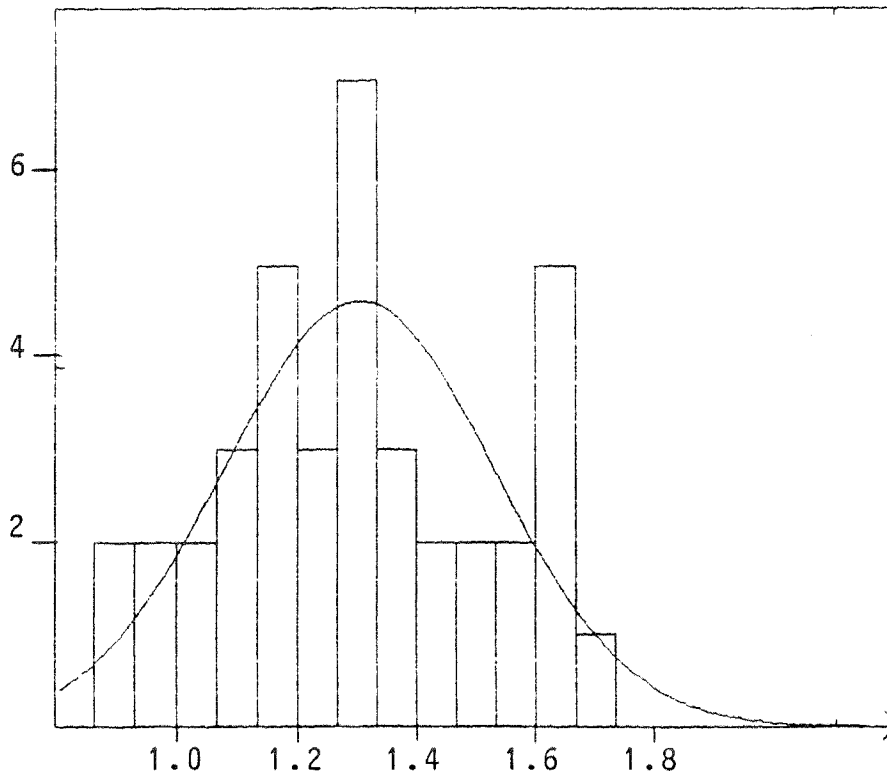
\bar{M} ($M_{pl, vorh, Schaft}$)



vergl. Anlagen 44-47,51

Statistische Auswertung

\bar{M} ($M_{pl,vorh,Gew}$)



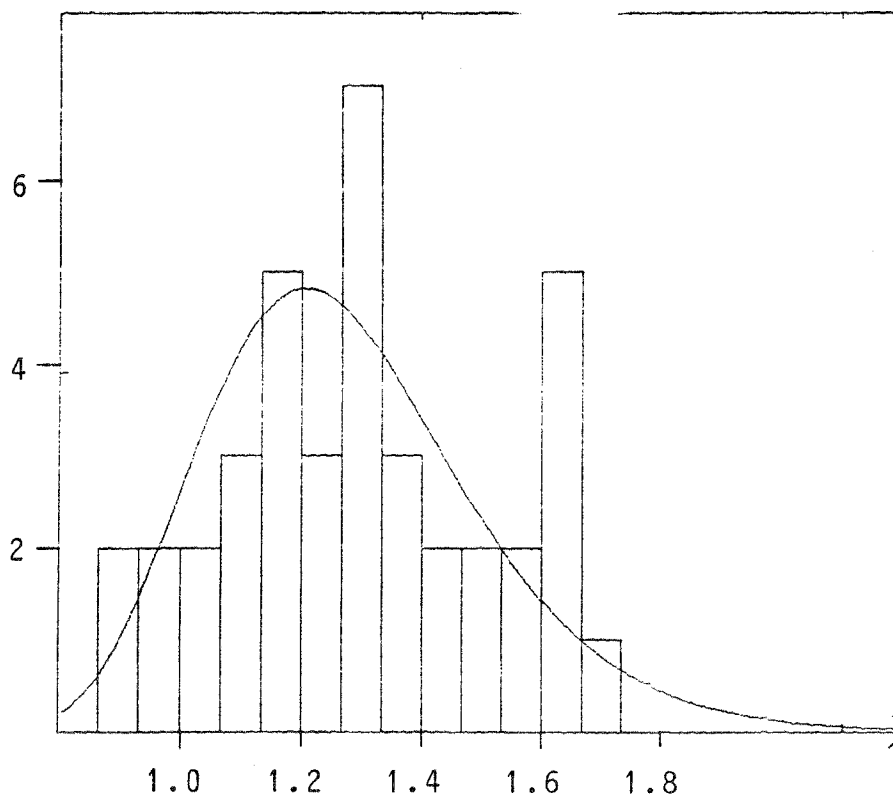
Normalverteilung

$\mu = 1.30$

$\sigma = 0.225$

5%-Fraktile: 0.94

$\bar{M} = M_{Gew}^* / M_{pl,vorh,Gew}$



Logarithmische Vert.

$\mu = 0.229$

$\sigma = -0.013$

5%-Fraktile: 0.97

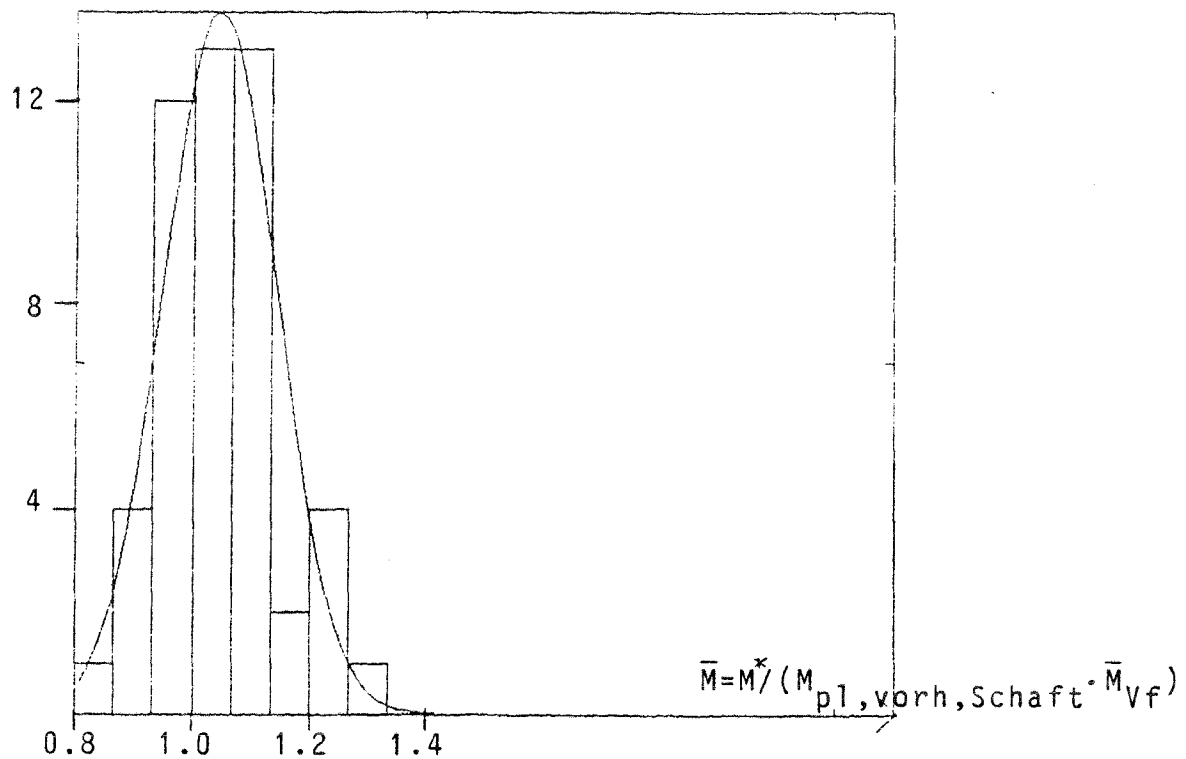
50%-Fraktile: 1.28

$\bar{M} = M_{Gew}^* / M_{pl,vorh,Gew}$

Vergl. Anlagen 48-49,52

Statistische Auswertung

$$\bar{M} (M_{pl, vorh, Schaft} \cdot \bar{M}_{Vf})$$



Normalverteilung

$$\mu = 1.05$$

$$\sigma = 0.097$$

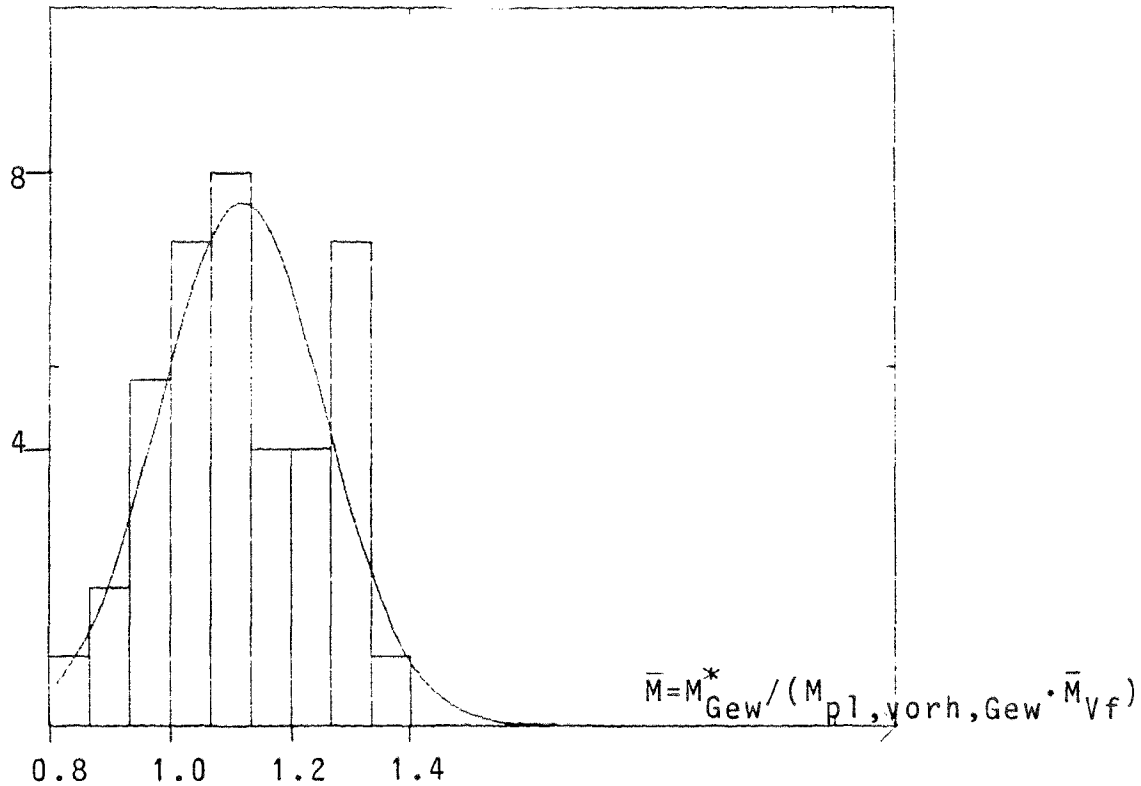
5%-Fraktile: 0.89

Verteilung der Versuchsergebnisse für die Biegetragfähigkeit der Schrauben im Schaftbereich unter Berücksichtigung des Verfestigungseinflusses der Randfasern.

vergl. Anlage 53

Statistische Auswertung

$$\bar{M} (M_{pl, vorh, Gew} \cdot \bar{M}_{Vf})$$



Normalverteilung

$$\mu = 1.12$$

$$\sigma = 0.137$$

5%-Fraktile: 0.89

vergl. Anlage 54

Berechnung eines Kragträgers mit kreisförmigem Querschnitt

$d = 24 \text{ mm}$ $l = 120 \text{ mm}$

Werkstoffgesetz:

$\beta_s = 300 \text{ N/mm}^2$ $\beta_z = 500 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{Lü} = 0.02$ $\epsilon_{gl} = 0.16$

Knoten: 14 Elemente: 13

Knotenpunkte :

Nr.	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	6.000	0.000	0.000
3	12.000	0.000	0.000
4	18.000	0.000	0.000
5	24.000	0.000	0.000
6	30.000	0.000	0.000
7	36.000	0.000	0.000
8	42.000	0.000	0.000
9	48.000	0.000	0.000
10	54.000	0.000	0.000
11	60.000	0.000	0.000
12	66.000	0.000	0.000
13	72.000	0.000	0.000
14	120.000	0.000	0.000

Elementzuordnung :

Nr.	Ak	Ek	Typ	Querschn
1	1	2	2	1
2	2	3	2	2
3	3	4	2	3
4	4	5	2	4
5	5	6	2	5
6	6	7	2	6
7	7	8	2	7
8	8	9	2	8
9	9	10	2	9
10	10	11	2	10
11	11	12	2	11
12	12	13	2	12
13	13	14	1	1

Querschnittswerte :

Nr.	E	G	F	Fzz	Fyy	Id
1	2.1E+005	8.1E+004	4.5E+002	1.6E+004	1.6E+004	1.0E-005

Nr.	IO	m	daempfg.
1	0.0E+000	0.0E+000	0.0E+000

Elemente mit Faserquerschnitten:

Faser-Querschnitt Nr. 1 - 12

F.nr	F-Faser	y	z
1	11.77240	0.00000	11.10000
2	20.86600	0.00000	9.70000
3	26.08080	0.00000	8.24000
4	29.72320	0.00000	6.74000
5	32.33960	0.00000	5.24000
6	34.16960	0.00000	3.74000
7	35.33680	0.00000	2.24000
8	35.90600	0.00000	0.75000
9	35.90600	0.00000	-0.75000
10	35.33680	0.00000	-2.24000
11	34.16960	0.00000	-3.74000
12	32.33960	0.00000	-5.24000
13	29.72320	0.00000	-6.74000
14	26.08080	0.00000	-8.24000
15	20.86600	0.00000	-9.70000
16	11.77240	0.00000	-11.10000
17	1.00000	1.00000	0.00000
18	1.00000	1.00000	0.00000

Randbedingungen :

Kn.nr.	Richtg.	Rwert	
1	1	0.0000	1
1	2	0.0000	2
1	3	0.0000	3
1	4	0.0000	4
1	5	0.0000	5
1	6	0.0000	6

Last- Zeitverlauf :

Zeit	Lastwert
0.00000	0.00000
1.00000	7400.00000

Ergebnis :

=====
wz Knoten 14 : 20.884863

Verschiebgsnorm : 0.02064 eps : 0.00099

ti = 1.00000 124 Iterationen !!

Ubknr.	w	v	b
1	0.00000000	0.00000	0.0000
2	0.00000000	0.00000	0.0000
3	0.00000000	0.00000	0.0000
4	0.00000000	0.00000	0.0000
5	0.00000000	0.00000	0.0000
6	0.00000000	0.00000	0.0000
7	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
8	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
9	0.18920165	0.56760	1.1352
10	0.00000000	0.00000	0.0000
11	-0.06116686	-0.18350	-0.3670
12	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
13	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
14	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
15	0.71098858	2.13297	4.2659
16	0.00000000	0.00000	0.0000
17	-0.11082684	-0.33248	-0.6650
18	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
19	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
20	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
21	1.49577231	4.48732	8.9746
22	0.00000000	0.00000	0.0000
23	-0.14881109	-0.44643	-0.8929
24	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
25	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
26	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
27	2.47176373	7.41529	14.8306
28	0.00000000	0.00000	0.0000
29	-0.17431637	-0.52295	-1.0459
30	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
31	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
32	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
33	3.55824630	10.67474	21.3495
34	0.00000000	0.00000	0.0000
35	-0.18516042	-0.55548	-1.1110
36	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
37	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
38	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
39	4.67636954	14.02911	28.0582
40	0.00000000	0.00000	0.0000
41	-0.18734485	-0.56203	-1.1241
42	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
43	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
44	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
45	5.80481033	17.41443	34.8289
46	0.00000000	0.00000	0.0000
47	-0.18874221	-0.56623	-1.1325
48	-0.00000000	-0.00000	-0.0000

49	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
50	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
51	6.94071438	20.82214	41.6443
52	0.00000000	0.00000	0.0000
53	-0.18985875	-0.56958	-1.1392
54	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
55	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
56	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
57	8.08277864	24.24834	48.4967
58	0.00000000	0.00000	0.0000
59	-0.19080695	-0.57242	-1.1448
60	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
61	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
62	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
63	9.23016812	27.69050	55.3810
64	0.00000000	0.00000	0.0000
65	-0.19164030	-0.57492	-1.1498
66	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
67	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
68	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
69	10.38228614	31.14686	62.2937
70	0.00000000	0.00000	0.0000
71	-0.19238558	-0.57716	-1.1543
72	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
73	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
74	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
75	11.53863606	34.61591	69.2318
76	0.00000000	0.00000	0.0000
77	-0.19305133	-0.57915	-1.1583
78	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
79	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
80	-0.00000000	-0.00000	-0.0000
81	20.88486294	62.65459	125.3092
82	0.00000000	0.00000	0.0000
83	-0.19554392	-0.58663	-1.1733
84	-0.00000000	-0.00000	-0.0000

Schnittkrafte :

Element Nr.: 1 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.01114465	
faser:	1 eps :	-0.12371 sig :	-448.15
faser:	2 eps :	-0.10810 sig :	-425.86
faser:	3 eps :	-0.09183 sig :	-402.62
faser:	4 eps :	-0.07511 sig :	-378.74
faser:	5 eps :	-0.05840 sig :	-354.85
faser:	6 eps :	-0.04168 sig :	-330.97
faser:	7 eps :	-0.02496 sig :	-307.09
faser:	8 eps :	-0.00836 sig :	-300.00

Element Nr.: 1 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00924430

faser:	1	eps :	-0.10261	sig :	-418.02
faser:	2	eps :	-0.08967	sig :	-399.53
faser:	3	eps :	-0.07617	sig :	-380.25
faser:	4	eps :	-0.06231	sig :	-360.44
faser:	5	eps :	-0.04844	sig :	-340.63
faser:	6	eps :	-0.03457	sig :	-320.82
faser:	7	eps :	-0.02071	sig :	-301.01
faser:	8	eps :	-0.00693	sig :	-300.00

1	1	0.00	0.00	-7310.09	0.00 883941.77	0.00
	2	-0.00	-0.00	7310.09	0.00-840081.25	-0.00

Element Nr.: 2 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00924430

faser:	1	eps :	-0.10261	sig :	-418.02
faser:	2	eps :	-0.08967	sig :	-399.53
faser:	3	eps :	-0.07617	sig :	-380.25
faser:	4	eps :	-0.06231	sig :	-360.44
faser:	5	eps :	-0.04844	sig :	-340.63
faser:	6	eps :	-0.03457	sig :	-320.82
faser:	7	eps :	-0.02071	sig :	-301.01
faser:	8	eps :	-0.00693	sig :	-300.00

Element Nr.: 2 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00730903

faser:	1	eps :	-0.08113	sig :	-387.33
faser:	2	eps :	-0.07090	sig :	-372.71
faser:	3	eps :	-0.06023	sig :	-357.47
faser:	4	eps :	-0.04926	sig :	-341.80
faser:	5	eps :	-0.03830	sig :	-326.14
faser:	6	eps :	-0.02734	sig :	-310.48
faser:	7	eps :	-0.01637	sig :	-300.00
faser:	8	eps :	-0.00548	sig :	-300.00

2	2	0.00	0.00	-7307.66	0.00 840081.25	0.00
	3	-0.00	-0.00	7307.66	0.00-796235.29	-0.00

Element Nr.: 3 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00730903

faser:	1	eps :	-0.08113	sig :	-387.33
faser:	2	eps :	-0.07090	sig :	-372.71
faser:	3	eps :	-0.06023	sig :	-357.47
faser:	4	eps :	-0.04926	sig :	-341.80
faser:	5	eps :	-0.03830	sig :	-326.14
faser:	6	eps :	-0.02734	sig :	-310.48
faser:	7	eps :	-0.01637	sig :	-300.00
faser:	8	eps :	-0.00548	sig :	-300.00

Element Nr.: 3 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

		0.00000000	0.00000000	0.00535239			
faser:	1	eps :	-0.05941	sig :	-356.30		
faser:	2	eps :	-0.05192	sig :	-345.60		
faser:	3	eps :	-0.04410	sig :	-334.43		
faser:	4	eps :	-0.03608	sig :	-322.96		
faser:	5	eps :	-0.02805	sig :	-311.50		
faser:	6	eps :	-0.02002	sig :	-300.03		
faser:	7	eps :	-0.01199	sig :	-300.00		
faser:	8	eps :	-0.00401	sig :	-300.00		
	3	3	0.00	0.00	-7361.40	0.00	796235.29
	4	4	-0.00	-0.00	7361.40	0.00	-752066.88

Element Nr.: 4 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

		0.00000000	0.00000000	0.00535239	
faser:	1	eps :	-0.05941	sig :	-356.30
faser:	2	eps :	-0.05192	sig :	-345.60
faser:	3	eps :	-0.04410	sig :	-334.43
faser:	4	eps :	-0.03608	sig :	-322.96
faser:	5	eps :	-0.02805	sig :	-311.50
faser:	6	eps :	-0.02002	sig :	-300.03
faser:	7	eps :	-0.01199	sig :	-300.00
faser:	8	eps :	-0.00401	sig :	-300.00

Element Nr.: 4 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

		0.00000000	0.00000000	0.00314937			
faser:	1	eps :	-0.03496	sig :	-321.37		
faser:	2	eps :	-0.03055	sig :	-315.07		
faser:	3	eps :	-0.02595	sig :	-308.50		
faser:	4	eps :	-0.02123	sig :	-301.75		
faser:	5	eps :	-0.01650	sig :	-300.00		
faser:	6	eps :	-0.01178	sig :	-300.00		
faser:	7	eps :	-0.00705	sig :	-300.00		
faser:	8	eps :	-0.00236	sig :	-300.00		
	4	4	-0.00	0.00	-7505.80	0.00	752066.88
		5	0.00	-0.00	7505.80	0.00	-707032.08

Element Nr.: 5 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

		0.00000000	0.00000000	0.00314937	
faser:	1	eps :	-0.03496	sig :	-321.37
faser:	2	eps :	-0.03055	sig :	-315.07
faser:	3	eps :	-0.02595	sig :	-308.50
faser:	4	eps :	-0.02123	sig :	-301.75
faser:	5	eps :	-0.01650	sig :	-300.00
faser:	6	eps :	-0.01178	sig :	-300.00
faser:	7	eps :	-0.00705	sig :	-300.00
faser:	8	eps :	-0.00236	sig :	-300.00

Element Nr.: 5 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00046531				
faser: 1	eps : -0.00516	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00451	sig : -300.00				
faser: 3	eps : -0.00383	sig : -300.00				
faser: 4	eps : -0.00314	sig : -300.00				
faser: 5	eps : -0.00244	sig : -300.00				
faser: 6	eps : -0.00174	sig : -300.00				
5	5	-0.00	0.00	-6838.68	0.00 707032.08	0.00
	6	0.00	-0.00	6838.68	0.00-666000.00	-0.00

Element Nr.: 6 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00046531	
faser: 1	eps : -0.00516	sig : -300.00	
faser: 2	eps : -0.00451	sig : -300.00	
faser: 3	eps : -0.00383	sig : -300.00	
faser: 4	eps : -0.00314	sig : -300.00	
faser: 5	eps : -0.00244	sig : -300.00	
faser: 6	eps : -0.00174	sig : -300.00	

Element Nr.: 6 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00026283				
faser: 1	eps : -0.00292	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00255	sig : -300.00				
faser: 3	eps : -0.00217	sig : -300.00				
faser: 4	eps : -0.00177	sig : -300.00				
6	6	-0.00	0.00	-7400.00	0.00 666000.00	0.00
	7	0.00	-0.00	7400.00	0.00-621600.00	-0.00

Element Nr.: 7 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00026283	
faser: 1	eps : -0.00292	sig : -300.00	
faser: 2	eps : -0.00255	sig : -300.00	
faser: 3	eps : -0.00217	sig : -300.00	
faser: 4	eps : -0.00177	sig : -300.00	

Element Nr.: 7 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00020295				
faser: 1	eps : -0.00225	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00197	sig : -300.00				
faser: 3	eps : -0.00167	sig : -300.00				
7	7	-0.00	0.00	-7400.00	0.00 621600.00	0.00
	8	0.00	-0.00	7400.00	0.00-577200.00	-0.00

Element Nr.: 8 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00020295				
faser: 1	eps : -0.00225	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00197	sig : -300.00				
faser: 3	eps : -0.00167	sig : -300.00				

Element Nr.: 8 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00016923				
faser: 1	eps : -0.00188	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00164	sig : -300.00				
8	8	-0.00	0.00	-7400.00	0.00	577200.00
	9	-0.00	-0.00	7400.00	0.00	-532800.00
						0.00
						-0.00

Element Nr.: 9 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00016923				
faser: 1	eps : -0.00188	sig : -300.00				
faser: 2	eps : -0.00164	sig : -300.00				

Element Nr.: 9 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00014684				
faser: 1	eps : -0.00163	sig : -300.00				
9	9	-4.04E-027	0.00	-7400.00	0.00	532800.00
	10	4.039E-027	-0.00	7400.00	0.00	-488400.00
						0.00
						-0.00

Element Nr.: 10 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00014684				
faser: 1	eps : -0.00163	sig : -300.00				

Element Nr.: 10 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000	0.00000000	0.00013094				
faser: 1	eps : -0.00145	sig : -300.00				
10	10	0.00	0.00	-7400.00	0.00	488400.00
	11	-0.00	-0.00	7400.00	0.00	-444000.00
						0.00
						-0.00

Element Nr.: 11 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00013094

faser: 1 eps : -0.00145 sig : -300.00

Element Nr.: 11 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00011749

11	11	-0.00	0.00	-7400.00	0.00	444000.00	0.00
	12	0.00	-0.00	7400.00	0.00	-399600.00	-0.00

Element Nr.: 12 Knoten : 1

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00011749

Element Nr.: 12 Knoten : 2

kappa bei nit =1 :, nf : 18

0.00000000 0.00000000 0.00010443

12	12	-6.14E-026	0.00	-7400.00	0.00	399600.00	0.00
	13	6.139E-026	-0.00	7400.00	0.00	-355200.00	-0.00
13	13	0.00	-0.00	-7400.00	0.00	355200.00	-0.00
	14	0.00	0.00	7400.00	0.00	-0.00	-0.00

Gemessene Grenzmomente der Schrauben

(auf den Schaft bezogen)

(vergl. Anlage 74)

M 6

Schraube	$M_{v,Schaft}^*$		$M_{v,Kerbe}^*$	$\frac{M_{v,Kerbe}^*}{M_{v,Schaft}^*}$	Kerbe
	Versuch	[Nm]	[Nm]	[-]	
Dorn 4.6 6/90	369	13,3	12,4	0,93	1
	372		11,2	0,84	1
	370		12,4	0,93	6
	373		9,9	0,74	6
	411		12,8	0,96	6
	371		11,6	0,87	10
	374		10,2	0,77	10
Gebi 44-70 6/80	375	22,0	21,8	0,99	1
	376		20,5	0,93	6
	379		18,8	0,85	6
	377		20,3	0,92	10
	380		21,0	0,95	10
3F 8.8 6/90	381	30,6	22,6	0,74	1
	384		26,3	0,86	1
	387		22,0	0,72	2
	382		17,0	0,56	6
	385		16,3	0,53	6
	383		17,6	0,575	10
	386		17,8	0,582	10

M 12

Schraube	$M_{v, \text{Schaft}}^*$		$M_{v, \text{Kerbe}}^*$	$M_{v, \text{Kerbe}}^*$	Kerbe
	Versuch			$M_{v, \text{Schaft}}^*$	
Fuchs 4.6 12100	011	126	92	0,73	1
	017		121,5	0,96	1
	024		122,4	0,97	1
	026		120	0,95	1
	012		80	0,63	4
	018		99	0,79	4
	025		97	0,77	4
Fuchs 5.6 12195	003	126	118	0,94	1
	004		113	0,90	1
	013		106	0,84	1
	019		105	0,83	1
	137		89 *)	0,71	1
	014		106	0,84	2
	020		103,5	0,82	2
	005		103,5	0,82	3
	015		101	0,80	3
	021		98	0,78	3
	006		92	0,73	4
	016		94	0,75	4
	022		98	0,78	4
	007		87,4	0,69	5
023	91	0,72	5		
008	94	0,75	6		
R.F. 5.6 12140	035	151	140	0,93	1
	057		128	0,85	1
	058		129	0,85	1
	088		132	0,87	1
	089		136	0,90	1
	053		113	0,75	3
	059		117	0,77	3
	054		116	0,77	4
	136		108	0,72	4
	055		106	0,70	5
	060		103,5	0,69	5
	056		106	0,70	6
	061		99,4	0,66	7
	062		98	0,65	9

*) $e/d < 1,0$

(vergl. Anlage 75)

Schraube	$M_{v, \text{Schaft}}^*$		$M_{v, \text{Kerbe}}^*$	$\frac{M_{v, \text{Kerbe}}^*}{M_{v, \text{Schaft}}^*}$	Kerbe
	Versuch				
Gebil A4-70 12120	352	205	215	1,05	1
	353		206,5	1,01	1
	356		203	0,99	1
	351		186	0,91	6
	354		196	0,96	6
	350		187	0,91	10
	355		195	0,95	10
Peiner 8.8 12120	344	276	220	0,80	1
	347		178	0,64	1
	345		160	0,58	6
	348		164	0,59	6
	346		165	0,60	10
	349		160	0,58	10
H.F. 10.9 12170	095	325	288	0,89	1
	096		230	0,71	4
H.F. 10.9 121100	097	334	295	0,88	1
	101		284	0,85	1
	127		235 *)	0,70	1
	098		225	0,67	4
	102		214,5	0,64	4
	099		214	0,64	5
	103		217,5	0,65	5
	100		215	0,64	6
	104		206	0,62	6
	126		189	0,57	6
Peiner 10.9 12175	116	283,5	273	0,96	1
	117		237	0,84	4
Peiner 10.9 12190	118	301	273	0,91	1
	120		256	0,85	1
	123		228	0,76	1
	119		236	0,78	4
	124		203	0,67	4
	121		222	0,74	6
	125		233	0,77	6
	122		240	0,80	8

*) $e/d < 1,0$

M 20

Schraube	$M_{v, Schaft}^*$		$M_{v, Kerbe}^*$	$\frac{M_{v, Kerbe}^*}{M_{v, Schaft}^*}$	Kerbe
	Versuch				
Fuchs 4.6 201160	041	553	538	0,97	1
	046		559	1,01	1
	042		461	0,83	4
	045		471	0,85	4
A.F. 4.6 201140	076	555	461	0,83	1
	077		392	0,71	4
A.F. 4.6 201200	078	556,5	468	0,84	1
	079		403	0,72	4
A.F. 5.6 201140	086	785	624	0,79	1
	087		573	0,73	4
A.F. 5.6 201220	138	797	711	0,89	1
	080		697	0,87	1
	084		720	0,90	1
	081		614,4	0,77	4
	085		631	0,79	4
	082		580,5	0,73	6
083	546	0,69	8		
VEFE A470 201140	364	845	918	1,09	6
PL A470 201140	363	764	756	0,99	1
A.F. 10.9 201115	105	1545,5	1188	0,77	1
	106		1073	0,69	4
A.F. 10.9 201200	107	1618	1380	0,85	1
	139		1323	0,82	1
	140		1428	0,88	1
	103		1183	0,73	4
	141		1240	0,77	4
	142		1212	0,75	8
Peiner 10.9 201160	145	1610	1356	0,84	1
	150		1200	0,75	1
	146		1176	0,73	4
	149		1069 *)	0,66	4

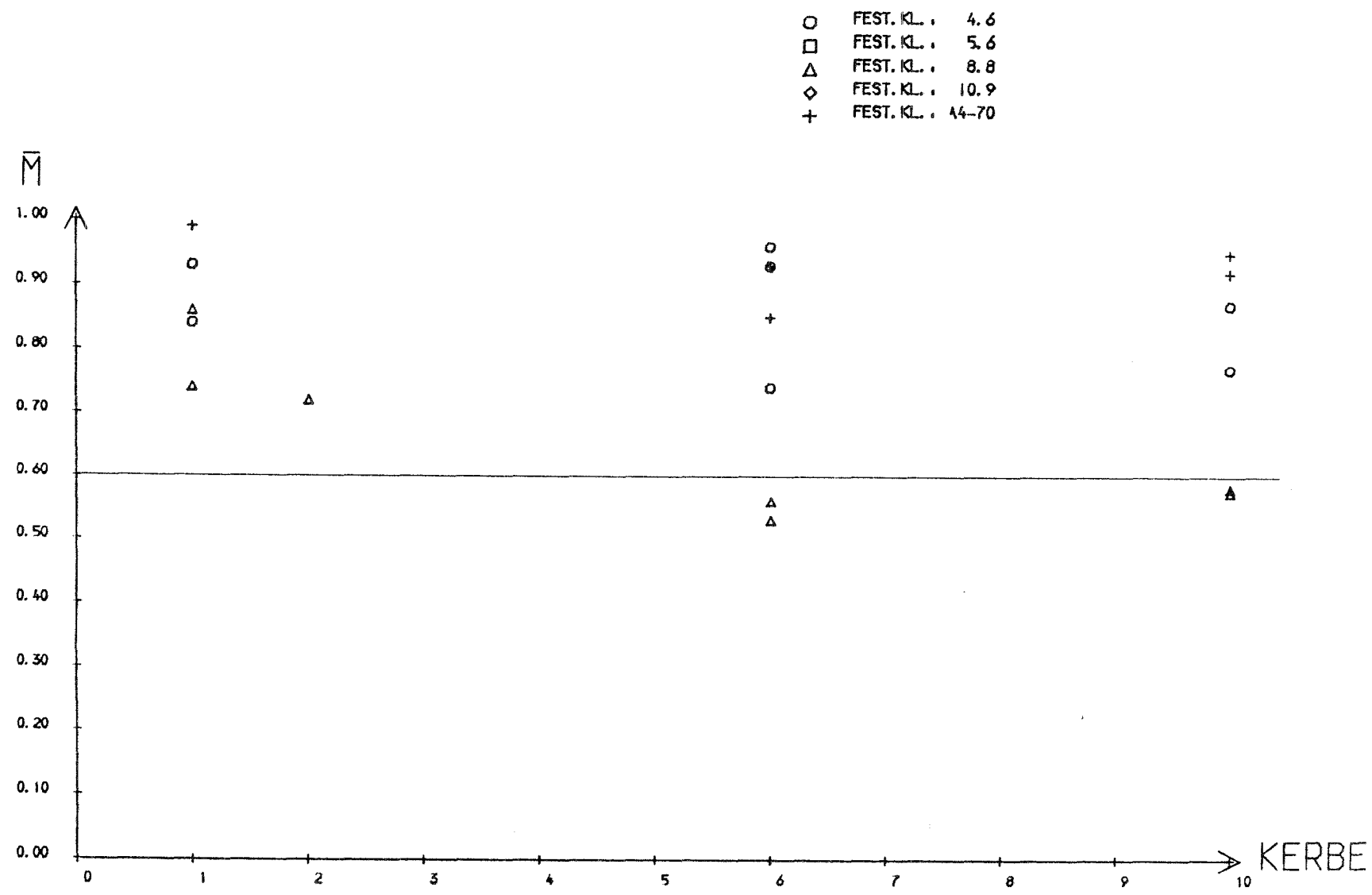
(vgl. Anlage 76)

*) $e/d < 1,0$

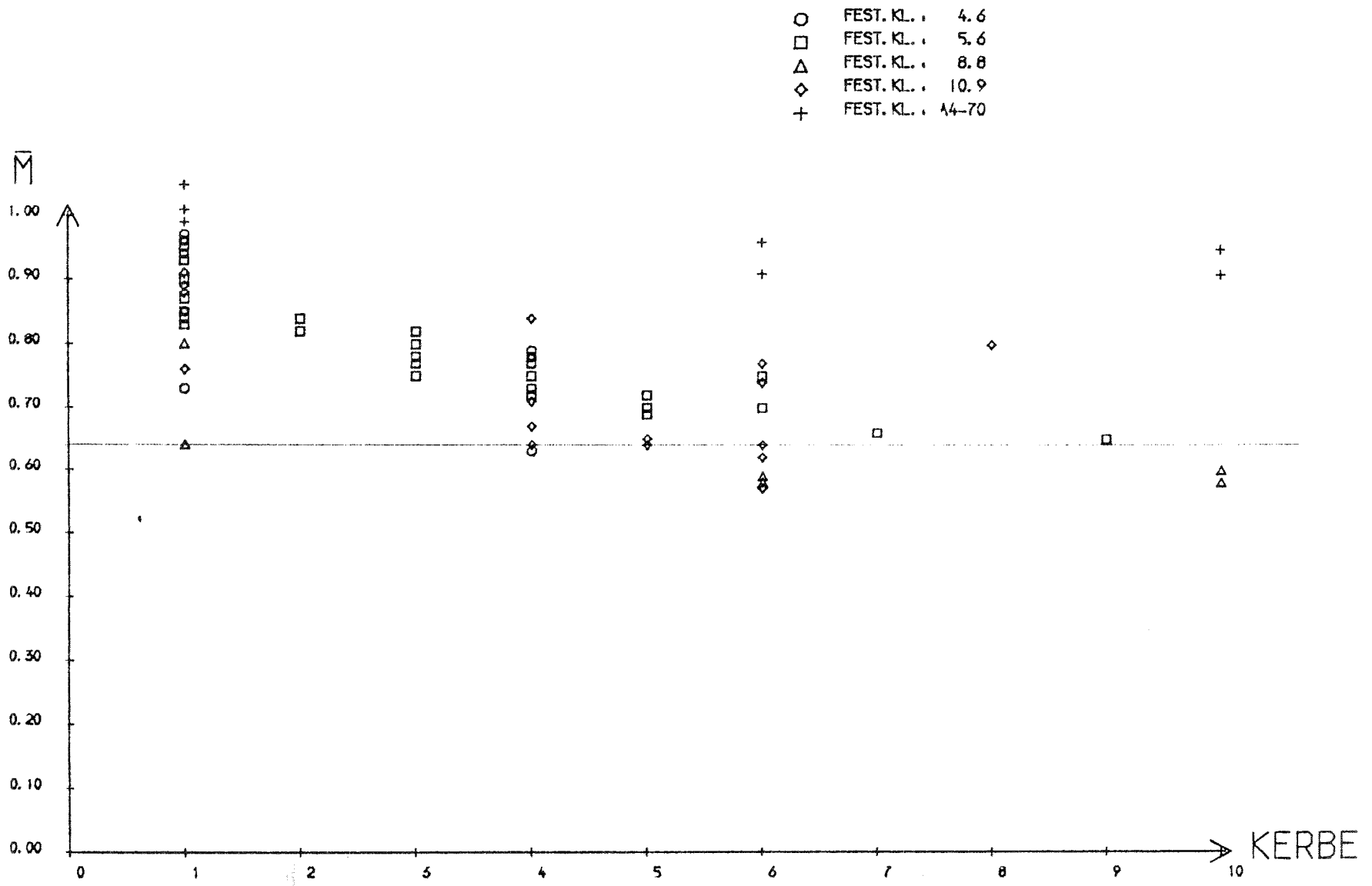
M 24

Schraube	M _{v,Schaft} *		M _{v,Kerbe} *	M _{v,Kerbe} *	Kerbe
	Versuch				
A.F. 4.6 241160	068	1044	830	0,80	1
	069		744	0,71	4
A.F. 4.6 241180	066	1249,5	1035	0,83	1
	067		886	0,71	4
Fuchs 5.6 241190	027	1009	858	0,85	1
	030		990	0,98	1
	090		898	0,89	1
	093		945	0,94	1
	029		806	0,80	4
	091		780	0,77	4
	092		828	0,82	4
A.F. 5.6 241170	075	1247	1115	0,89	1
	074		942	0,76	4
A.F. 5.6 241280	133	1226	1155	0,94	1
	070		1014	0,83	1
	072		1110	0,91	1
	071		942	0,77	4
	073		930	0,76	4
	134		931	0,76	7
Nedur 8.8 241150	357	2616	2087	0,80	1
	360		2000	0,76	1
	358		1725	0,66	6
	391		1717	0,66	6
	393		1652	0,63	6
	359		1715	0,66	10
	392		1643	0,63	10
A.F. 10.9 241140	109	2565	2326	0,91	1
	110		2053	0,80	4
A.F. 10.9 241235	111	2703	2431	0,90	1
	112		2106	0,78	4
Peiner 10.9 24195	130	2293	2151	0,94	1
	131		1920	0,84	4
Peiner 10.9 241190	135	2572	2392	0,93	1

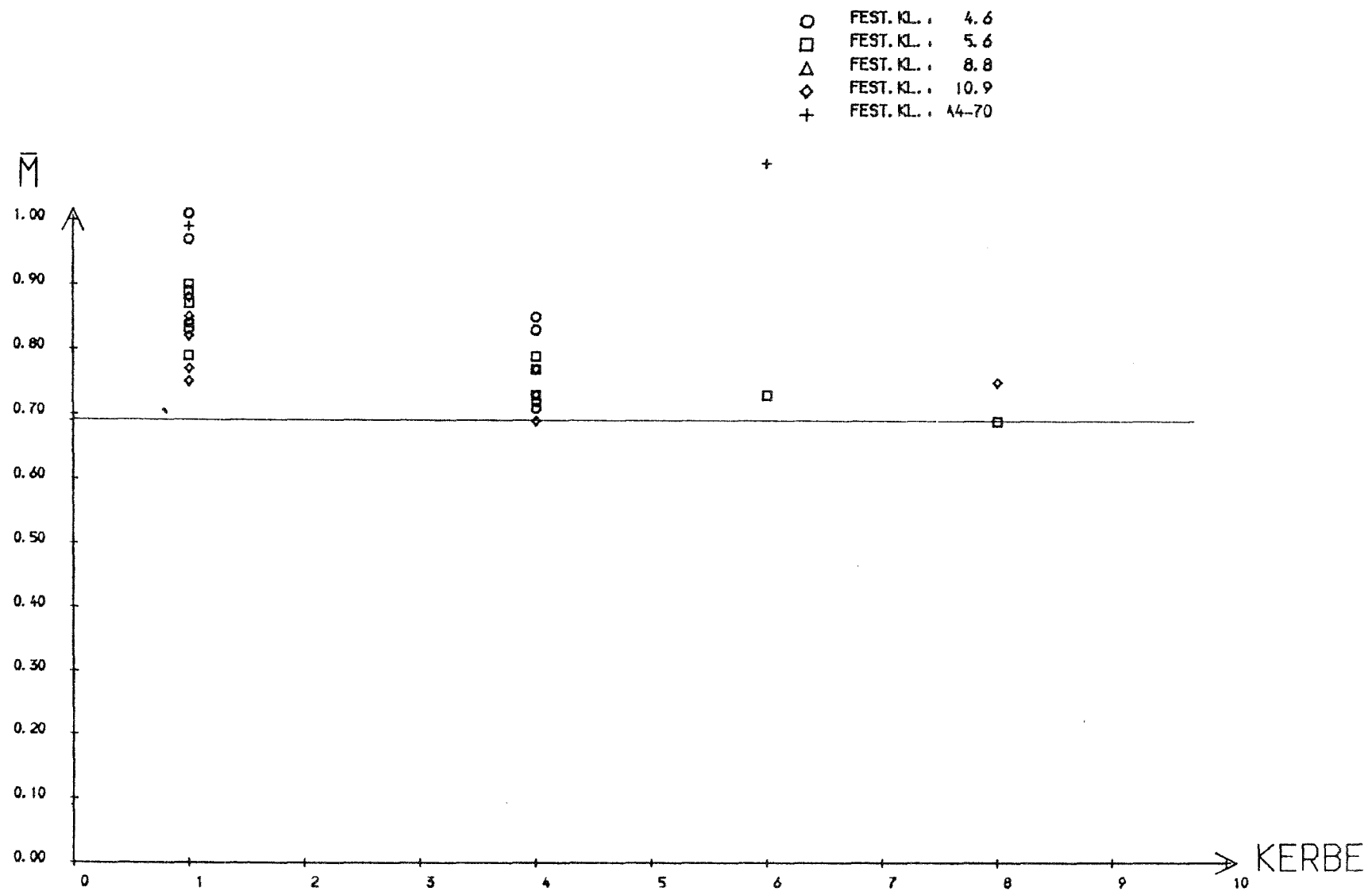
(vergl. Anlage 77)



Gemessene Grenzmomente der Schrauben M6 (auf den Schaft bezogen)
 (vergl. Anlage 69)



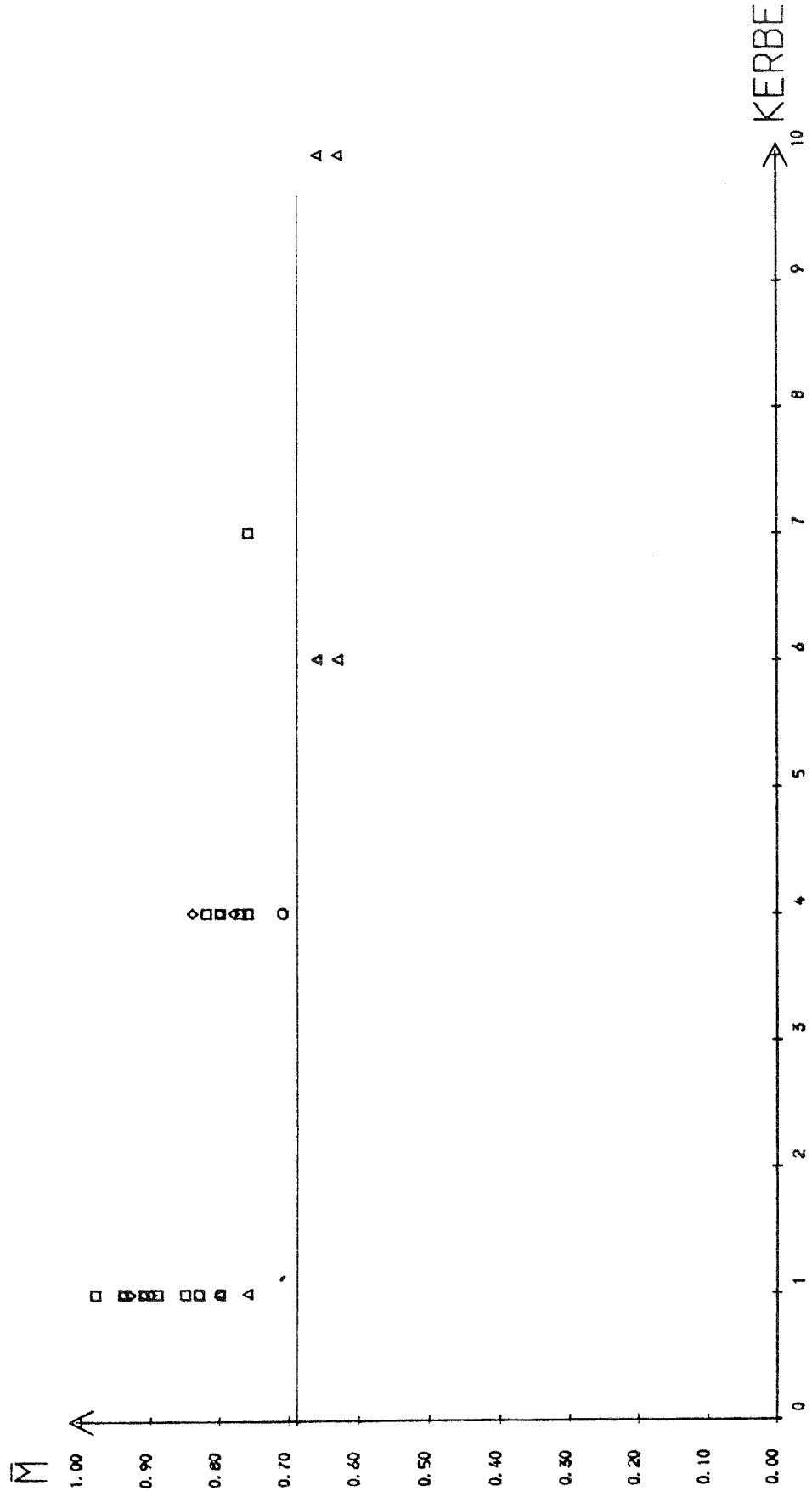
Gemessene Grenzmomente der Schrauben M12 (auf den Schaft bezogen)
(vergl. Anlagen 70-71)



Gemessene Grenzmomente der Schrauben M20 (auf den Schaft bezogen)

(vgl. Anlage 72)

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- △ FEST. KL. : 8.8
- ◇ FEST. KL. : 10.9
- ⊕ FEST. KL. : A4-70



Gemessene Grenzmomente der Schrauben M24 (auf den Schaft bezogen)
(vergl. Anlage 73)

M-Q-Interaktion für mindestens 4 freie Gewindegänge

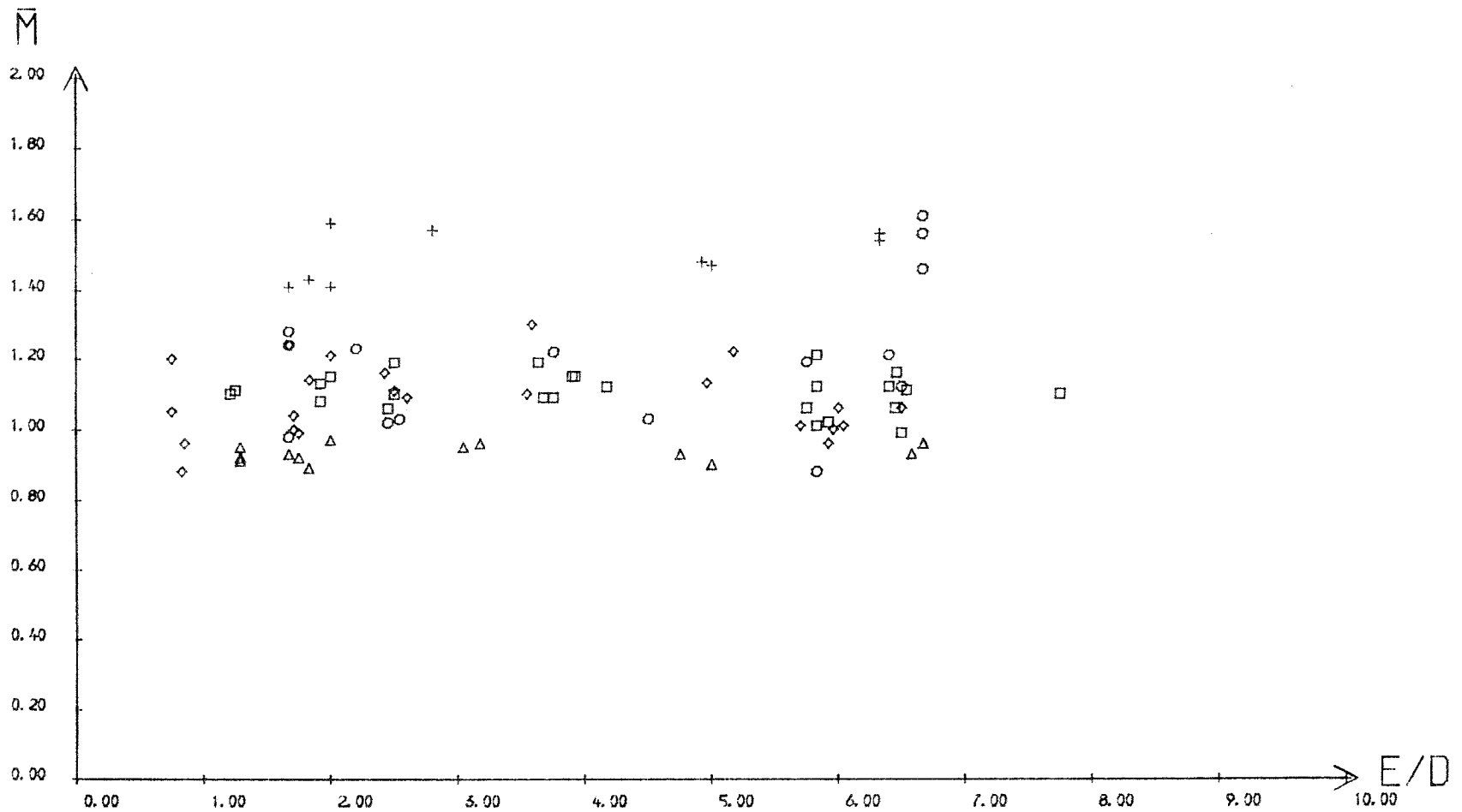
Schraube	Vers.	$M_{V,Schaft}^*$	d_{sch}^3/d_{sp}^3	$M_{V,Kerbe}^*$	e	\bar{M}	e/d
		[Nm]	[-]	[Nm]	[mm]	[-]	[-]
Dorn 4.6 6/90	369	13,3	1,67	12,4	40	1,56	6,67
	373			9,9	10	1,24	1,67
	411			12,8	40	1,61	6,67
	371			11,6	40	1,46	6,67
	374			10,2	10	1,28	1,67
Gebi A4-70 6/80	376	22,0	1,67	20,5	38	1,56	6,33
	379			18,8	11	1,43	1,83
	377			20,3	38	1,54	6,33
	380			21,0	12	1,59	2
3F8.8 6/90	382	30,6	1,67	17,0	39,5	0,93	6,58
	385			16,3	11	0,89	1,83
	383			17,6	40	0,96	6,67
	386			17,8	12	0,97	2
Fuchs 4.6 12/100	012	126	1,55	30	20	0,98	1,67
	018			99	45	1,22	3,75
	025			97	69	1,19	5,75
F.F. GraeKa 4.6 12/120	064	160	1,55	91	70	0,88	5,83
Fuchs 5.6 12/95	006	126	1,55	92	23	1,13	1,92
	016			94	47	1,15	3,92
	022			98	70	1,21	5,83
	007			374	23	1,08	1,92
	023			91	70	1,12	5,83
	008			94	24	1,15	2
F.F. 5.6 12/140	054	151	1,55	116	43,5	1,19	3,63
	136			108	15	1,11	1,25
	055			106	44	1,09	3,67
	060			103,5	69	1,06	5,75
	056			106	45	1,09	3,75
	061			99,4	71	1,02	5,92
	062			98	70	1,01	5,83
Gebi A4-70 12/120	351	205	1,55	186	20	1,41	1,67
	354			196	59	1,48	4,92
	350			187	24	1,41	2
	355			195	60	1,47	5
Peiner 8.8 12/120	345	276	1,55	160	60	0,90	5
	348			164	21	0,92	1,75
	346			165	57	0,93	4,75
	349			160	20	0,93	1,67

Schraube	Vers.	$M_{V,Schaft}^*$	d_{sch}^3/d_{sp}^3	$M_{V,Kerbe}^*$	e	\bar{M}	e/d
		[Nm]	[-]	[Nm]	[mm]	[-]	[-]
R.F. 10.9 12/100	098	334	1,55	225	20,5	1,04	1,71
	102			214,5	71,5	1,00	5,96
	099			214	21	0,99	1,75
	103			217,5	72,5	1,01	6,04
	100			215	20,5	1,00	1,71
	104			206	71	0,96	5,92
126	189	10	0,88	0,83			
Peiner 10.9 12175	117	283,5	1,55	237	43	1,30	3,58
Peiner 10.9 12190	119	301	1,55	236	62	1,22	5,17
	124			203	9	1,05	0,75
	121			222	22	1,14	1,83
	125			233	9	1,20	0,75
	122			240	20	1,24	1,67
Fuchs 4.6 20/160	042	553	1,45	461	128	1,21	6,4
	045			471	44	1,23	2,2
R.F. 4.6 20/200	079	556,5	1,45	430	130	1,12	6,5
R.F. 4.6 20/140	077	555	1,45	392	49	1,02	2,45
R.F. 5.6 20/140	087	785	1,45	573	49	1,06	2,45
R.F. 5.6 20/220	081	797	1,45	614,4	128	1,12	6,4
	085			631	78	1,15	3,9
	082			580,5	129	1,06	6,45
	083			546	130	0,99	6,5
VEFE R4-70 20/140	364	845	1,45	918	56	1,57	2,8
R.F. 10.9 20/115	106	1545,5	1,45	1073	74	1,01	5,7
R.F. 10.9 20/200	108	1618	1,45	1183	130	1,06	6,5
	141			1240	50	1,11	2,5
	142			1212	52	1,09	2,6
Peiner 10.9 20/160	146	1610	1,45	1176	120	1,06	6,0
	149			1069	17	0,96	0,85

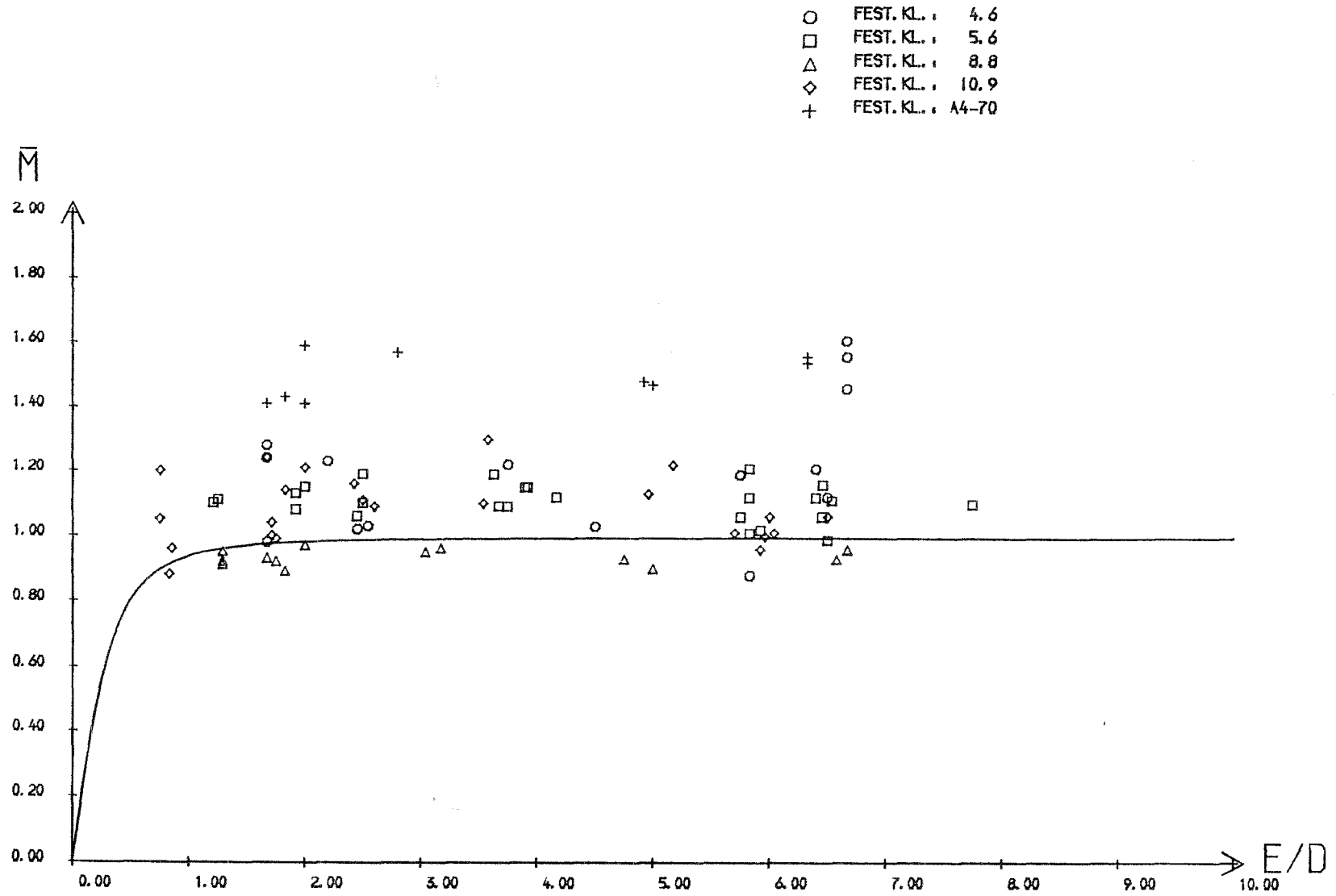
Schraube	Vers.	$M_{v,Schaft}^*$	d_{sch}^3/d_{sp}^3	$M_{v,Kerbe}^*$	e	\bar{M}	e/d
		[Nm]	[-]	[Nm]	[mm]	[-]	[-]
R.F. 4.6 241160	069	1044	1,45	744	61	1,03	2,54
R.F. 4.6 241180	067	1249,5	1,45	886	108	1,03	4,5
Fuchs 5.6 241190	029 091 092	1009	1,45	806 780 828	155 100 60	1,16 1,12 1,19	6,46 4,17 2,5
R.F. 5.6 241170	074	1247	1,45	942	60	1,10	2,5
R.F. 5.6 241280	071 073 134	1226	1,45	942 930 931	157 186 29	1,11 1,10 1,10	6,54 7,75 1,21
Nedur 8.8 241150	358 391 393 359 392	2616	1,45	1725 1717 1652 1715 1643	76 31 31 73 31	0,96 0,95 0,92 0,95 0,91	3,17 1,29 1,29 3,04 1,29
R.F. 10.9 241140	110	2565	1,45	2053	58	1,16	2,42
R.F. 10.9 241235	112	2703	1,45	2106	119	1,13	4,96
Peiwer 10.9, 24195	131	2293	1,45	1920	48	1,21	2

(vergl. Anlagen 81, 82)

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- △ FEST. KL. : 8.8
- ◇ FEST. KL. : 10.9
- + FEST. KL. : A4-70



ABH. V. D. EXZENTRIZITAET (AUF SCHAFTVERSUCHE BEZOGEN)
(vergl. Anlagen 78-80)



ABH. V. D. EXZENTRIZITAET (AUF SCHAFTVERSUCHE BEZOGEN)
(vergl. Anlagen 78-80)

M-N-Interaktion im Gewindebereich (M 12)

$$\bar{M} = \frac{M_v^*}{M_v^*, \text{Kerbe}} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N_v^*}{N_u}$$

(Vergl. Anlagen 89, 92, 95)

Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$	$M_{v, Sch}^*$	N_u	0°				30°				60°					
	0°	30°	60°				M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}		
Fuchs 4.6 M12x100	12	155	167	1,56	124	36,1	80	1,01	0	0	79	1,00	2,25	0,06	78,5	0,99	2,6	0,07		
	18	157					99	1,25	0	0	83	1,05	1,43	0,04						
	25	161					97	1,22	0	0	91	1,15	0,9	0,025						
R.F. Graeka 4.6 M12x120	64	173		1,56	160	46,4	91	0,89	0	0	88	0,86	0,9	0,02						
Fuchs 5.6 M12x95	6	163	169	1,56	126	46,2	92	1,14	0	0	102	1,26	0,95	0,02	71	0,88	2,39	0,05		
	7	165					87	1,08	0	0	105	1,30	1,90	0,04						
	8						94	1,17	0	0										
	16						94	1,17	0	0										
	22						98	1,22	0	0										
	23						91	1,13	0	0										
R. Friedberg 5.6 M12x140	54	177		1,56	151	47,4	116	1,20	0	0	105	1,09	3,1	0,065						
	55						106	1,10	0	0										
	56						106	1,10	0	0										
	60						104	1,08	0	0										
	61						99,4	1,03	0	0										

M-N-Interaktion im Gewindebereich (M 12)

$$\bar{M} = \frac{M_{v, Kerbe}^*}{M_{v, Schaft}^*} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N_v^*}{N_u}$$

Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$	$M_{v, Sch.}^*$	N_u	0°				30°				60°				
	0°	30°	60°				M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	
	62																		
	136																		
R. Friedberg 10.9 M 12x100	098	188	181	1,56	334	87,8	225	1,01	0	0	196	0,92	2,0	0,02	168	0,79	5,72	0,065	
	099	189	182				214	1,04	0	0	202	0,94	2,0	0,02	168	0,79	5,72	0,065	
	100	190	183				215	1,12	0	0	204	0,95	2,05	0,02	167	0,78	5,54	0,06	
	103						218	1,02	0	0									
	104						206	0,96	0	0									
M 12x70	096	196		1,56	325	90,0	230	1,11	0	0	235	1,13	6,65	0,07					
Peiner 10.9 M 12x90	119	192	185	1,56	301	91,7	236	1,22	0	0	213	1,10	2,12	0,02	176	0,91	6,06	0,07	
	121		186				222	1,15	0	0					168	0,87	5,80	0,06	
	122						240	1,25	0	0									
	124						203	1,05	0	0									
	125						233	1,21	0	0									
M 12x75	117			1,56	284	96,0	237	1,30	0	0									

M-N-Interaktion im Gewindebereich (M 20)

$$\bar{M} = \frac{M^*_{V, Kerbe}}{M^*_{V, Schaft}} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N^*_{V}}{N_u}$$

(vergl. Anlagen 90, 93, 95)

Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$	$M^*_{V, Sch}$	N_u	0°				30°				60°				
	0°	30°	60°				M^*_V	\bar{M}	N^*_V	\bar{N}	M^*_V	\bar{M}	N^*_V	\bar{N}	M^*_V	\bar{M}	N^*_V	\bar{N}	
Fuchs 4.6	42	200	207	1,45	553	105,2	461	1,21	0	0	478	1,25	2,75	0,03	344	0,90	9,53	0,09	
M20x160	45	201	208				471	1,23	0	0	438	1,15	2,5	0,02	314	0,82	8,31	0,08	
R. Friedb. 4.6	77			1,45	555	101,7	392	1,02	0	0									
M20x140																			
R. Friedb. 4.6	79	220		1,45	556	98,8	403	1,05	0	0	424	1,11	2,6	0,03					
M20x200																			
R. Friedb. 5.6	87			1,45	785	142	573	1,06	0	0									
M20x140																			
R. Friedb. 5.6	081	217	211	1,45	797	153	614	1,12	0	0	617	1,12	3,75	0,025	499	0,91	8,40	0,055	
	82	218					581	1,06	0	0	587	1,07	3,50	0,02					
M20x220	83	228					546	0,99	0	0	585	1,06	7,15	0,05					
	85	234					631	1,15	0	0	596	1,08	11,65	0,08					
R. Friedb. 10.9	108	222	251	1,45	1618	279	1183	1,06	0	0	1190	1,07	7,10	0,025	969	0,87	16,6	0,06	
	141	230					1240	1,11	0	0	1112	1,00	13,35	0,05					
M20x200	142	237					1212	1,09	0	0	1014	0,91	20,45	0,07					
M20x115	106	248					1073	1,01	0	0					892	0,84	26,4	0,10	

M-N-Interaktion im Gewindebereich (M 20)

$$\bar{M} = \frac{M_{v, Kerbe}^*}{M_{v, Schaft}^*} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N_v^*}{N_u^*}$$

Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch}^3}{d_{Sp}^3}$	$M_{v, Sch}^*$	N_u	0°				30°				60°				
	0°	30°	60°				M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	
	Peiner 10.9 M20x100		232					1,45	1748	293						1185	0,98	15,35	0,05
Peiner 10.9 M20x160	146	226	246	1,45	1577	264	1176	1,08	0	0	1089	1,00	6,50	0,025	863	0,79	24,4	0,09	
	149						1069	0,98	0	0									

$\bar{M} = \bar{N}$ -Interaktion im Gewindebereich ($\bar{M} = \bar{N}$)

$$\bar{M} = \frac{M_{V, Kerbe}^*}{M_{V, Schaft}^*} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N_V^*}{N_U}$$

(vergl. Anlagen 91, 94, 95)

Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$	$M_{V, Sch.}^*$	N_U	0°				30°				60°			
	0°	30°	60°				M_V^*	\bar{M}	N_V^*	\bar{N}	M_V^*	\bar{M}	N_V^*	\bar{N}	M_V^*	\bar{M}	N_V^*	\bar{N}
A. Friedb. 4.6 M24x180	067	280		1,45	1250	166	886	1,03	0	0	818	0,95	11,85	0,07				
A. Friedb. 4.6 M24x160	069			1,45	1044	158	744	1,09	0	0								
Fuchs 5.6 M24x190	29	256		1,45	1009	179,5	806	1,16	0	0					597	0,86	15,6	0,09
	91						780	1,12	0	0								
	92						828	1,19	0	0								
A. Friedb. 5.6 M24x170	74	282		1,45	1247	202	942	1,09	0	0	904	1,05	13,7	0,07				
		283									898	1,04	13,3	0,065				
A. Friedb. 5.6 M24x280	134	270	258	1,45	1226	196	931	1,10	0	0	976	1,15	4,90	0,025	660	0,78	18,4	0,09
	71	271					942	1,11	0	0	852	1,01	4,15	0,02				
	73	272					930	1,10	0	0	858	1,01	4,00	0,02				
		275									919	1,09	8,10	0,04				
		276									891	1,05	7,75	0,04				
		277									869	1,03	8,10	0,04				

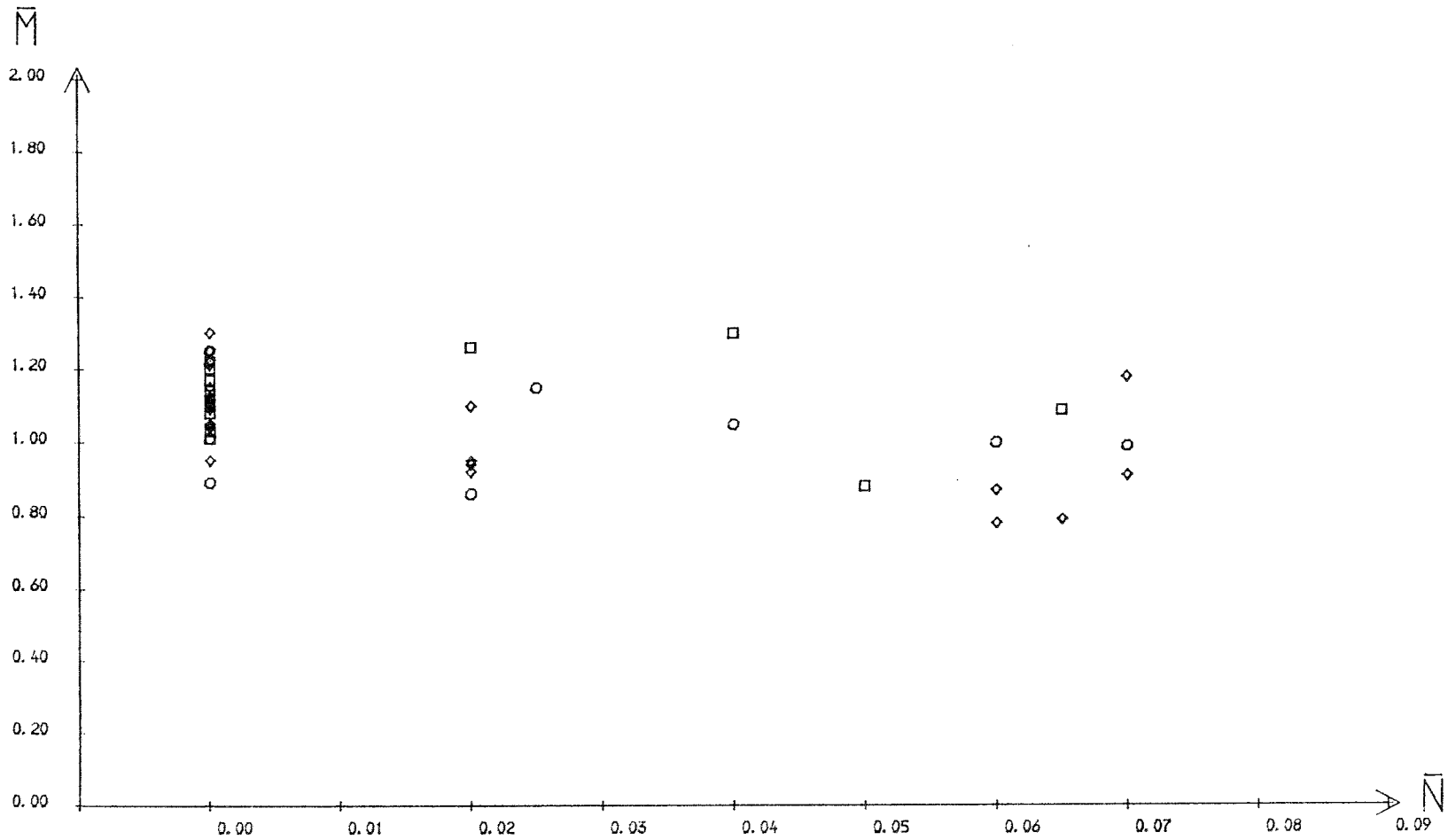
M-N-Interaktion im Gewindebereich (M 24)

$$\bar{M} = \frac{M_{v, Kerbe}^*}{M_{v, Schaft}^*} \cdot \frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$$

$$\bar{N} = \frac{N_v^*}{N_u}$$

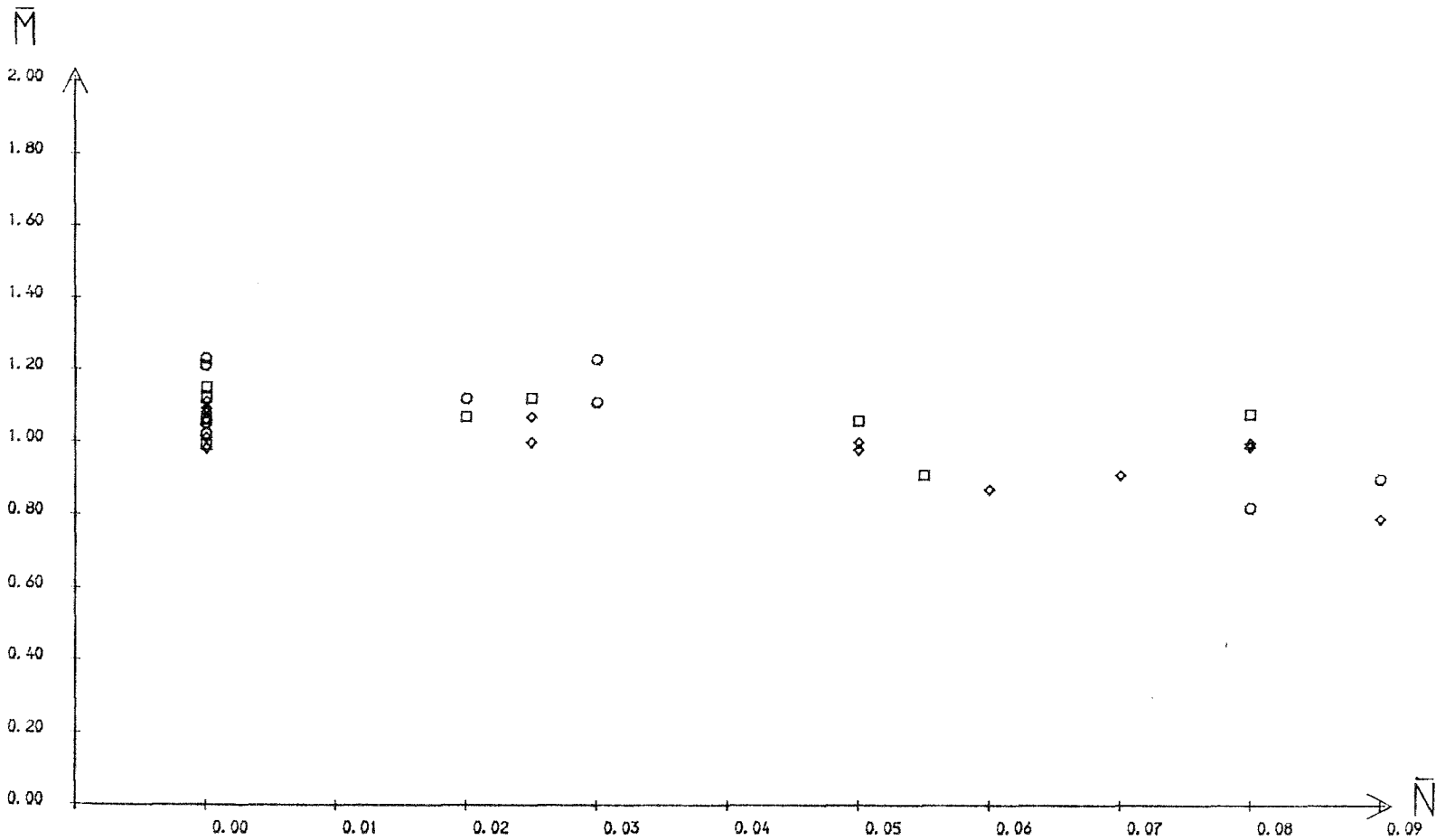
Schraube	Versuch			$\frac{d_{Sch.}^3}{d_{Sp.}^3}$	$M_{v, Sch}^*$	N_u	0°				30°				60°			
	0°	30°	60°				M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}	M_v^*	\bar{M}	N_v^*	\bar{N}
F. Friedb. 10.9 M24x140	110	284		1,45	2565	381	2053	1,16	0	0	1994	1,13	32,5	0,085				
F. Friedb. 10.9 M24x235	112	268	259	1,45	2703	402	2106	1,13	0	0	1939	1,04	10,2	0,025	1466	0,79	39,5	0,10
Peiner 10.9 M24x95	131	285		1,45	2293	372	1920	1,21	0	0	1975	1,25	30,65	0,08				
Peiner 10.9 M24x190		266	262	1,45	2572	412					2005	1,13	10,3	0,025	1478	0,83	39,8	0,10

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- ◇ FEST. KL. : 10.9



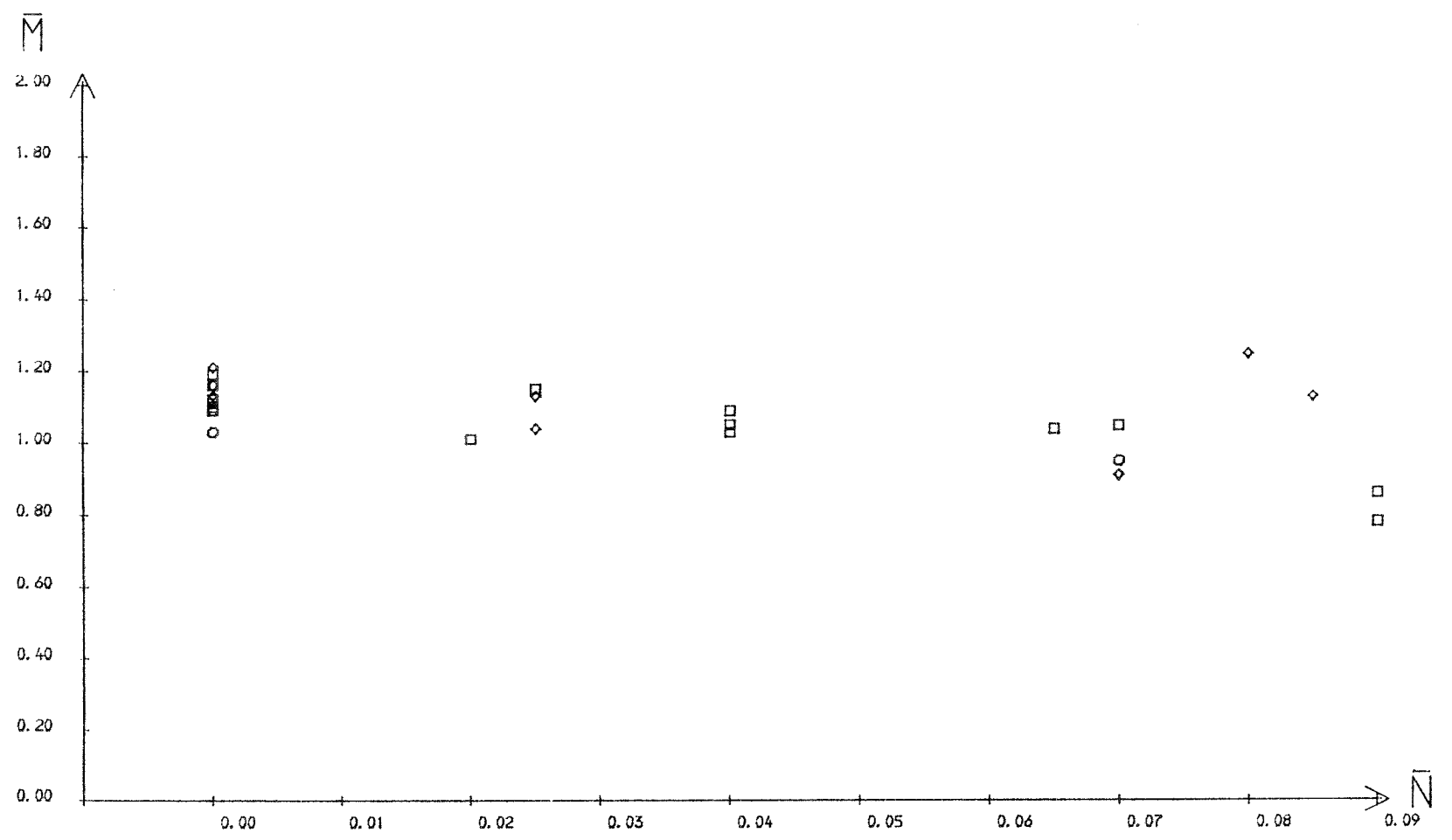
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M12 IM GEWINDEBEREICH

○ FEST. KL. : 4.6
□ FEST. KL. : 5.6
◇ FEST. KL. : 10.9



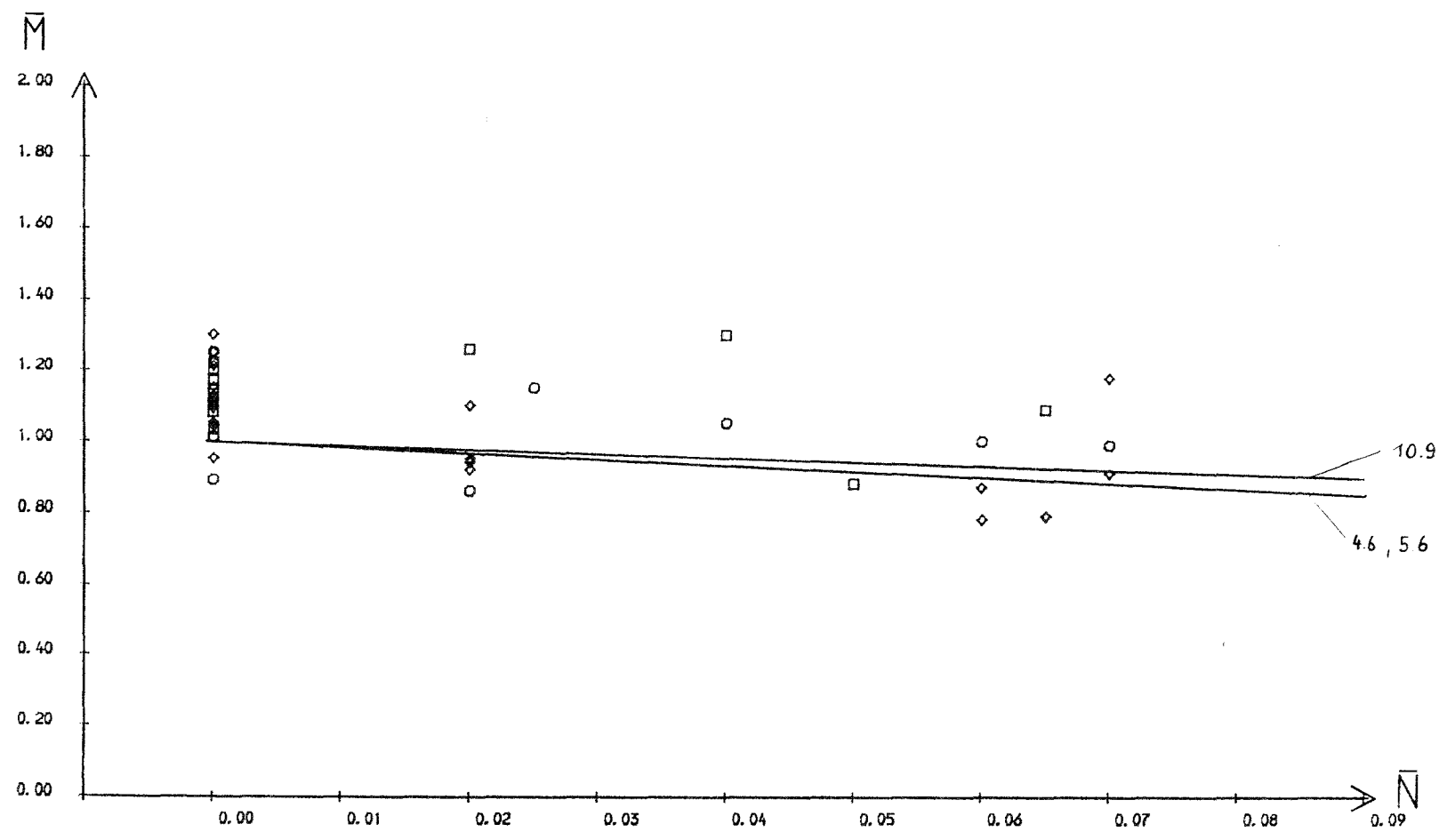
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M20 IM GEWINDEBEREICH

○ FEST. KL. : 4.6
□ FEST. KL. : 5.6
◇ FEST. KL. : 10.9



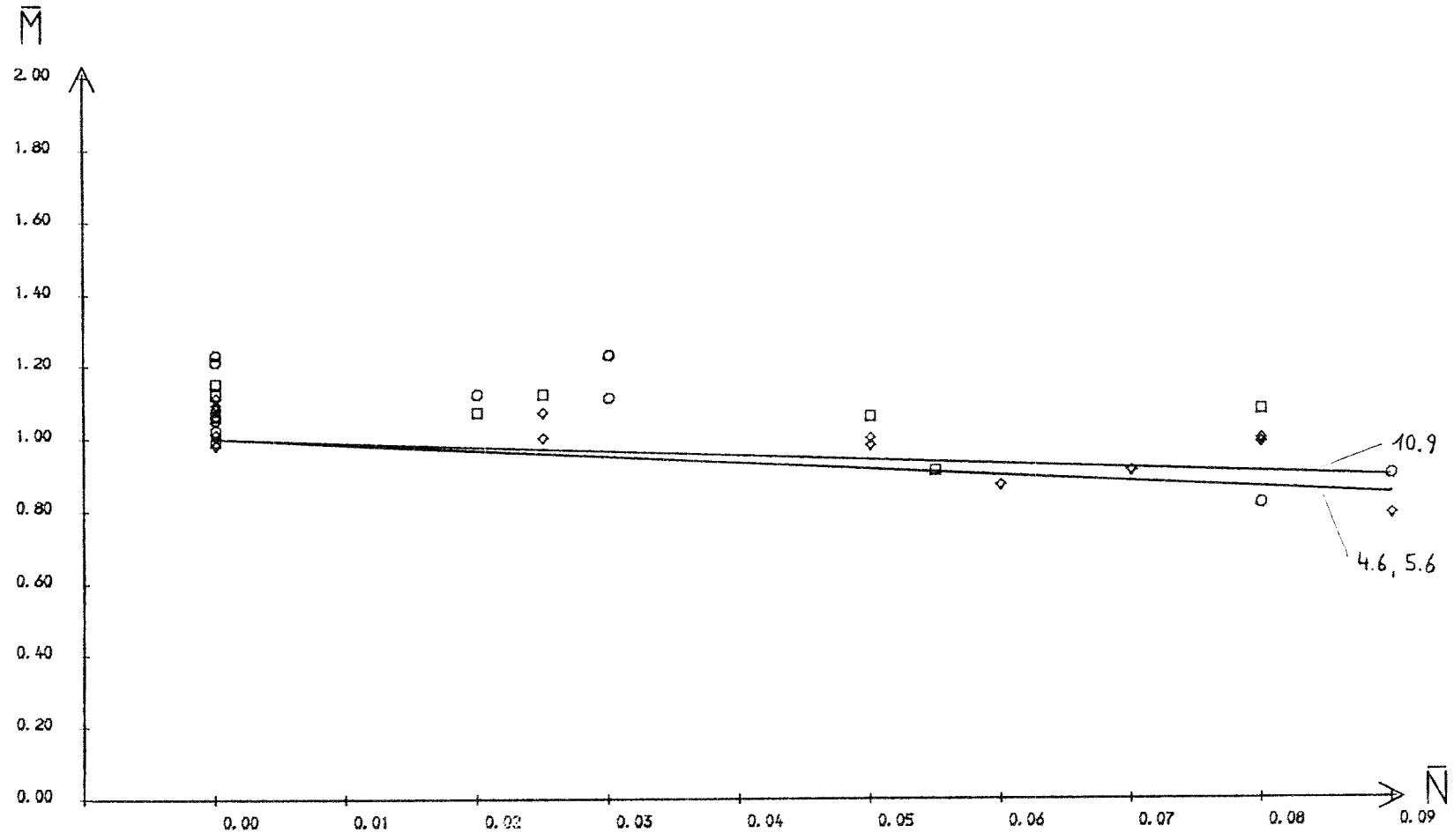
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M24 IM GEWINDEBEREICH

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- ◇ FEST. KL. : 10.9



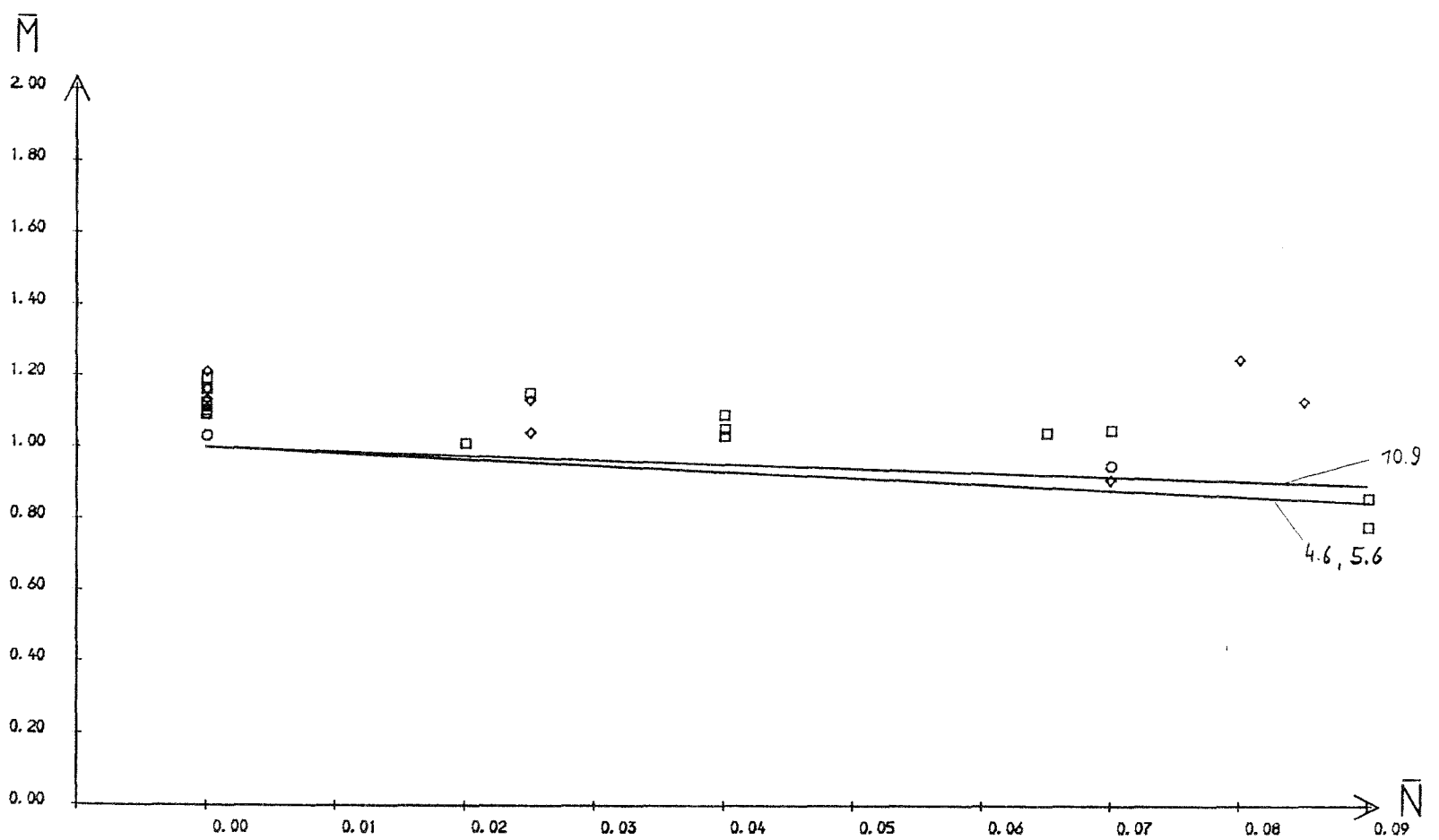
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M12 IM GEWINDEBEREICH

○ FEST. KL. : 4.6
□ FEST. KL. : 5.6
◇ FEST. KL. : 10.9



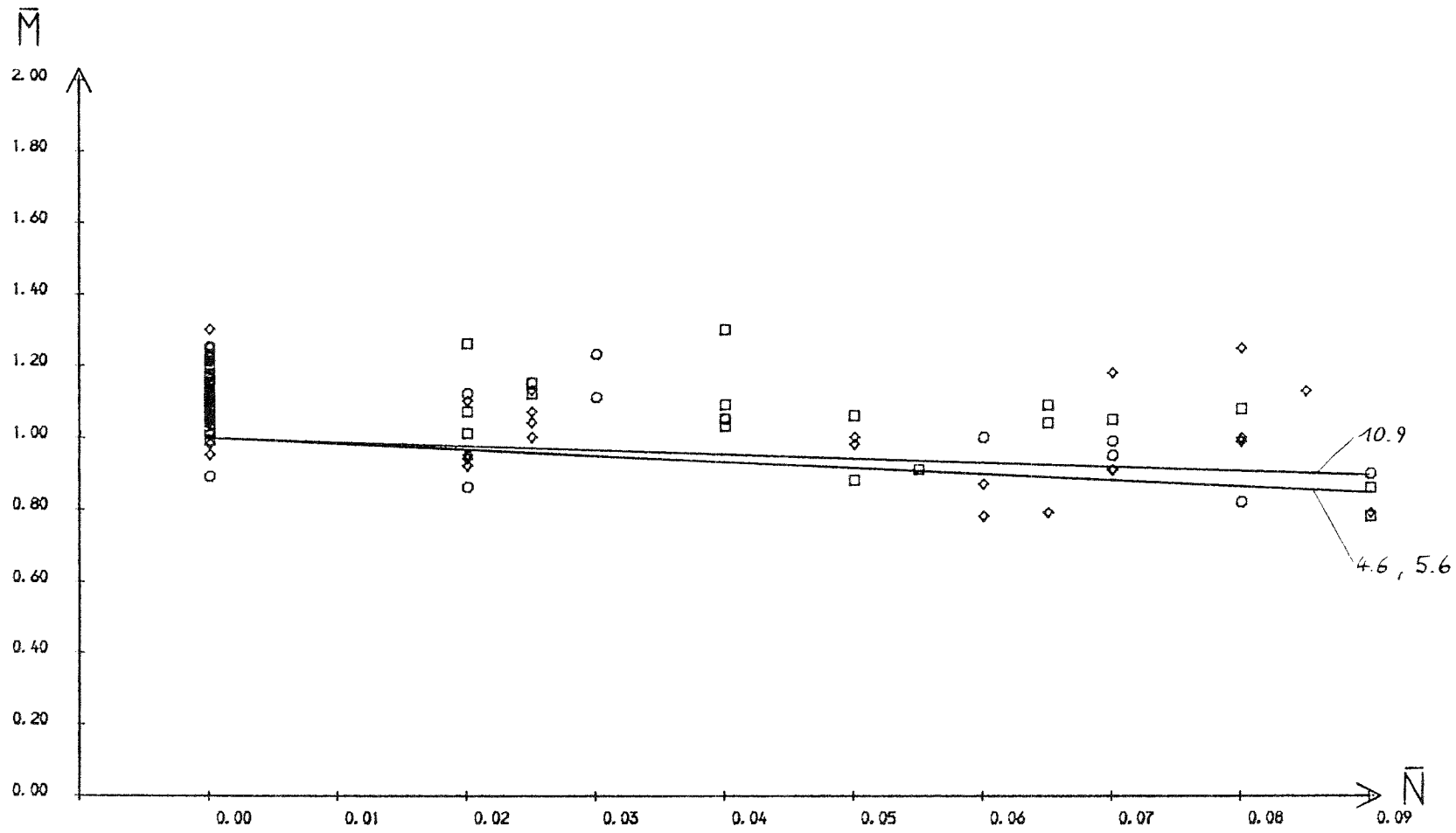
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M20 IM GEWINDEBEREICH

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- ◇ FEST. KL. : 10.9

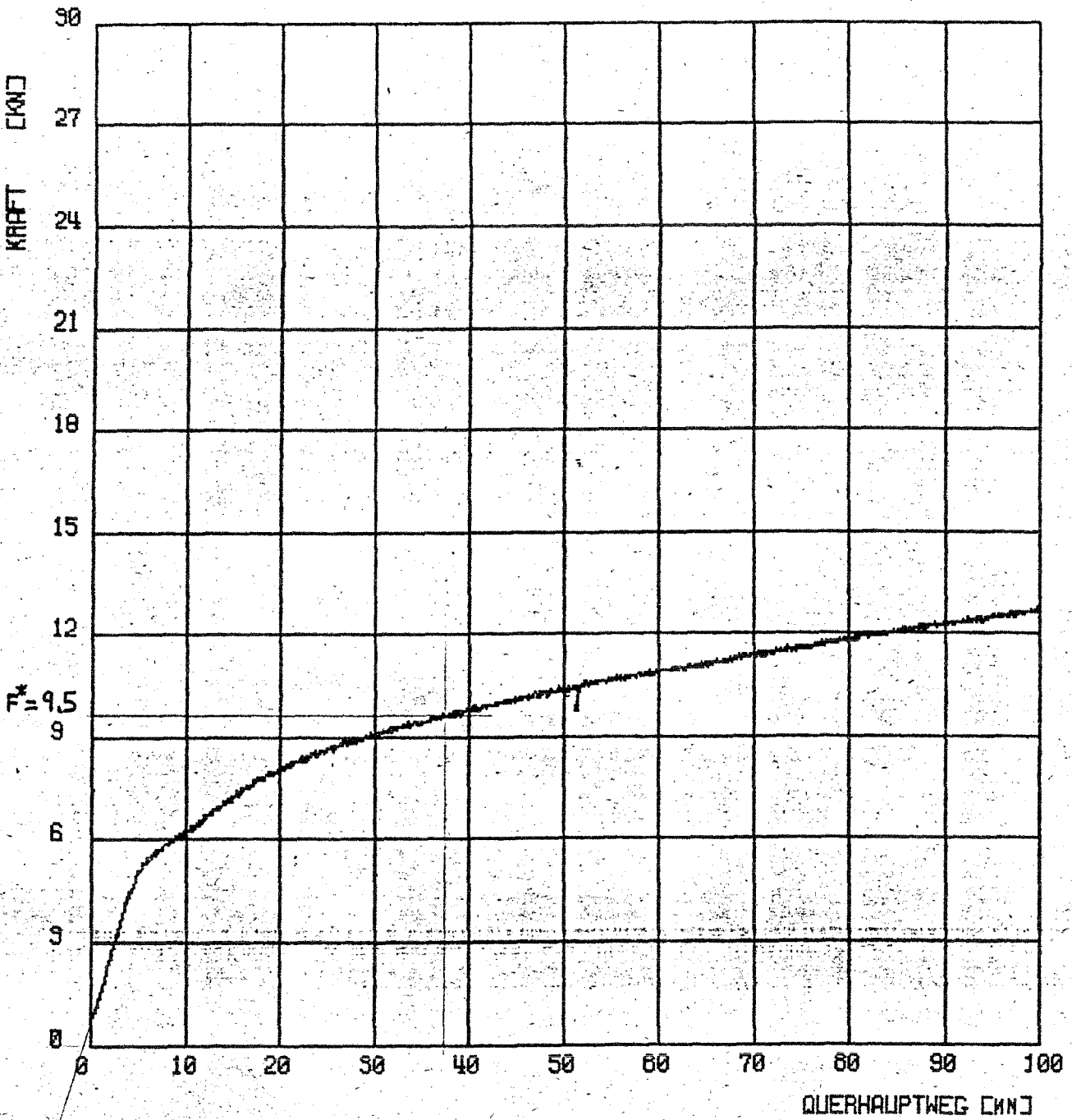


MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN M24 IM GEWINDEBEREICH

- FEST. KL. : 4.6
- FEST. KL. : 5.6
- ◇ FEST. KL. : 5.9



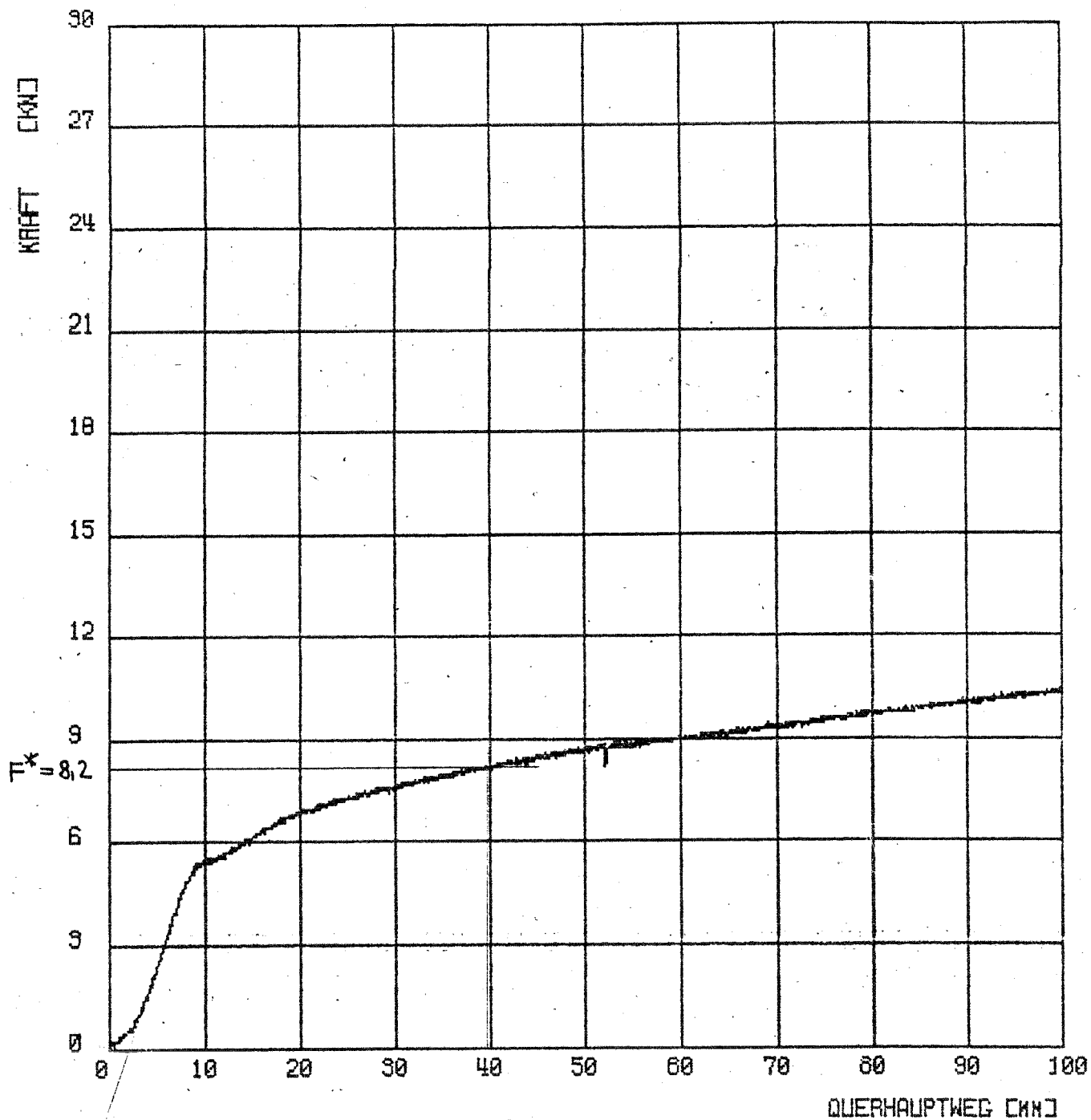
MN-INTERAKTION DER SCHRAUBEN IM GEWINDEBEREICH



VERSUCH: FRIEDBERG-D24--4.6 , PROBE: AC1065

Exz.: 109mm

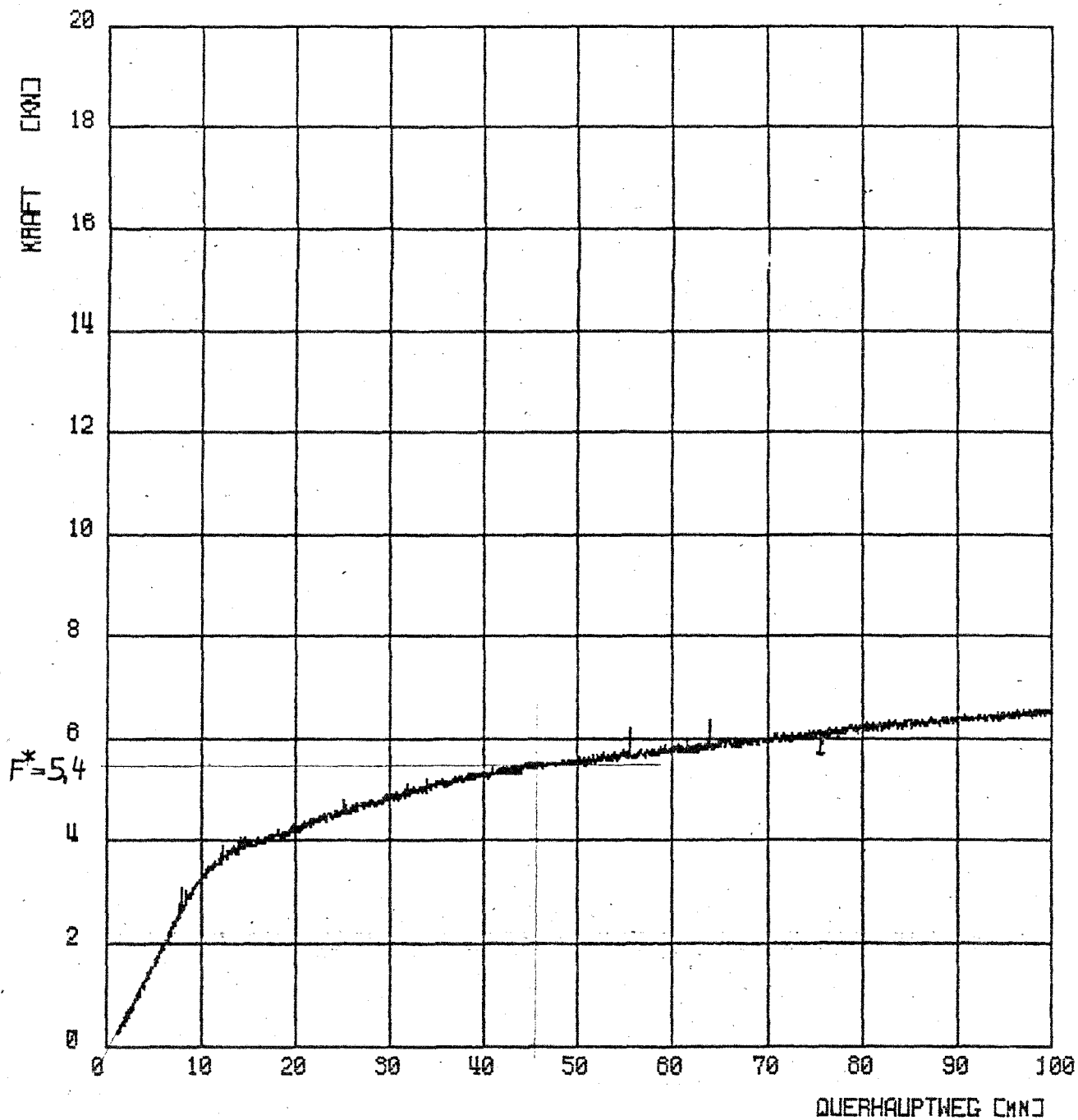
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG--024--4.5 , PROBE: AC1067

Exz.: 108mm

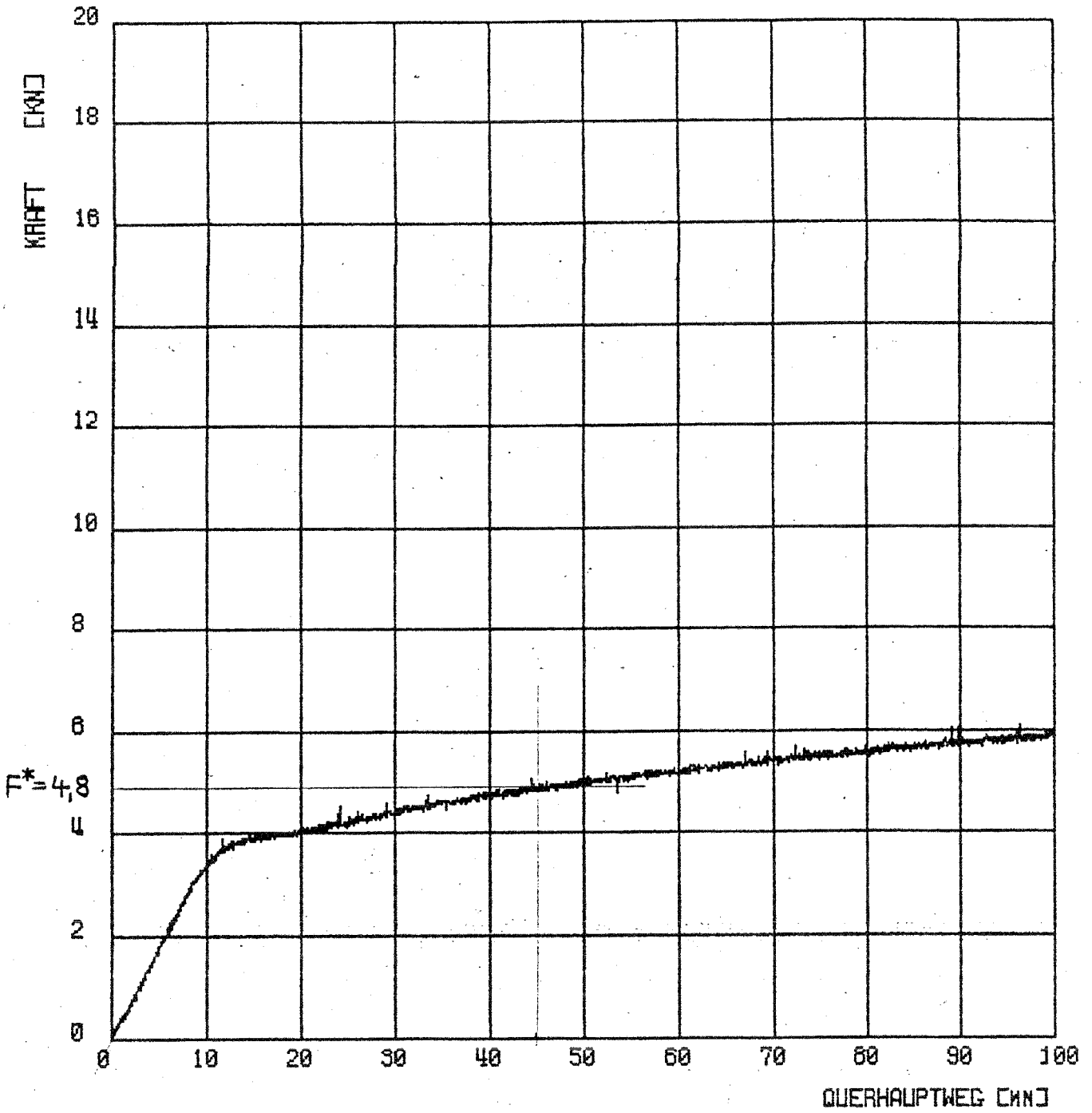
E. : 4.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG--020--5.5 , PROBE: AB2080

Exz.: 129mm

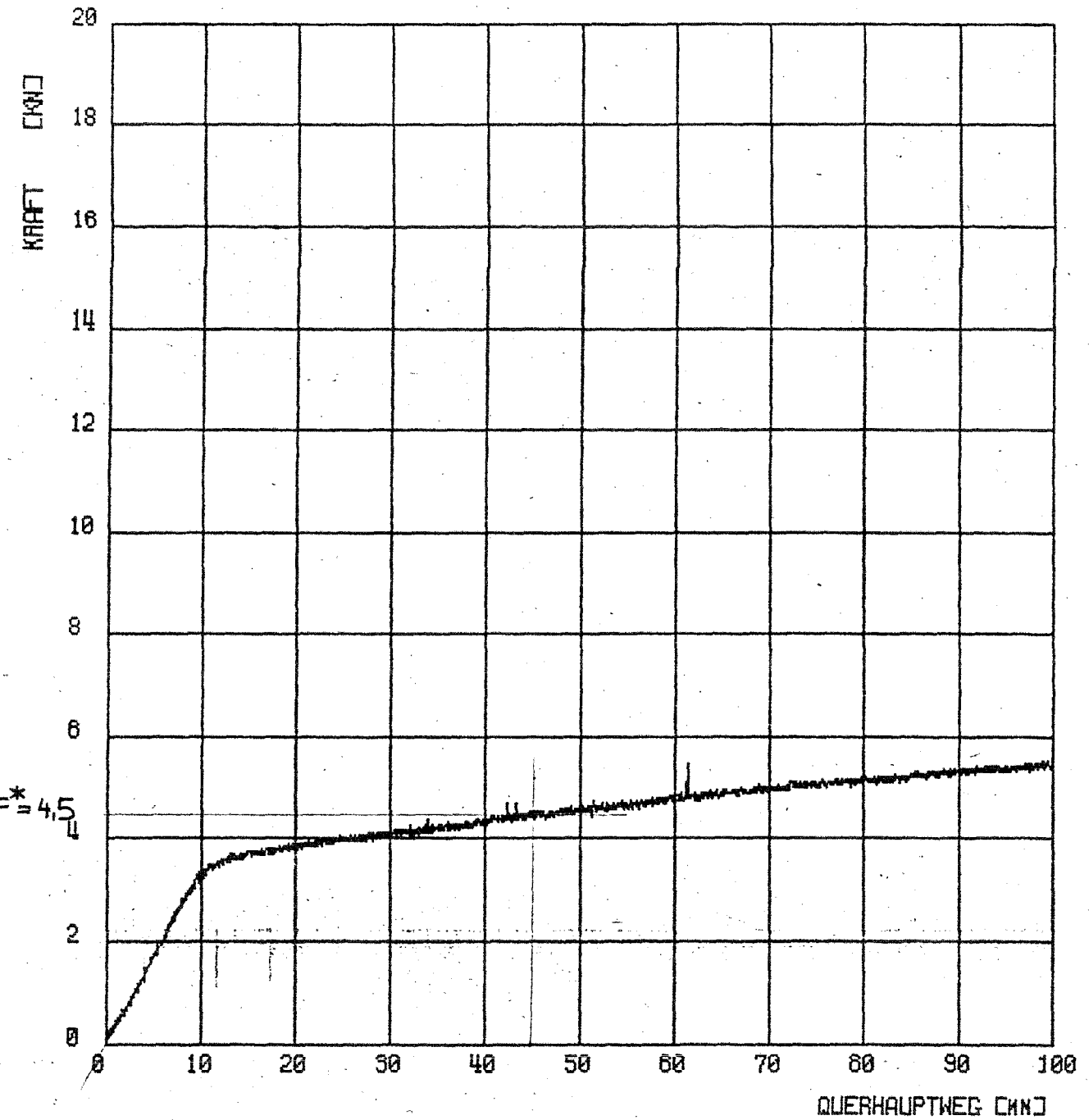
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG--020--5.6 , PROBE: AB2081

Exz.: 128mm

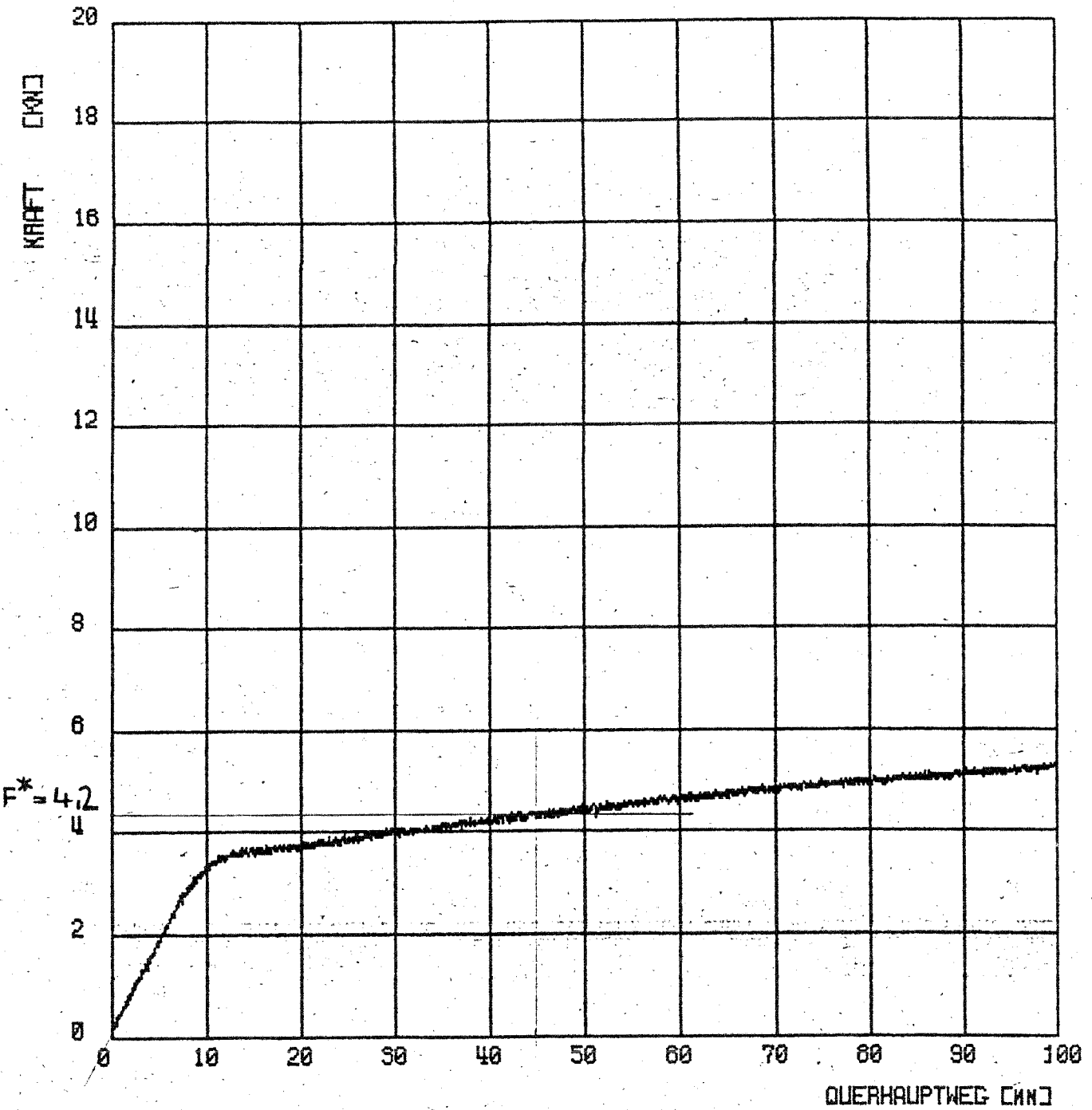
E. : 4.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG--020--5.5 , PROBE: AB2082

Exz.: 129mm

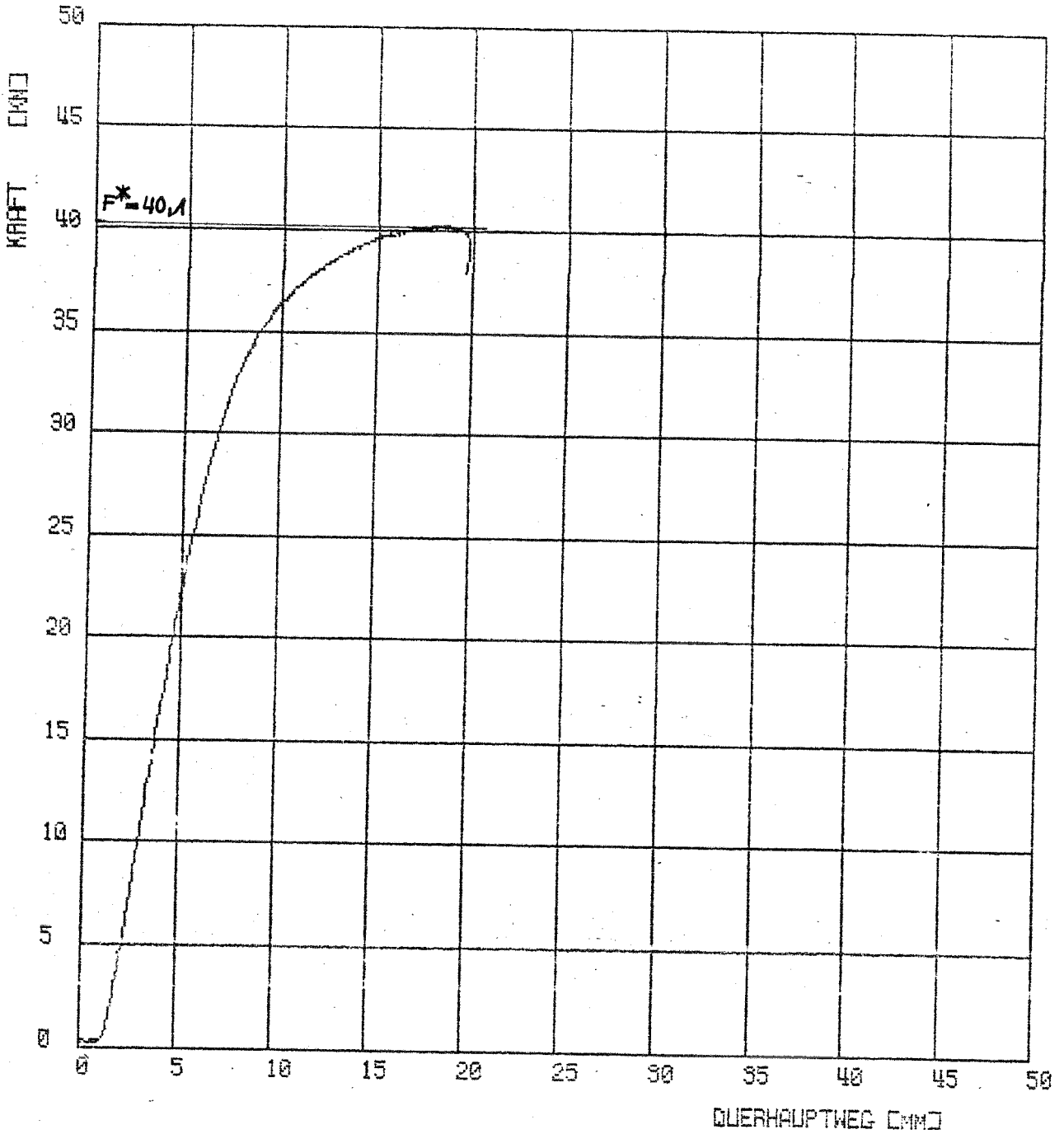
E. : 6.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG--D20--5.6 , PROBE: AB2083

Exz.: 130mm

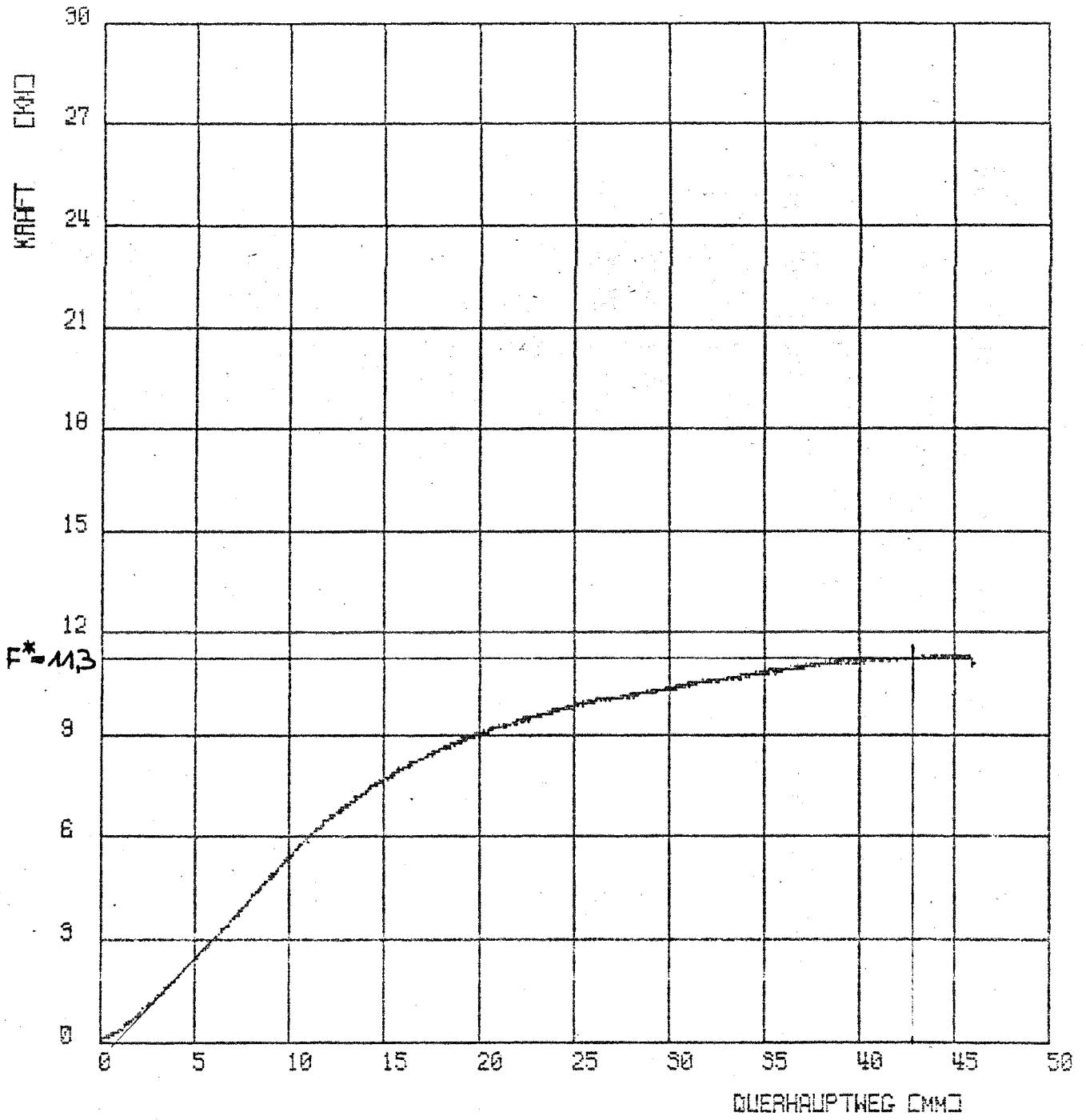
E. : 8.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG-M24-10.5 . PROBE: RC3105

Exz.: 58mm

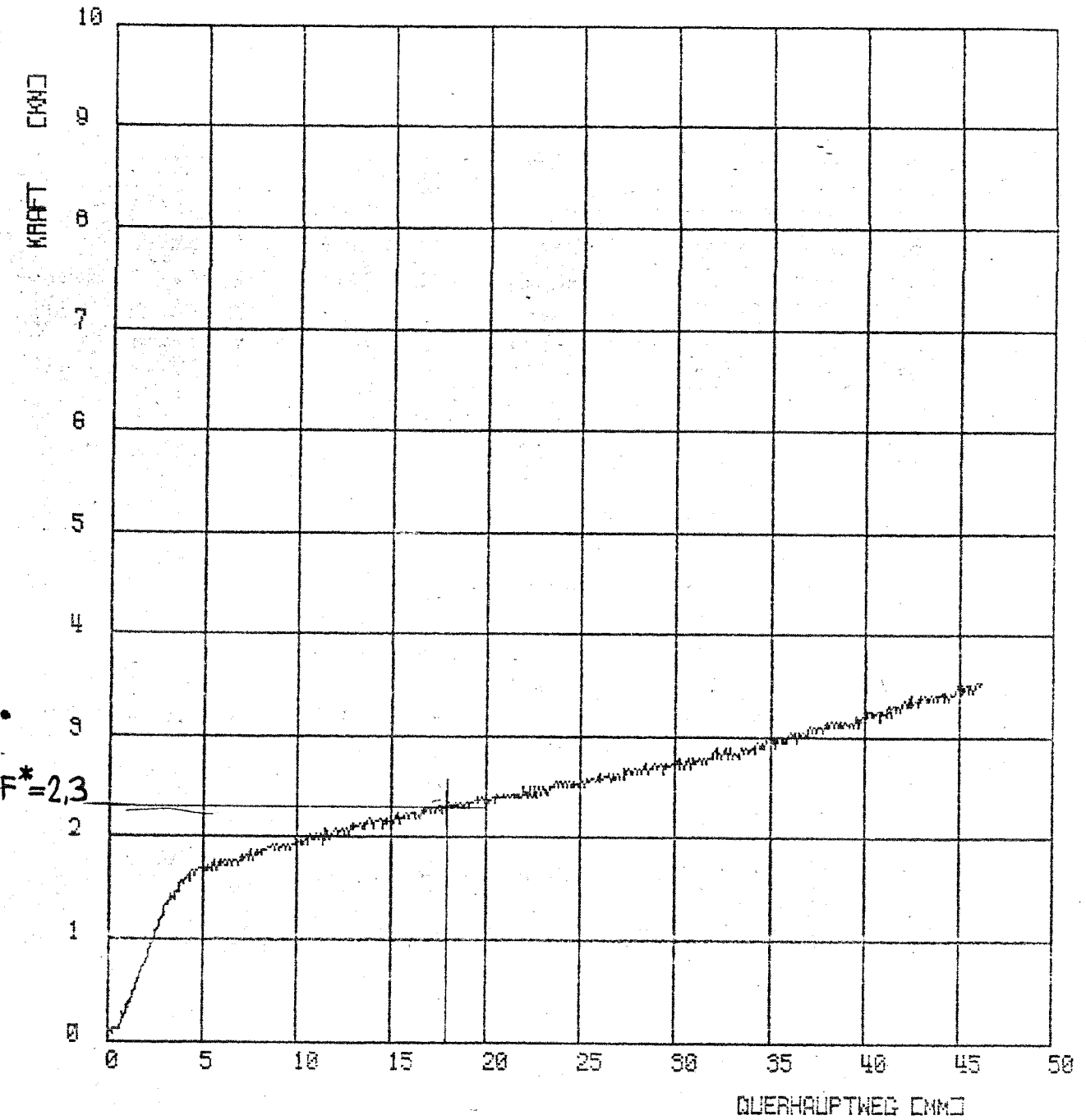
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FEINER-M20-10.8 , PROBE: P63145

Exz.: 120mm

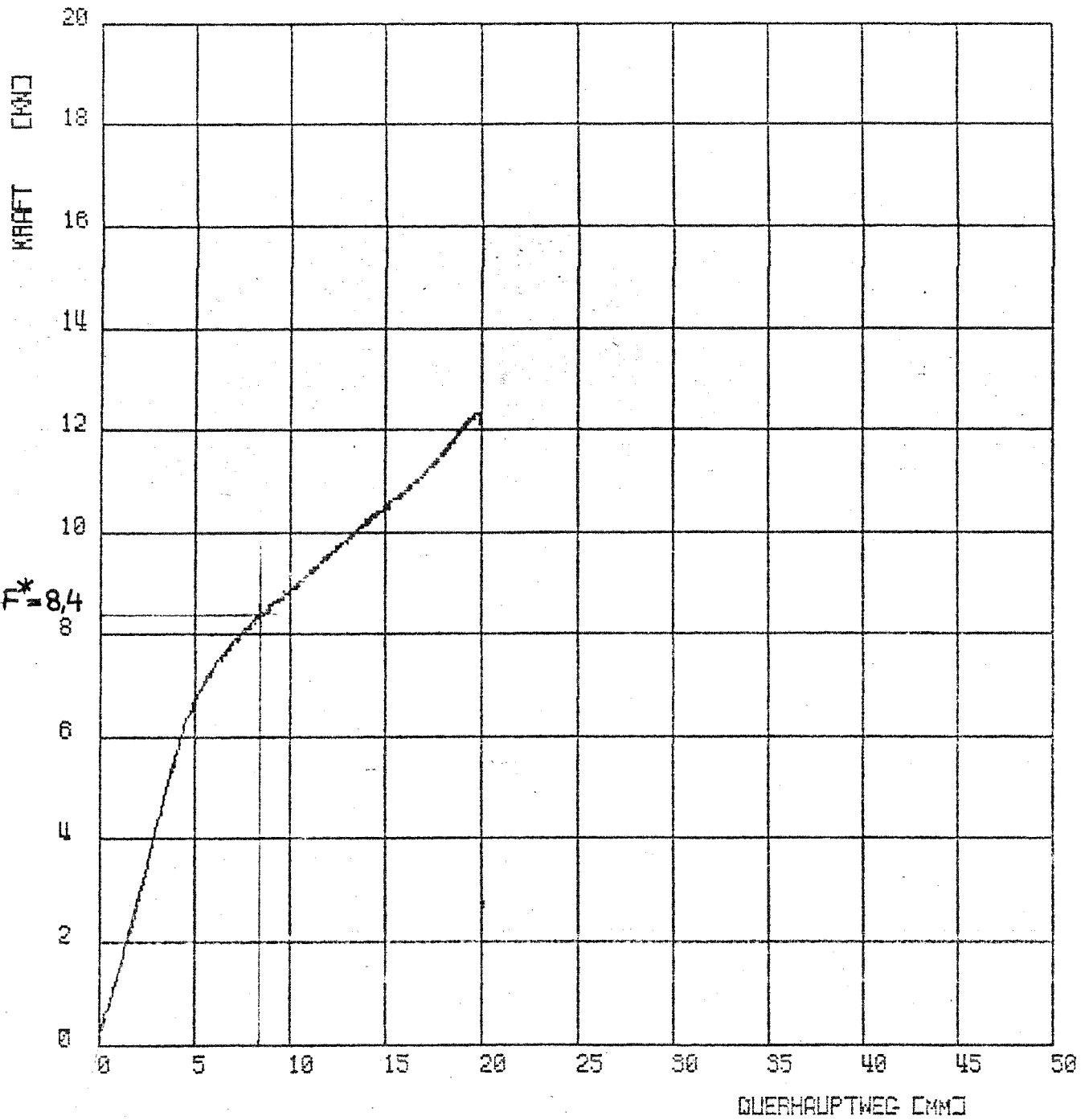
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG-M12-S.6 , PROBE: RA2174

Exz.: 59.3/30°

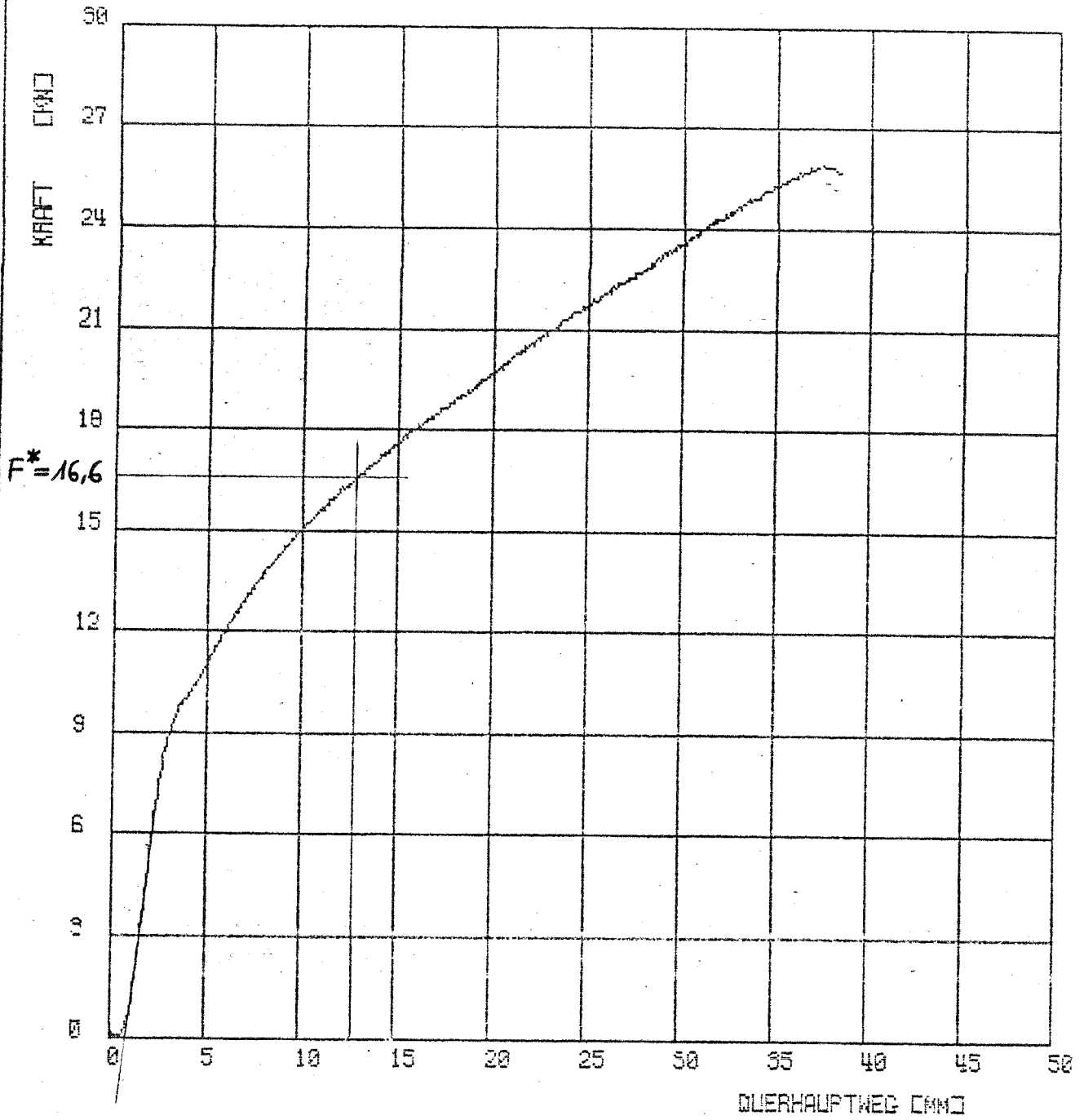
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FEINER-M12-10.9 , PROBE: FA3104

Exz.: 56/60°

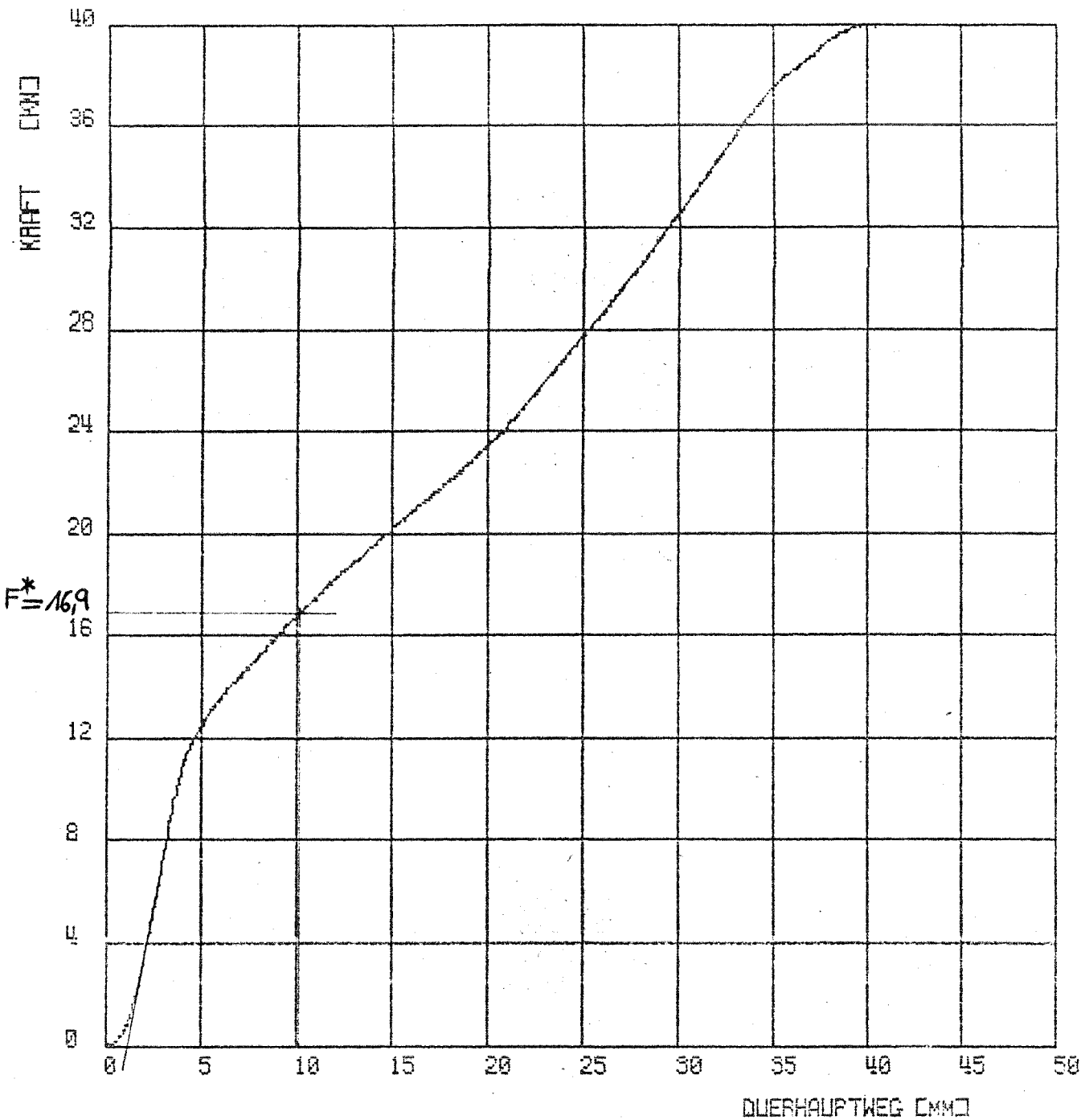
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FUCHS-M20-5.6 . PROBE: FE2203

Exz.: 42/30°

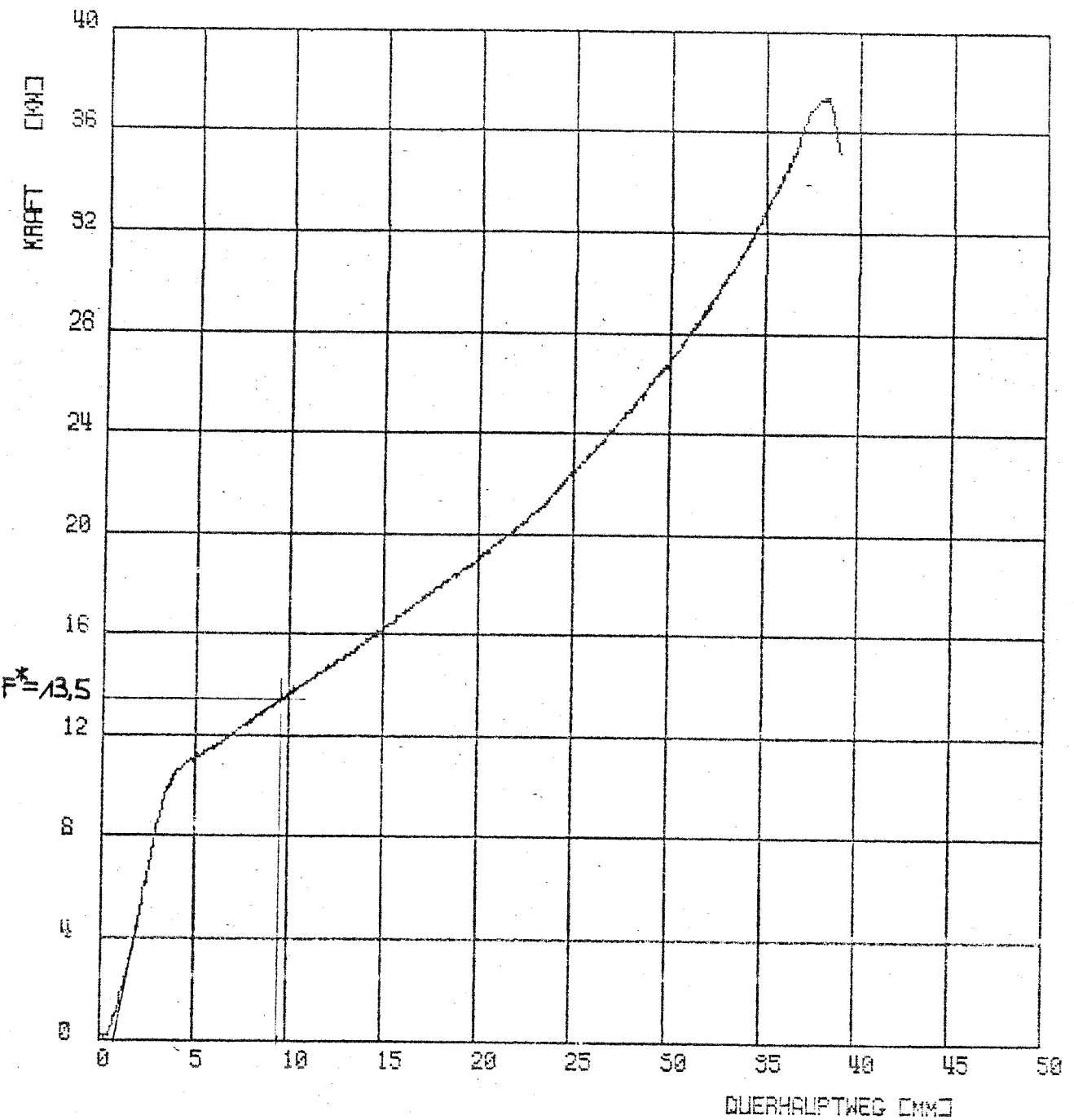
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG-M20-5.8 , PROBE: A52212

Exz.: 61/60°

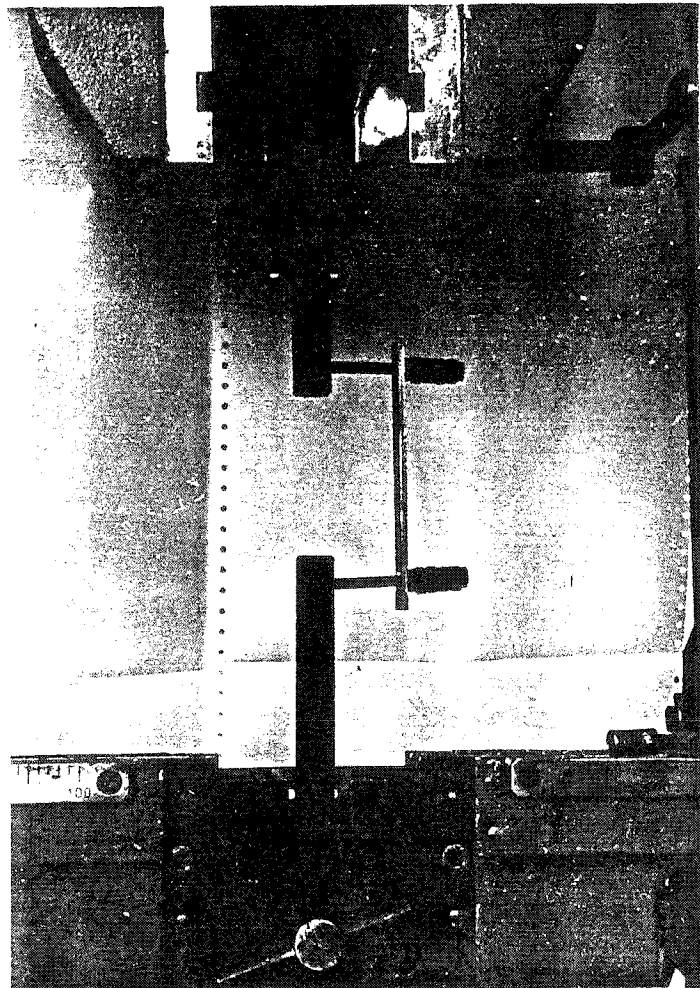
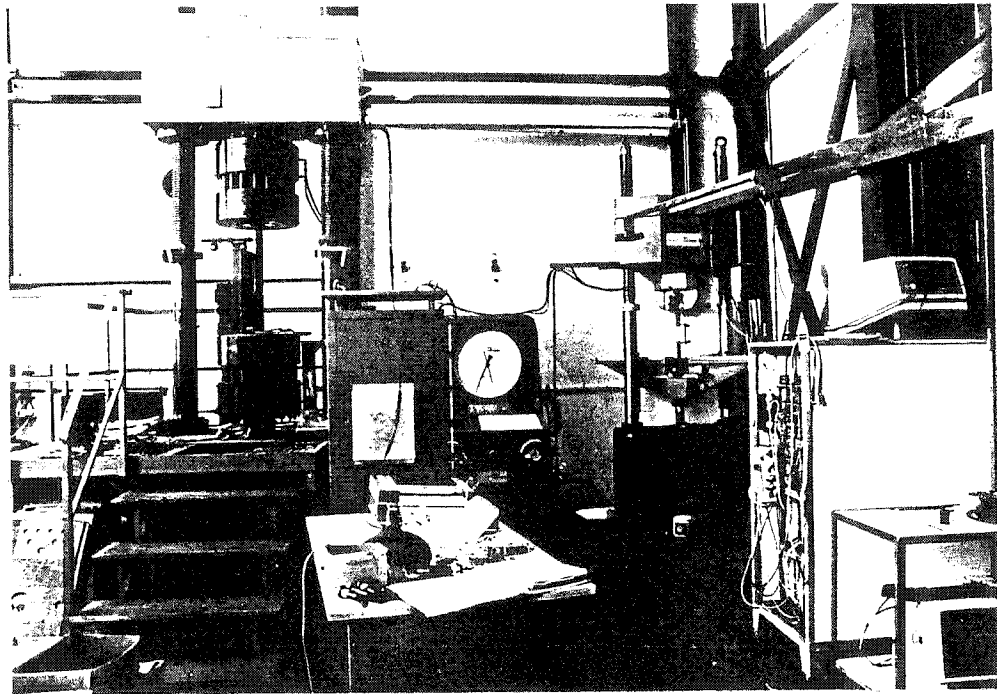
E. : 1.Kerbe



VERSUCH: FRIEDBERG-M20-5.6 , PROBE: RE2214

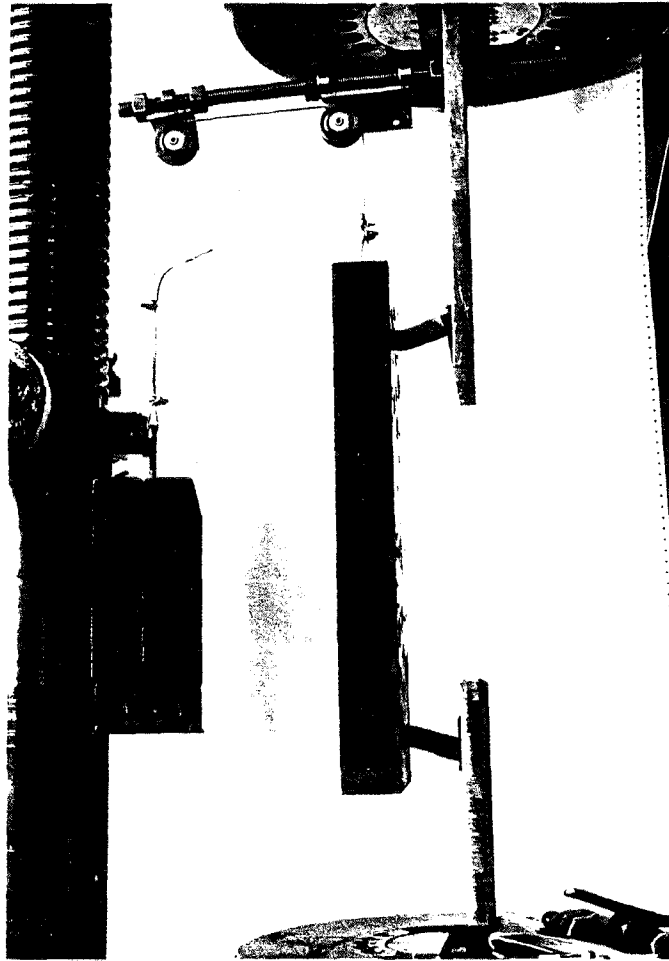
Exz.: 60/60°

E. : 8.Kerbe

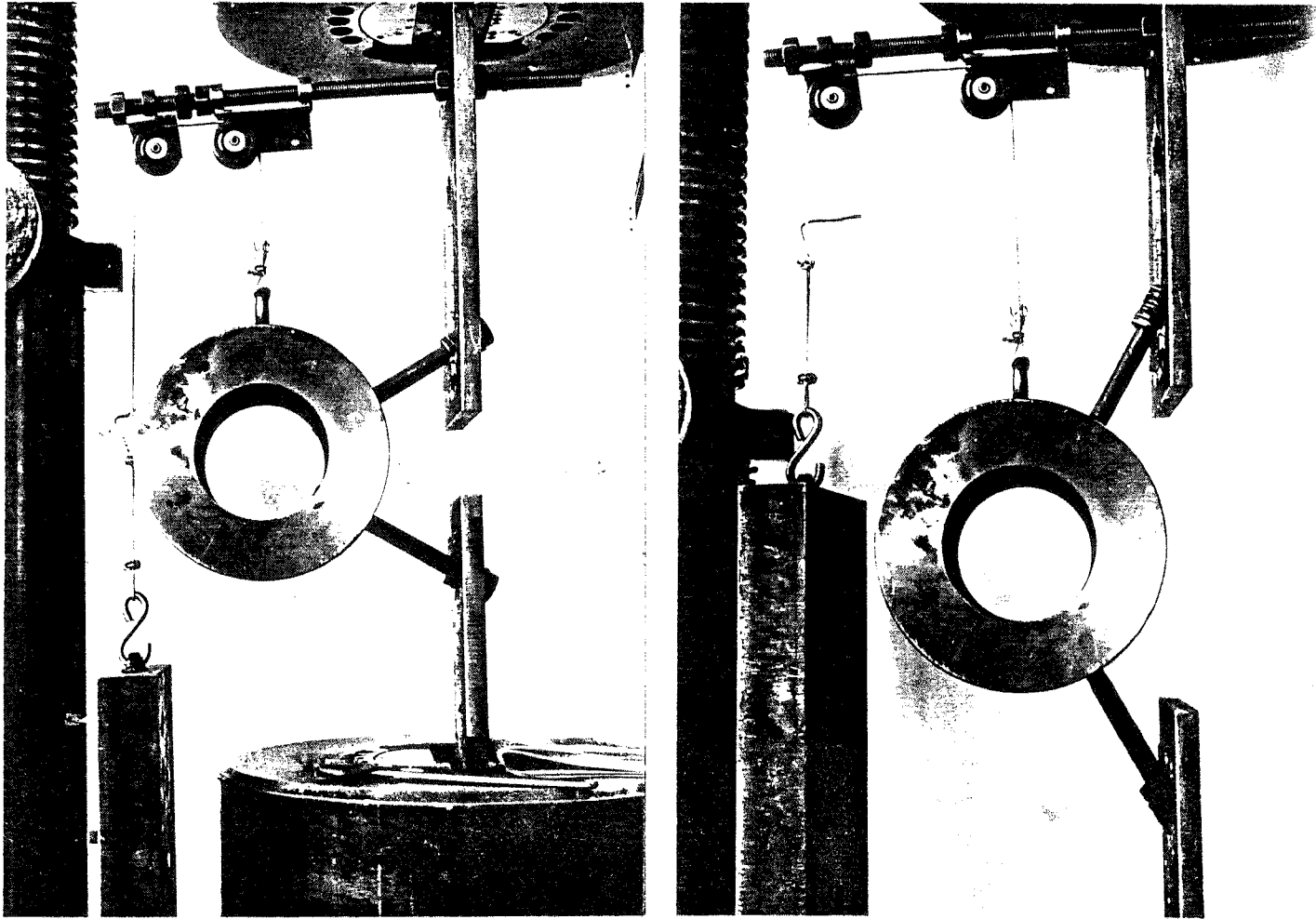


Ansicht der gesamten Versuchsanlage (oben)

Versuchseinrichtung für Biegeversuche der Schrauben M6



Versuchseinrichtung für reine Biegeversuche
(Schrauben M12-M30)



Versuchseinrichtung für Schrägzugversuche
Schraubenneigung gegen die Horizontale: links 30°
rechts 60°