

403 | Dezember 1980

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

A. Krohn

Bruchversuche an geschweißten Transportaugen für Schiffssektionen

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

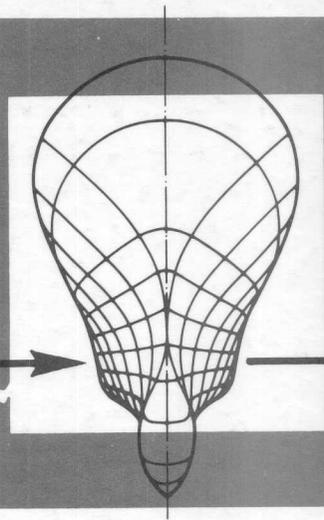
Bruchversuche an geschweißten Transportaugen für Schiffssektionen

A. Krohn, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1980

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG



Bruchversuche an geschweißten Transportaugen
für Schiffssektionen

A. Krohn

Dezember 1980

Bericht Nr. 403

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Aufgabenstellung	1
2. Konstruktion und Fertigung der Versuchs-Transportaugen	4
3. Versuchsaufbau	6
4. Versuchsdurchführung	8
5. Werkstoffkundliche Untersuchungen	10
6. Versuchsergebnisse	14
7. Berechnung einer Standardreihe	21
8. Zusammenfassung der Ergebnisse und Folgerungen	25
9. Schrifttum	26
10. Tabellen	27
11. Bilder	32

1. Aufgabenstellung

Der moderne Stahlschiffbau ist dadurch gekennzeichnet, daß große Teile (Sektionen) vormontiert und anschließend in der Endmontage zusammengefügt werden.

Transport- und Wendevorgänge werden mit Hebezeugen und Fördermitteln durchgeführt, unter denen große Bockkräne mit Tragfähigkeiten bis zu 15 000 KN eine besondere Bedeutung haben.

Um die Geschirre der Hebezeuge an den Sektionen befestigen zu können, müssen auf letztere Transportaugen geschweißt werden. Die Stellen, an denen dies zu geschehen hat, richten sich nach der Geometrie des Bauteils und dem Ablauf des Transport- bzw. Wendevorganges. Dabei ist es unvermeidlich, daß Augen auf Sektionsteile geschweißt werden, die aus Schiffbaustahl vom Gütegrad A gefertigt sind. Dieser Stahl hat keine gewährleisteten Zähigkeitseigenschaften.

Die Augen sind konstruktiv sowohl für normale Schäkkel nach DIN 82 101, für Schäkkel aus höherfestem Stahl als auch für spezielle Bockkrangeschirre passend zu gestalten. Im Betrieb ist mit einem Schwenkwinkel der Last bis zu 180° in der Augenebene zu rechnen. Ferner ist bis zu einem gewissen Grade Schrägzug möglich. Die Augen sollen bis zu Betriebstemperaturen von -15°C voll belastbar sein. Schließlich sollen die Augen mehrfach verwendbar sein.

Die Problemstellung besteht darin, unter Berücksichtigung der dargestellten betrieblichen Anforderungen ausreichende Festigkeitseigenschaften für eine Standardreihe von Transportaugen nachzuweisen.

Eine Ermittlung der Spannungsverteilung reicht hierzu nicht aus, zu untersuchen ist das Bruchverhalten. Dabei spielt im Hinblick auf niedrigste Betriebstemperatur und Werkstoffeigenschaften des Schiffbaustahls vom Gütegrad A die Gefahr des Auftretens spröder Brüche eine besondere Rolle.

Ein Versagen der Transportaugen durch spröden Bruch bei niedriger Betriebstemperatur gefährdet nicht nur das gesamte Bauteil, sondern kann auch zu einer Gefährdung von Menschenleben führen.

Dagegen kann das Auftreten von Lamellenbrüchen praktisch außer acht gelassen werden, da der Schiffbau-A-Stahl keine besondere Neigung zu dieser Bruchform aufweist und zum anderen Lamellenrisse i.a. bereits durch Schrumpfkkräfte während des Verschweißens des Transportauges mit dem Bauteil auftreten würden und durch zerstörungsfreies Prüfen festgestellt werden könnten.

Untersuchungen an Augen für schiffbauliche Konstruktionen sind in /1/ beschrieben. Bedingt durch den Verwendungszweck im Bereich des Ladegeschrirs von Schiffen handelt es sich jedoch um Konstruktionsformen, die die hier gestellten Anforderungen nicht vollständig erfüllen. Bruchversuche wurden zudem nur bei Raumtemperatur durchgeführt.

Nach Untersuchungen, die in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) durchgeführt worden sind /2/, ist daher sicherzustellen, daß die niedrigste Betriebstemperatur oberhalb der Übergangstemperatur von verformungsreichem zu verformungsarmem Bruch des Transportauges liegt.

In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Schiffbau und einem Arbeitskreis aus Vertretern der Großwerften der Bundesrepublik wurde eine Standardreihe von Transportaugen für den dargestellten Zweck entworfen. Ein Rechenmodell unter Anwendung der Methode der finiten Elemente wurde erstellt und die Spannungsverteilung im elastischen Bereich für verschiedene Lastfälle ermittelt /3/.

Bruchversuche unter Vertikallast mit Schrägzug bei Raumtemperatur und -20°C ergaben ersten Aufschluß über Bruchlast, Ausgangsstelle des Bruchs und Bruchform sowie Hinweise bezüglich Belastbarkeit und Werkstoffauswahl für das Transportauge. Hierüber ist in /3/ und /4/ berichtet worden.

Der Bruchausgang lag in allen Fällen im Bereich einer Schweißnaht, zumeist der Kehlnahtverbindung zwischen dem Transportauge und dem zum Schutz des Hebegeschirrs in die Augöffnung eingeschweißten Rohr.

In Fortführung der geschilderten Untersuchungen wurden Bruchversuche bei Horizontallast durchgeführt. Ausgehend von den in /3/ dargelegten Grundsätzen wurde ferner eine Standardreihe von Transportaugen entwickelt.

2. Konstruktion und Fertigung der Versuchsaugen

Die Abmessungen der hier untersuchten 300 KN Transportaugen, einschließlich des für alle Versuche gleichen Unterbaus, sind aus dem Bild 3 zu ersehen. Da diese Untersuchungen die Fortsetzung der vorangegangenen Versuche sind, wurden auch die gleichen Transportaugen verwendet.

Einflußgrößen für die Abmessungen der Transportaugen waren außer den Anforderungen an die Festigkeit die Wiederverwendbarkeit, der Schwenkwinkel von 180° und die Abmessungen der Transportgeschirre verschiedener Werften.

Die Transportaugen sind für drei Verwendungsstufen ausgelegt. Im Betrieb sollen die Transportaugen nach der ersten und zweiten Verwendung um jeweils 30 mm parallel zur Anschlußkehlnacht gekürzt werden. Nach der dritten Verwendung werden die Transportaugen verschrottet.

Für die Versuche wurden Transportaugen der ersten und dritten Verwendungsstufe hergestellt. Alle Transportaugen wurden aus Schiffbaustahl Grad A hergestellt. Sie wurden maschinell gebrannt und im Institut für Schiffbau mit 6° Schrägzug wurden die Transportaugen schräge auf den Unterbau geschweißt. Es wurden Elektroden E 51 54 B 10 DIN 1913 verwendet.

Bei der Fertigung der Augen wurde darauf geachtet, daß im Bereich der den Bruch auslösenden Spannungsspitzen Fertigungsfehler mit größtmöglicher Sicherheit ausgeschlossen wurden. Insbesondere wurde im Bereich des eingeschweißten Rohres in den Horizontalschnitt durch Mitte Transportauge kein Brenn- und Schweißnahtanfang gelegt.

Als Unterbau wurde ein Doppel-T-Profil IBP 340 DIN 1025 aus St 37.2 gewählt. Da aufgrund der Vorversuche Unterbau und Anschlußkehlnaht als Stelle des Bruchausgangs ausgeschlossen werden konnten, war die etwas geringere Festigkeit des Trägers gegenüber normalfestem Schiffbaustahl für den Versuchsablauf unbedeutend.

Der Träger stellte eine praxisübliche Unterkonstruktion aus Platte und Aussteifungsprofil dar.

Die Befestigung des Unterbaues im Versuchsaufbau erfolgte durch einen auf halber Höhe des Trägers angeordneten Bolzen (Bild 1). Somit war es möglich, den Träger beidseitig zu verwenden. Nach dem Bruch des aufgeschweißten Transportauges wurde dieses abgebrannt, die Restnaht am Unterbau abgeschliffen und ein neues Auge wieder aufgeschweißt.

Bei den 6° schräge aufgeschweißten Transportaugen wurden an den Endpunkten der Augen Stützbleche in den Träger eingeschweißt. Die Stegebenen von Transportaugen und Unterbau waren in diesem Fall 6° verdreht. Eine Spannungserhöhung in der Anschlußkehlnaht aufgrund dieser Konstruktion war nicht anzunehmen, da der Winkel zu gering und die Zwischenplattenstärke des Gurtes von 21,5 mm ausreichend groß war.

3. Versuchsaufbau

Die Versuche wurden auf der Festigkeitsversuchsanlage des Instituts für Schiffbau durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde am festen Widerlager installiert (siehe Bild 1 u. 2). Auf halber Höhe dieser 3,0 x 2,5 m großen vertikalen Aufspannfläche wurde die Krafteinleitung für die Aufnahme des mit dem Unterbau verschweißten Transportauges befestigt. Beidseitig wurde je ein doppeltwirkender Hydraulikzylinder am Widerlager angebracht.

Die Zylinder waren für Prüfkkräfte bis 2000 KN ausgelegt. Die zeitgleich und parallel arbeitenden Zylinder drückten mit ihren verlängerten Kolbenstangen gegen eine Traverse aus einem Träger IPBV 600. Von Mitte dieser Traverse aus bestand über eine aufgeschweißte Augkonstruktion mit zwei 400 KN normalfesten Schäkeln nach DIN 82101 eine Verbindung zu dem Versuchsauge. Die Schäkel hatten bei den vorangegangenen Versuchen mehrfach Belastungen bis 2000 KN bei -20°C ausgehalten.

Der Unterbau des aufgeschweißten Versuchsauges wurde nur mit einem Bolzen an der Krafteinleitung befestigt, wodurch ein bequemer Ein- und Ausbau der Prüflinge möglich war.

Um die Krafteinleitung mit dem Versuchsauge wurde eine Tiefkühlbox gebaut. Die Krafteinleitung war durch 120 mm Spanplatten gegen das Widerlager isoliert. Die Hydraulikzylinder und die Traverse befanden sich außerhalb dieser Tiefkühlbox. Die Kühlanlage war für Prüftemperaturen bis -30°C ausgelegt.

Die Hydraulikzylinder wurden über eine Oelstation mit Druckoel bis max. 320 bar versorgt. Über eine Ventilverkettung wurde die Be- und Entlastung der Zylinder gesteuert. Zur Erfassung der Versuchsdaten wurden die Oeldrücke (Zylinderkräfte) und die Verformung des Auges am Angriffspunkt des Schäkels bis zum Bruch auf ein x-y-Schrieb als Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet.

Der Ablauf jedes Versuches wurde mit einer Video-Kamera auf Band aufgenommen. Aus diesen Aufzeichnungen lassen sich qualitative Aussagen über Bruchanfangsort, Auftreten von Sekundärbrüchen und Verformungsverläufe sowie die dazugehörigen Kräfte gewinnen. Für diese Video-Aufzeichnungen, deren Kommentierung und auch für allgemeine Beobachtungen der Versuche wurde oberhalb der Traverse eine begehbare Tribüne gebaut (Bild 1).

Während der Kälteversuche wurde die Temperatur des Transportauges mit Temperaturfühlern überwacht und aufgezeichnet.

4. Versuchsdurchführung

Es wurden Bruchversuche mit Transportaugen, die alle für eine vorgesehene Betriebsbelastung von 300 KN ausgelegt waren, durchgeführt.

Die Belastung erfolgte jeweils horizontal und damit parallel zur Anschlußschweißnaht.

Variiert wurden:

- die Verwendungsstufen der Transportaugen. Es wurden 30 Transportaugen der ersten und 20 Transportaugen der dritten Verwendungsstufe untersucht.
- die Umgebungstemperaturen. Die Augen wurden bei Raumtemperatur und bei Temperaturen von -20°C und -30° belastet.
- die Kraftangriffsrichtung. Die Belastung erfolgte teilweise bei einem Schrägzug von 6° aus der Augebene.

Mit einem Teil der Versuchsaugen wurden zusätzliche Untersuchungen bei Nennlast vorgenommen:

- Es wurden Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) durchgeführt. Der Meßstellenplan ist im Bild 4 dargestellt.
- Es wurden mit Reißlack beschichtete Transportaugen belastet. Die Belastung wurde stufenweise über die Nennlast hinaus bis zum Bruch erhöht. Nach jeder Belastungsstufe wurde das Auge aus dem Versuchsaufbau ausgebaut und die aufgetretenen Rißlinien wurden fotografiert (Bild 7).
- Die Form des eingeschweißten Rohres wurde bei mehrfach wiederholter Nennlast aufgemessen, um ggf. auftretende bleibende Verformungen festzustellen.

Derartige Messungen wurden auch an absichtlich fehlerhaft gefertigten Augen durchgeführt. Bei diesen war das Rohr so in den Steg eingeschweißt, daß am Kraftangriffspunkt etwa 5 mm Luft zwischen Rohr und Auge vorhanden waren. Dieser Fehler kann bei einem etwas zu groß gebrannten Loch und auch bei einem leicht verformten Rohr auftreten.

- Da die Maulöffnung des Schäkels größer war als die Rohrlänge, ist ein asymmetrischer Schäkeleinbau um etwa 30 mm aus Mitte möglich. Dieser Fall kann ebenso in der Praxis vorkommen. Versuche mit rechtsseitig und linksseitig asymmetrisch eingebauten Schäkeln wurden vorgenommen.

Der Versuchsablauf läßt sich aufgrund der Videoaufzeichnungen und der daraus gemachten Beobachtungen beschreiben. Er wird hier am Beispiel des Transportauges 12 dargestellt. Nachdem das Auge auf -20°C abgekühlt und über eine längere Zeit auf dieser Temperatur konstant gehalten worden war, wurde die Kühlbox im oberen Bereich für Videoaufnahmen und Beobachtungen geöffnet. Der Versuchsablauf wurde genau in der Augebene schräge von vorne beobachtet. Die Last wurde kontinuierlich gesteigert. Bis zu einer Belastung von 1200 KN (4fache Nennlast) verformte sich das Auge nur in der Augebene wie in Bild 6 dargestellt. Bei weiter steigender Belastung knickte das Transportauge im Bereich des Übergangsradius am Augauslauf aus, und zwar bei 1290 KN, entsprechend 4,25fache Nennlast um etwa 10 mm, bei 4,5facher Nennlast um etwa 30 mm. Danach kam das seitliche Ausweichen zum Stillstand. Bis zum Bruch bei 4,6facher Nennlast wurde nun der obere Augenteil durch den Schäkelbolzen stark deformiert.

Dieser Versuchsablauf ist typisch für eine große Anzahl der Bruchversuche.

Ähnliche Versuchsabläufe waren bei den Transportaugen mit 6° Schrägzug zu beobachten. Die ersten bleibenden Verformungen begannen jedoch schon bei 3facher Nennlast.

Es traten auch Scher- und Sprödrübe auf, bei denen kein seitliches Ausknicken vorhanden war.

5. Werkstoffkundliche Untersuchungen

5.1 Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Untersuchungen war es,

1. die aufgetretenen Bruchformen zu klassifizieren,
2. anhand dreier ausgewählter Proben das Gefüge und die Bruchoberfläche mikroskopisch zu untersuchen, sowie
3. die Kerbschlagzähigkeits-Temperaturkurve an Längs- und Querproben aufzustellen.

Die Untersuchungen wurden im Laboratorium für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der Hochschule der Bundeswehr Hamburg, Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmeister, durchgeführt.

5.2 Untersuchungsergebnisse

5.2.1 Chemische Zusammensetzung

An den drei vorliegenden Probestücken wurde die chemische Zusammensetzung nach Tabelle 4.1 ermittelt. Nach den Vorschriften des Germanischen Lloyd handelt es sich um einen Schiffbaustahl Grad A, jedoch um mindestens zwei verschiedene Schmelzen. Das zur Verstärkung eingeschweißte Rohrstück entspricht dem Werkstoff St 37-3.

5.2.2 Härteprüfung

Die im nichtverformten Bereich der Probestücke ermittelte Brinell-Härte ist in Tabelle 4.2 wiedergegeben und entspricht ebenfalls den Festigkeitswerten des Schiffbaustahls Grad A.

5.2.3 Bruchverhalten

Die Untersuchung der vorliegenden Proben ergab, daß der Bruch bei

der statischen Prüfung in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Belastungsrichtung (0° zur Grundblechoberfläche bzw. 6° zur Grundblechoberfläche) drei typische Bruchformen zeigte:

1. reiner Scherbruch, annähernd parallel zur Grundblechoberfläche, Bild 9.1,
2. Scherbruch unter einem größeren Winkel zur Grundblechoberfläche als im Fall 1, Bild 9.2,
3. Spröbruch in Richtung zur Grundblechoberfläche, Bild 9.3.

In allen drei Fällen nahm der Bruch seinen Ausgang von dem eingeschweißten Rohr-Werkstoff St 37-3, um von hier aus in den Werkstoff des Transportauges hinein zu verlaufen. Im Falle des Spröbruchs nach Bild 9.3 erfolgte die Brucheinleitung im Bereich des eingeschweißten Rohrwerkstoffs und kurz danach ebenfalls als Scherbruch Bild 10.1, 10.2 und 10.3.

In der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung des reinen Scherbruchs nach Bild 11.1 wird die aufgetretene Näpfchenbildung durch die intensive Scherwirkung weitgehend überdeckt. Der Bruch nach Bild 9.2 zeigt in der Aufnahme des Bildes 11.2 teilweise von Scherwirkungen unbeeinflusste Näpfchenbildung, teilweise aber auch die Bruchoberfläche nach Bild 11.1. In Bild 11.3 des Spröbruchs nach Bild 9.3 wird dagegen die typische transkristalline Bruchoberfläche deutlich.

Die Auswertung aller Transportaugen-Versuche zeigt, daß bei einer Prüftemperatur von -20° und Beanspruchung der Probe parallel zur Grundblechoberfläche 11 % der geprüften Proben spröbruchartig brechen. 31 % zeigen den Bruch nach Bild 9.2, der als Mischung aus Scher- bzw. Normalspannungsbruch anzusehen ist, während 58 % den reinen Scherbruch nach Bild 9.1, 10.1 und 11.1 aufweisen.

Bei Schrägzugbeanspruchung unter 6° zur Grundblechoberfläche erhöht sich der Spröbruchanteil auf 50 %, während der Mischbruchanteil und der reine Scherbruchanteil auf jeweils 25 % absinken.

Bei einer Prüftemperatur von $+20^\circ$ werden keine Spröbrüche beobachtet. Demgegenüber wächst der Anteil der reinen Scherbrüche auf 66 %,

entsprechend einem Mischbruchanteil von 34 % an.

Die in Bild 14 wiedergegebene Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur führt zu einem mittleren Wert von 15 J/cm^2 sowohl bei den Quer- als auch Längsproben bei einer Prüftemperatur von 0° . Der Stahl befindet sich bei dieser Prüftemperatur in der Tieflage der Kerbschlagzähigkeit, ein merklicher Anstieg der Werte ist erst oberhalb von 20° zu verzeichnen.

5.2.4 Mikroskopische Untersuchung der Bruchbereiche

Die lichtmikroskopische Gefügeuntersuchung der drei vorliegenden Proben im Bruchbereich ergab zunächst das für die chemische Zusammensetzung des Schiffbaustahls Grad A typische Perlit-Ferrit-Gefüge, Bild 12 und 13. Wie schon aus der rastermikroskopischen Untersuchung deutlich wurde, sind im Bruchbereich der Scherbrüche starke Verformungen aufgetreten. Diese ziehen sich in den Bildern 12.1 und 13.1 bis tief in den Werkstoff unter der Bruchoberfläche hinein, was aus den aufgetretenen Gleitspuren innerhalb der Ferritkörner in Richtung der Verformung deutlich wird, Bild 13.2. Derartige Gleitspuren werden im spröde gebrochenen Bruchbereich nicht sichtbar, Bild 12.2, dafür aber ausgeprägte Mikrorisse, die quer durch die Ferritkörner verlaufen und deren Oberfläche bereits in Bild 11.3 der Rastermikroskopuntersuchungen wiedergegeben ist.

6. Versuchsergebnisse

6.1 Untersuchungen bei Belastungen unterhalb der Bruchlast

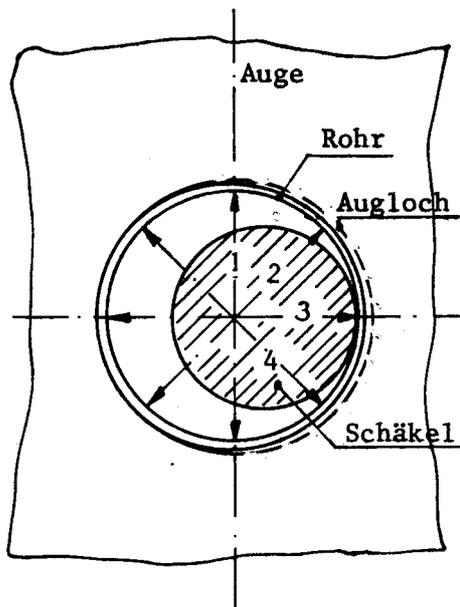
6.1.1 Messungen der Spannungsverteilung

An einem Transportauge der 3. Verwendungsstufe wurden die Spannungen am Umfang des Auges und am Horizontalschnitt auf Mitte Auge gemessen (Bild 4).

Die gemessenen Spannungen bei Nennlast liegen alle im elastischen Bereich. Die größten Spannungen treten am Augauslauf auf. Hier liegen die Werte im Druckbereich bei max. 200 N/mm^2 und im Zugbereich bei 110 N/mm^2 . Auf Mitte Auge wurden größte Werte von 160 N/mm^2 gemessen. Vergleicht man diese Spannungsmessung mit denen der vorangegangenen Untersuchungen an Transportaugen der ersten Verwendungsstufe /3/, so lagen die Spannungsspitzen am Augauslauf mit Werten von 144 N/mm^2 und 64 N/mm^2 deutlich niedriger als die jetzt gemessenen Werte. Die Unterschiede sind offensichtlich auf den Unterschied in der geometrischen Form der Verwendungsstufen 1 und 3, insbesondere den verkürzten und damit weniger weichen Auslauf des Auges in der letztgenannten Stufe zurückzuführen. Im Horizontalschnitt auf Mitte Auge ist kein Unterschied feststellbar. Der Spannungsverlauf über den Augenumfang ist in Bild 5 dargestellt.

6.1.2 Aufmessungen von Verformungen am eingeschweißten Rohr

Aufgrund werftseitigen Anregungen wurden die Verformungen des eingeschweißten Rohres bei Nennlast aufgemessen. Es wurden zwei Augen untersucht, die durch simulierte Fertigungsungenauigkeiten zwischen Augloch und dem einzuschweißenden Rohr einen Luftspalt in der Belastungsebene von etwa 5 mm hatten (siehe Skizze Seite 14). Durch die Doppelkehlnaht wurde der Luftspalt überschweißt. Der Rohrdurchmesser wurde vor und nach der Belastung an vier Stellen vermessen und in nachfolgender Tabelle aufgetragen.



Auge	Meßlinie	vor der Belastung	nach Belastung
6	1	101,6	101,6
	2	101,7	101,5
	3	101,5	101,7
	4	101,5	102,0
7	1	102,0	102,0
	2	101,8	101,5
	3	101,3	101,5
	4	101,9	101,4

Wenn die Meßgenauigkeit von etwa 0,2 mm und die Oberflächenrauigkeit von etwa 0,1 mm berücksichtigt werden, kann man sagen, daß eine bleibende Verformung des eingeschweißten Rohres bei Nennlast trotz des simulierten Fertigungsfehlers nicht auftritt.

Die selben Aufmessungen bei Versuchen mit 6° Schrägzug führten auf Mitte Auge gemessen zu gleichen Ergebnissen. Nur der Rand des Rohres verformte sich in Zugrichtung an der Drucklinie des Schäkels gemessen um 2 mm.

Bei den Augen 15,16 und 17,18 wurde der Schäkel rechts - bzw. linksasymmetrisch befestigt. Bei Nennlast waren Verformungen auch am Rohr nicht feststellbar. Die weitere Belastung bis zum Bruch brachte kein abweichendes Bild der Verformungen gegenüber denen bei symmetrisch eingebauten Schäkel.

6.1.3. Aufmessungen der Rasterlinien

Um neben den Messungen mit DMS Aussagen über die Verformungen und über ein zumindest qualitatives Spannungsbild der Transportaugen bei Belastungen zu bekommen, wurden mehrere Augen mit einem quadratischen Raster von 10 mm versehen.

Bild 6.1 zeigt ein Transportauge der 1. Verwendungsstufe, das bei Raumtemperaturen bis zur 4fachen Nennlast belastet wurde. Die Bruchbelastung liegt im Mittel aller Versuche bei etwa 4,4facher Nennlast. Auf dem Bild ist die starke Dehnung und Einschnürung des Rohres unterhalb des Schäkelbolzens (siehe Pfeil) erkennbar. Diese Stelle an der Schweißnaht zwischen Rohr und Auge ist bei allen Transportaugen Ausgangspunkt des Bruches.

In der Zeichnung in Bild 6 ist das Auge vor und nach der Belastung dargestellt. Die größte Verformung von etwa 40 mm wurde an dem Ausgangspunkt des zu erwartenden Bruches gemessen. Eine Verformung an der Anschlußschweißnaht ist nicht erkennbar.

6.1.4. Untersuchungen mit Reißlack

Für eine qualitative Aussage über die höchstbeanspruchten Stellen des Transportauges und deren Ausweitung bei zunehmender Belastung wurden mehrere Augen mit einem Zweischicht-Reißlack (Tens-Lac der Firma Vishay München) überzogen.

Bei steigender Belastung reißt der Lack zunächst an der Stelle auf, deren Hauptdehnung am höchsten ist. Der Riß verläuft dabei rechtwinklig zur Richtung der betreffenden Hauptdehnung. Es werden immer nur Zugdehnungen angezeigt. Bei weiterer Laststeigerung breitet sich der Riß weiter aus und neue Risse treten auf.

Erscheinen benachbarte Risse fast zur gleichen Zeit oder sind die Rißabstände annähernd gleich, so liegt ein praktisch gleichmäßiger Spannungszustand in der entsprechenden Fläche vor. Entsteht bei der Belastung zunächst nur ein Riß oder ändert sich nach der Belastung die Rißdichte beträchtlich von Ort zu Ort, so muß man mit einem starken Spannungsgefälle längs der Augenoberfläche rechnen.

Bei Nennlast traten die ersten Risse an der Kehlnaht Rohr-Auge di-

rekt vor dem Druckpunkt des Schäkelbolzens auf (Bild 7.1). Die mit DMS gemessenen Spannungen lagen dort bei 160 N/mm^2 . Bei 1,5facher Nennlast (Bild 7.2) breiteten sich die Risse weiter aus und ein Einzelriß, der eine Spannungsspitze anzeigte, entstand in Höhe der Belastungsebene, der späteren Bruchlinie.

Bei 2facher Nennlast (Bild 7.3) hatte sich die Rißdichte in der Belastungsebene beträchtlich erhöht. Die bereits bei 1,5facher Nennlast aufgetretene Spannungsspitze hatte sich damit verstärkt und erstreckte sich über die Hälfte des horizontalen Augscheitels in Belastungsrichtung. Vom Rohr ausgehend traten erste Risse im vertikalen Augscheitel auf.

Bei 2,5facher Nennlast (Bild 7.4) verdichteten sich die Rißflächen in horizontaler und vertikaler Richtung weiter und damit auch die Spannungshöhe.

Es traten auf der der Lasteinleitung abgewandten Seite des Auges große Einzelrisse auf.

Bei Belastung auf 3fache Nennlast konnten keine weitergehenden Aussagen mehr gemacht werden.

Die Ansprechempfindlichkeit des Reißlackes wurde z.T. überschritten, und er löste sich an entsprechenden Stellen ab.

Durch weitere Lasterhöhung begann im Bereich der Kehlnaht Rohr-Auge ein deutliches Fließen. Dies führte bei etwa 4,5facher Nennlast zum Bruch.

Bei Kälteversuchen sind Reißlackuntersuchungen nicht möglich. Es war aber folgendes zu beobachten. Auf dem kalten Transportauge bildete sich eine Reifschicht. Da sich das Auge beim Bruch an den Stellen hohen Beanspruchungen erwärmte, taute hier die Reifschicht, und es entstand ein Bild ähnlich dem Bild 7.4 der Reißlackversuche.

Daraus kann geschlossen werden, daß das Fließverhalten bei Minustemperaturen dem bei Raumtemperatur entspricht.

6.2 Bruchbelastungen

Zur ausreichenden statistischen Absicherung der Ergebnisse wurden je Parameterkombination mindestens 6 Transportaugen untersucht.

In der Tabelle 1 sind alle Versuchsbedingungen und -ergebnisse aufgeführt. Zuerst wurden Transportaugen der 1. Verwendungsstufe bei Raumtemperatur bis zum Bruch belastet. Danach erfolgte die Bruchbelastung bei -20°C und dann bei -20°C mit 6° Schrägzug. Mit den Transportaugen der 3. Verwendungsstufe wurden die Versuche mit den gleichen Parametern durchgeführt. Um den Übergang vom Scherbruch zum Sprödbruch genauer darzustellen, wurde eine Serie T.A. der 3. Verwendungsstufe bei -30°C bis zum Bruch belastet.

Der Bruch erfolgte immer im Auge und ging wie bereits erwähnt immer von der Kehlnaht Rohr-Auge aus.

Es entstanden 3 verschiedene Bruchverläufe, die in den Tabellen 1 und 2 mit A, B und C bezeichnet sind (siehe auch Bild 9).

A bezeichnet einen Sprödbruch, der nur bei gekühlten Augen auftrat. B und C sind Scherbrüche, die bei allen Versuchsgruppen auftraten. Bei B verläuft die Trennlinie vom Bruchanfang schräge nach unten zum Augauslauf unter einem Winkel von etwa 30° und bei C läuft der Bruch parallel zur Anschlußkehlnaht an den Unterbau.

Vergleicht man die Häufigkeiten der Bruchformen (Tabelle 2) so tritt der gerade verlaufende Scherbruch (Form C) bei der Hälfte der Versuche und unter allen Versuchsbedingungen auf. Dasselbe gilt für die Bruchform B, die bei etwa einem Drittel der Versuche entstand. Der Sprödbruch (Form A) war bei den Kälteversuchen mit Schrägzug die häufigste Bruchform.

In Tabelle 2 und Bild 8 sind die statistischen Auswertungen der Bruchlasten aller Versuche dargestellt. Die Versuchsergebnisse sind einem Ausreißertest unterzogen worden. Es wurden keine signifikanten Ausreißer ermittelt.

Für die Versuchsgruppen nach Tabelle 1 sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Bruchlasten errechnet worden.

Diese Werte sind auch für die Bruchlasten der unter anderen Gesichtspunkten zusammengestellten Gruppen errechnet worden. In Tabelle 2 (8-22) sind diese Gruppen dargestellt, für alle Versuche mit Transportaugen folgender Parameter

- 8 - 1. Verwendungsstufe
- 9 - 3. Verwendungsstufe
- 10 - Raumtemperatur ohne Schrägzug
- 11 - Kälte (-20° u. -30°C) ohne Schrägzug
- 12 - Kälte (-20° u. -30°C)
- 13 - Kälte -20°C
- 14 - Kälte -20°C ohne Schrägzug
- 15 - Kälte -20°C mit Schrägzug
- 16 - Bruchform A (Sprödbbruch) (s.Bild
- 17 - Bruchform B Scherbruch schräge
- 18 - Bruchform C Scherbruch gerade
- 19 - alle 49 Bruchversuche mit horizontaler Last
- 20 - die vorangegangene Versuchsreihe mit vertikaler Last
- 21 - die maximale Einzelbruchlast
- 22 - die minimale Einzelbruchlast

Die Statistik der Tabelle 2 ist in Bild 8 grafisch dargestellt. Der Mittelwert aller Versuche mit horizontaler Last liegt bei einer Bruchlast von 1322 KN, was einer 4,4fachen Nennlast entspricht.

Vergleicht man die Mittelwerte der Gruppen 1, 2 und 3 (1. Verwendungsstufe) mit denen der Gruppen 4, 5 und 6 (3. Verwendungsstufe) so ist die gleiche Tendenz feststellbar; der Mittelwert der Bruchlasten der Kälteversuche ohne Schrägzug liegt 4 % höher als der Mittelwert der Versuche bei Raumtemperatur. Hier wurde auch der größte Einzelwert gefunden. Er lag 14 % oberhalb des Mittelwertes aller Versuche. Bei Kälteversuchen mit 6° Schrägzug

dagegen liegt der Mittelwert 5 % tiefer. Hier fand sich auch der kleinste Einzelwert, der 12 % unterhalb des Mittelwertes aller Versuche lag.

Zwischen den Ergebnissen der Versuche bei Raumtemperatur und denen aller Kälteversuche einschließlich Schrägzug ist kein Unterschied der mittleren Bruchlast vorhanden.

Ein Vergleich zwischen allen Versuchen der 1. und denen der 3. Verwendungsstufe zeigt gleichfalls keine Unterschiede der mittleren Bruchlasten.

Dies Ergebnis spricht für eine zweckmäßige Gestaltung der Augform im Hinblick auf die verschiedenen Verwendungsstufen.

Die höhere Spannungsspitze in der 3. Verwendungsstufe bei Beanspruchungen im elastischen Bereich (s. Bild 5) wirkt sich auf die Bruchlast offenbar nicht aus.

Ein Vergleich der Mittelwerte für die verschiedenen Bruchformen zeigt, daß der Sprödbruch (A) bei nur etwa 1,0 % geringerer Belastung als der Scherbruch (B u. C) auftritt.

Aus diesen Versuchsergebnissen geht hervor, daß die niedrigste Bruchbelastung bei einem Transportauge der 3. Verwendungsstufe mit 6° Schrägzug bei -20°C liegt. Diese Bruchbelastung wird im Mittel aber erst bei etwa 4facher Nennlast erreicht.

In den vorangegangenen Versuchen wurden die Transportaugen vertikal bis zum Bruch belastet. Der Mittelwert dieser Bruchlasten beträgt 1490 KN und liegt damit 12 % über dem Mittelwert dieser Versuchsreihen mit Horizontallast.

7. Berechnungen für eine Standardreihe von Transportaugen

Der praktisch interessierende Bereich der Nennbelastungen beginnt bei 200 KN und ist nach oben durch die Krankapazitäten der Werften begrenzt. Hinzu kommt, daß eine Sektion immer an mehreren Transportaugen angeschlagen wird. Davon ausgehend wurden für die Standardreihe folgende Nennlasten festgelegt:

200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1250 und 1500 KN.

Das Vorgehen bei der Bemessung der Augen ist in /3/ in allgemeiner Form dargestellt. Die Berechnung erfolgte mittels elementarer Methoden der Festigkeitslehre.

Nachfolgend ist die Berechnung aufgeführt. Die Abmessungen der Transportaugen sind in den Bildern 15 - 22 dargestellt.

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen sowie -berechnungen mittels der FE-Methode im elastischen Bereich wie auch die der Bruchversuche bestätigen die Zweckmäßigkeit der Auslegung.

1.) Ausgangsabmessungen:

Blechdicke t (mm) = $5 \cdot \sqrt[3]{F(t)}$ empirisch

Übergangsradius R (mm) = $41 \cdot \sqrt[3]{(F(t))}$ "

parallele Zehnlänge in der letzten

Verwendungsstufe l (mm) = $18 \cdot \sqrt[3]{F(t)}$ "

Höhe für die erste Verwendungsstufe

$$h(\text{mm}) = 18 \sin 30^\circ \sqrt[3]{F(t)} + \sin 60^\circ \cdot R(\text{mm}) + 60 + 20$$

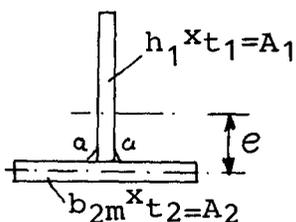
$$= 80 + 43 \cdot \sqrt[3]{F(t)}$$

Kehlnahtdicke Auge-Unterbau

$a \geq 0,4 \cdot t$ für $W_{\text{Kehlnahtanschluß}} \geq 5 \cdot W_{\text{Blech}}$ in Querrichtung

2.) Bestimmung Scheitelradius r_g aus Spannungsnachweis für Horizontalschnitt durch Mitte Auge:

$\sigma_{Vzul} = \sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$; $\tau_{zul} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_F = 138,5 \text{ N/mm}^2$



$$e = \frac{h_1}{2} \frac{A_1}{A_1 + A_2}$$

$$S = \frac{h_1^2 t_1}{8} \frac{(A_1 + 2A_2)^2}{(A_1 + A_2)^2}$$

$$I = \frac{h_1^3 t_1}{12} \frac{A_1 + 4A_2}{A_1 + A_2}$$

$$Q = \frac{F}{2}$$

$$\tau_{max} = \frac{Q \cdot S}{I \cdot t_1} = \frac{3}{4} \frac{F}{A_1} \frac{(A_1 + 2A_2)^2}{(A_1 + A_2)(A_1 + 4A_2)} \approx 0,68 \frac{F}{A_1} \dots (1)$$

3.) Bestimmung Kehlnahtanschluß Rohr-Augblech:

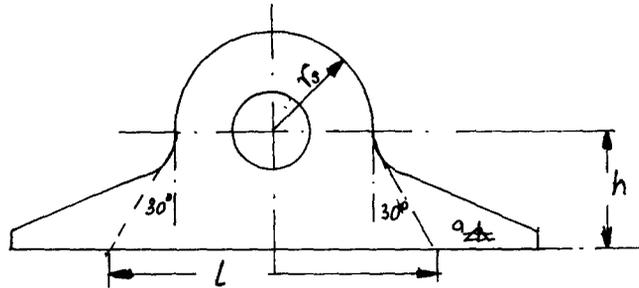
$\tau_s = \frac{Q S_s}{I \cdot 2a}$ mit $S_s = A_2 \cdot e = \frac{h_1}{2} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}$

$$\tau_s = \frac{3F}{2h_1 a} \frac{A_2}{A_1 + 4A_2}$$

$a_{erf.} = \frac{3F}{2h_1 \tau_{Szul}} \frac{A_2}{A_1 + 4A_2}$; $\tau_{Szul} = 138,5 \text{ N/mm}^2 \dots (2)$

4.) Bestimmung Kehlnahtanschluß Auge-Unterbau:

Lastfall Horizontalabzug (stimmt praktisch mit Zugrichtung für max. Beanspruchung überein).



Berechnungslänge	1. Verwendungsstufe	$l = 2(r_s + h \operatorname{tg} 30^\circ)$
	letzte	$l = 2(r_s + (h - 6,0) \operatorname{tg} 30^\circ)$
Moment	1. Verwendungsstufe	$M = F \cdot h$
	letzte	$M = F(h - 6,0)$
Querkraft		$Q = F$
Widerstandsmoment		$W_s = \frac{al^2}{3}$
Schubfläche		$A_s = 2al$

Vergleichsspannung 1. Verwendungsstufe:

$$\tilde{\sigma}_{VS} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3 \tau_s^2} = \frac{3Fh}{al^2} \sqrt{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{l}{h}\right)^2}$$

$$a_{\text{erf}} = \frac{3Fh}{\tilde{\sigma}_{VS \text{ zul}} l^2} \sqrt{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{l}{h}\right)^2} ; a \geq 0,4 t_1 \quad \dots (3)$$

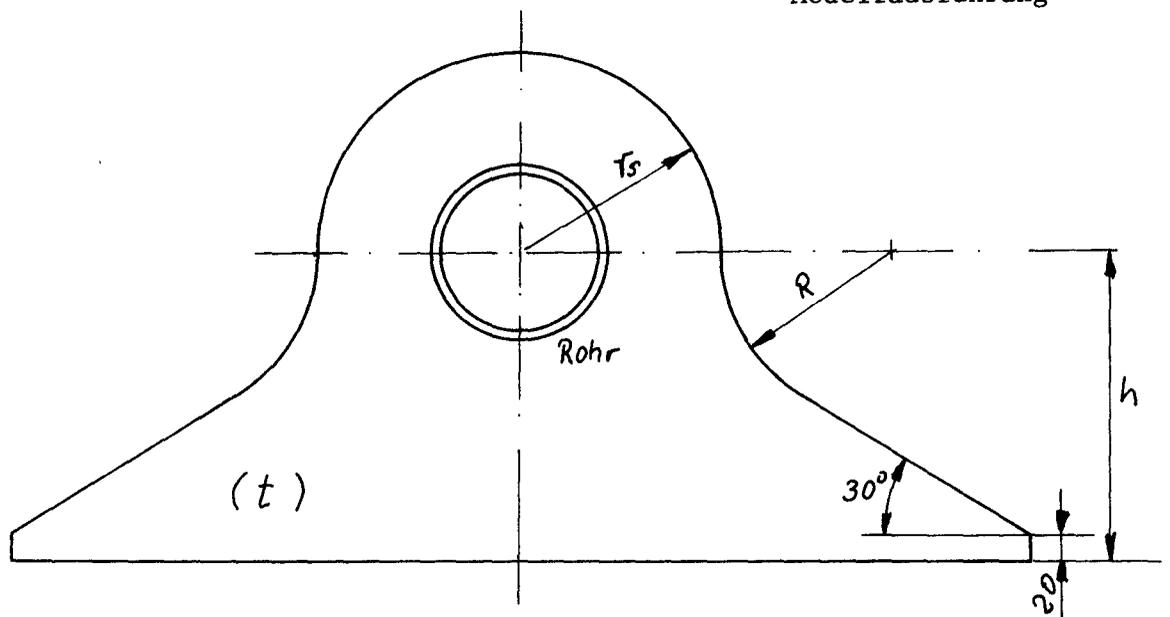
Vergleichsspannung letzte Verwendungsstufe:

Gleichung entsprechend, jedoch mit reduzierten Werten für l und h.

5.) Abmessungen Standardreihe

F(t)	20	30	40	60	80	100	125	150
$\sqrt[3]{F}$	2,72	3,12	3,42	3,92	4,31	4,65	5,00	5,31
$5 \cdot \sqrt[3]{F}$	13,6	15,6	17,1	19,6	21,6	23,3	25,0	26,6
t (mm)	13,5	15,5	17,0	19,5	21,5	23,5	25,0	26,5
$41 \cdot \sqrt[3]{F}$	112	(15,0) 128	(18,0) 140	161	177	191	205	218
R (mm)	110	125 (120)	140 (150)	160	175	190	205	220
$80 + 43 \cdot \sqrt[3]{F}$	197	214	227	249	265	280	295	308
h (mm)	200	215 (185)	230 (250)	250	265	280	295	310
Rohr	114,3 x6,3 501g.	114,3 x6,3 651g.	177,8 x10 751g.	177,8 x10 951g.	193,7 x11 1051g.	193,7 x11 1511g.	219,1 x12,5 1251g.	219,1 x12,5 1301g.
r_s (mm)	130	160 (160)	200 (200)	250	290	320	355	385
0,4t	5,4	6,2	6,8	7,8	8,6	9,4	10,0	10,6
a (mm)	5,5	6,0 (6,0)	7,0 (7,0)	8,0	9,5	10,5	12,0	13,5

Klammerwerte
= Modellausführung



6.) Berechnung Horizontalschnitt durch Mitte Auge:

F(t)	20	30	40	60	80	100	125	150
h ₁ (mm)	73	103	111	161	193	223	245	275
t ₁ (mm)	13,5	15,0	17,0	19,5	21,5	23,5	25,0	26,5
b _{2m} (mm)	28,2	35,7	42,5	52,5	58,0	63,0	68,8	71,3
t ₂ (mm)	6,3	6,3	10,0	10,0	11,0	11,0	12,5	12,5
A ₁ (cm ²)	9,86	15,45	18,87	31,40	41,50	52,41	61,25	72,88
A ₂ (cm ²)	1,78	2,25	4,25	5,25	6,38	6,93	8,60	8,91
A ₁ +A ₂	11,64	17,70	23,12	36,65	47,88	59,34	69,85	81,79
A ₁ +2A ₂	13,42	19,95	27,37	41,90	54,26	66,27	78,45	90,70
A ₁ +4A ₂	16,98	24,45	35,87	52,40	67,02	80,13	95,65	108,52
$\tilde{\tau}_{\max}$ (N/mm ²) nach (1)	136,8	133,9	143,6	131,0	132,6	132,2	141,0	143,1
a _{erf.} (mm) nach (2)	3,1	2,9	4,6	4,0	4,3	4,2	5,0	4,9
a _{gewählt}	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

$$\text{zul} = \frac{F}{\sqrt{3}} = 138,5 \text{ N/mm}^2 \text{ für Schiffbau-Normalstahl}$$

7.) Berechnung Anschlußnaht Auge-Unterbau:

Lastfall: Horizontalzug

F(t)	20	30	40	60	80	100	125	150
erste Verwendungsstufe:								
r _s (mm)	120	160	200	250	290	320	355	385
h (mm)	200	215	230	250	265	280	290	310
l (mm)	471	568	665	789	886	963	1045	1128
a _{erf.} (mm)	5,4	6,2	6,8	8,1	9,4	10,6	12,0	13,3
0,4·t ₁	5,4	6,0	6,8	7,8	8,6	9,4	10,0	10,6
a _{gewählt}	5,5	6,0	7,0	8,0	9,5	10,5	12,0	13,5

letzte Verwendungsstufe:

r _s (mm)	120	160	200	250	290	320	355	385
h (mm)	140	155	170	190	205	220	230	250
l (mm)	402	499	596	720	817	894	976	1059
a _{erf.} (mm)	5,6	6,4	6,8	8,1	9,4	10,6	11,9	13,2
0,4·t ₁	5,4	6,0	6,8	7,8	8,6	9,4	10,0	10,6
a _{gewählt}	5,5	6,0	7,0	8,0	9,5	10,5	12,0	13,5

$$\tilde{\sigma}_{\text{VS zul}} = \frac{\tilde{\sigma}_F}{2} = 120 \text{ N/mm}^2 \text{ für Schiffbau-Normalstahl}$$

8. Zusammenfassung der Ergebnisse und Folgerungen

In Fortführung früherer Untersuchungen wurden Transportaugen bei horizontal wirkender Last untersucht.

Wie bei den früheren Versuchen trat der Bruch stets im Bereich des Auges selbst nicht jedoch in dessen Schweißverbindung mit dem Bauteil auf.

Im untersuchten Bereich erwies sich der Mittelwert der Bruchlast als unabhängig von Temperatur und Verwendungsstufe. Ein Schrägzug von 6° bewirkte eine geringe Abminderung der Bruchlast.

Insgesamt ergaben sich Bruchlasten, die im Mittel 12 % niedriger als diejenigen aus früheren Versuchen mit vertikaler Belastung lagen.

Im Gegensatz zur Bruchlast erwies sich die Bruchform als temperaturabhängig. Bei $+20^\circ\text{C}$ traten keine Sprödbrüche auf, obgleich sich die Charpy-V-Kerbschlagzähigkeitswerte des Werkstoffes noch in der Tieflage befanden. Eine stärkere Neigung zur Sprödbruchbildung trat erst bei -20°C auf, zusätzlich begünstigt durch den Schrägzug von 6° zur Grundblechoberfläche und das damit verbundene höhere Normalspannungsniveau im gefährdeten Querschnitt.

Die Untersuchungsergebnisse ermöglichten es, eine einfache Berechnungsvorschrift für eine Standardreihe von Transportaugen aufzustellen. Sie zeigten ferner, daß die Augen im untersuchten Temperaturbereich mit hinreichender Sicherheit unter Nennlast eingesetzt werden können. Voraussetzung ist es, daß durch sorgfältige Arbeitsausführung und zerstörungsfreie Prüfung die Schweißverbindungen an den kritischen Stellen frei von erheblichen Fehlern gehalten werden.

9. Schrifttum:

- /1/ Sprengel, H.:
"Augbeschläge"
Schiff und Hafen, Heft 6, 1960, S. 517

- /2/ Struck, W.:
"Zur Beurteilung der Sprödbbruchgefahr
geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-
sprödem Übergang im Bruchverhalten mit
Hilfe der Methode des Temperaturvergleichs"
Schweißen und Schneiden, Heft 7, 1977, S. 266

- /3/ Petershagen, H.:
"Untersuchungen zur Gestaltung geschweißter
Transportaugen für große Schiffbauteile"
Schweißen und Schneiden, Heft 5, 1978

- /4/ Krohn, A.; Hoffmeister, H.:
"Untersuchungen zum Bruchverhalten geschweißter
Transportaugen für Schiffssektionen"
Schweißen und Schneiden, Heft 5, 1979

10. Tabellen

Tabelle 1

Versuchsergebnisse aller Bruchversuche

Tabelle 2

Statistik der Versuchsergebnisse

Tabelle 3

Versuchsergebnisse der Dehnungsmessungen im elastischen Bereich an Auge Nr. 50 (Bild 4)

Tabelle 4

4.1 Chemische Zusammensetzung der Transportaugen

4.2 Härteprüfung

Tabelle 1

Versuchsergebnisse der Bruchbelastungen

Versuchs- gruppe	Augen- Nr.	An- zahl	Verw.Stufe		Temperatur		Schrägzug		Bruchl. KN	Bruchl. Nennl.	Bruchform			
			1.	3.	Rt.-20°	-30°	ohne	mit			A:	B:	C:	
1	1	6	x		x				1370	4,6			x	
	2		x		x				1250	4,2			x	
	3		x		x				1310	4,4			x	
	4		x		x				1250	4,2			x	
	5		x		x				1350	4,5			x	
	6		x		x	x			1230	4,1			x	
2	7	11	x			x			1290	4,3	x			
	8		x			x			1510	5,0			x	
	9		x			x			1310	4,4	x			
	10		x			x			1350	4,5		x		
	11		x			x			1410	4,7			x	
	12		x			x			1230	4,1			x	
	13		x			x			1420	4,7			x	
	14		x			x			1350	4,5			x	
	15		x			x			1330	4,4			x	
	16		x			x			1340	4,5			x	
	17		x			x			1340	4,5			x	
3	18	6	x			x		x	1310	4,4	x			
	19		x			x		x	1160	3,9			x	
	20		x			x		x	1220	4,1		x		
	21		x			x		x	1370	4,6	x			
	22		x			x		x	1280	4,3		x		
	23		x			x		x	1280	4,3	x			
4	24	6		x	x			x	1290	4,3			x	
	25			x	x			x	1350	4,5			x	
	26			x	x			x	1350	4,5		x		
	27			x	x			x	1340	4,5		x		
	28			x	x			x	1340	4,5		x		
	29			x	x			x	1330	4,4			x	
5	30	8		x		x		x	1330	4,4		x		
	31			x		x		x	1370	4,6			x	
	32			x		x		x	1420	4,7		x		
	33			x		x		x	1350	4,5		x		
	34			x		x		x	1290	4,3		x		
	35			x		x		x	1430	4,8		x		
	36			x		x		x	1290	4,3			x	
	37			x		x		x	1350	4,5			x	
6	38	6		x		x		x	1220	4,1	x			
	39			x		x		x	1220	4,0			x	
	40			x		x		x	1200	4,0	x			
	41			x		x		x	1250	4,2	x			
	42			x		x		x	1280	4,3			x	
	43			x		x		x	1250	4,2		x		
7	44	6		x			x	x	1380	4,6	x			
	45			x			x	x	1370	4,6			x	
	46			x			x	x	1380	4,6	x			
	47			x			x	x	1380	4,6	x			
	48			x			x	x	1370	4,6			x	
	49			x			x	x	1390	4,6	x			
		49	23	26	12	31	6	37	12	1320	4,4	12	13	24

Tabelle 2

Statistik

Nr.	Gruppen mit gleichen Parametern	Anzahl	Mittelwert \bar{x} (KN)	Standardabw. s_x (KN)	Häufigkeit der Bruchform			
					A	B	C	
1	Versuchsgruppe	1	6	1293	59	-	1	5
2	(nach Tab 1)	2	11	1353	74	2	1	8
3	"	3	6	1290	73	3	2	1
4	"	4	6	1333	23	-	3	3
5	"	5	8	1354	52	-	5	3
6	"	6	6	1237	29	3	1	2
7	" (-30°)	7	6	1378	8	4	-	2
8	Versuch mit 1.Verw.St.	23		1316	76	5	4	14
9	" " 3. " "	26		1328	62	7	9	10
10	" bei Raumtemp.o. Schrägzug	12		1330	47	-	4	8
11	" " Kälte ohne Schrägzug	25		1359	56	6	6	13
12	" " Kälte	37		1325	75	12	9	16
13	" " -20°C	31		1315	78	8	9	14
14	" " -20°C ohne Schrägzug	19		1353	64	2	6	11
15	" " -20°C mit Schrägzug	12		1253	55	6	3	3
16	Bruchform A	12		1313	67	12	-	-
17	" B	13		1331	60	-	13	-
18	" C	24		1322	76	-	-	24
19	aller Versuche	49		1322	69	12	13	24
20	* vertikal Versuche	11		1486	80	-	-	-
21	max. Einzelbruchlast	1		1510	-	-	-	-
22	min. Einzelbruchlast	1		1160	-	-	-	-

* vorangegangene Versuchsreihe mit anderen Bruchformen

Tabelle 3

Meßergebnisse Versuch Auge Nr. 50

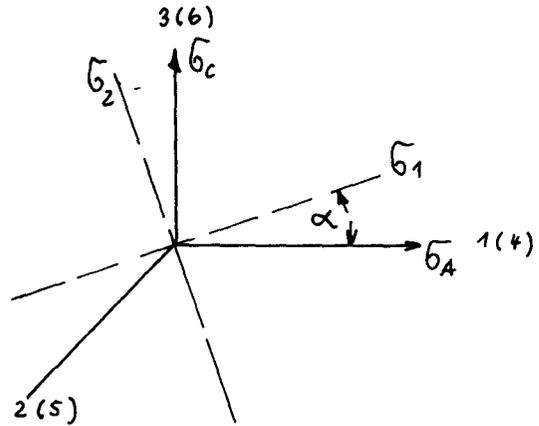
Last 300 KN

Meßstelle σ_A σ_C τ_{AC} α σ_1 σ_2 τ_{max}

Nr.

1	- 128
2	- 196
3	- 198
4	- 201
5	- 172
6	- 116
7	- 35
8	45
9	80
10	74
11	72
12	53
13	32
14	12
15	- 14
16	- 16
17	- 24
18	- 29
19	- 30
20	- 25
21	- 20
22	- 13
23	- 4
24	6
25	4
26	47
27	86
28	111
29	104
30	60
31	- 27 22 23 22 - 36 31 34
37	- 158 5 12 4 - 159 57 82
43	- 3 - 2 29 44 - 32 27 29

Werte in N/mm²



Rosettenanordnung

1/2/3 - Vorderseite

(4) (5) (6) - Rückseite

Meßwerte sind Mittelwerte
aus Vorder- und Rückseite

Meßstellenplan siehe Bild 4

Tabelle 4

4.1 Chemische Zusammensetzung der drei untersuchten Transportaugen %

Transport- auge Nr.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Sn	Al	Ti	As
1	0.11	0.21	0.70	0.014	0.024	0.27	0.10	0.14	0.02	-	0.033	0.003	-	0.034
10	0.08	0.20	0.57	0.019	0.008	0.31	0.13	0.14	0.02	-	0.03	0.008	-	0.029
9	0.08	0.20	0.57	0.021	0.009	0.32	0.13	0.14	0.02	-	0.031	0.008	-	0.030

ingeschweißtes

Rohr 5 R	0.15	0.25	0.52	0.011	0.010	0.19	0.11	0.11	0.02	-	0.019	0.052	-	0.028
----------	------	------	------	-------	-------	------	------	------	------	---	-------	-------	---	-------

4.2 Härteprüfung der drei untersuchten Transportaugen

Transportauge	HB 2,5 / 187,5
1	161 - 150 - 156
10	170 - 164 - 161
9	156 - 161 - 156

11. Bilder

Bild_1

Versuchsaufbau Seitenansicht

Bild_2

Versuchsaufbau Draufsicht

Bild_3

Transportauge mit Versuchsunterbau

Bild_4

Anordnung der Dehnungsmeßstreifen (DMS) auf Auge 50

Bild_5

Meßergebnisse der DMS-Messung an Auge 50

Bild_6

Verformungen bei 4facher Nennlast Auge 51

Bild_7

Bilder der Reißflachversuche an Auge 52

Bild_8

Statistik nach Tabelle 2

Bild_9

Bruchformen der Transportaugen

Bild_10

Brucheinleitung von eingeschweißten Rohrstück

Bild_11

REM - Aufnahmen der Bruchflächen

Bild_12

Lichtmikroskop-Aufnahmen der Bruchbereiche der Transportaugen 1

Bild_13

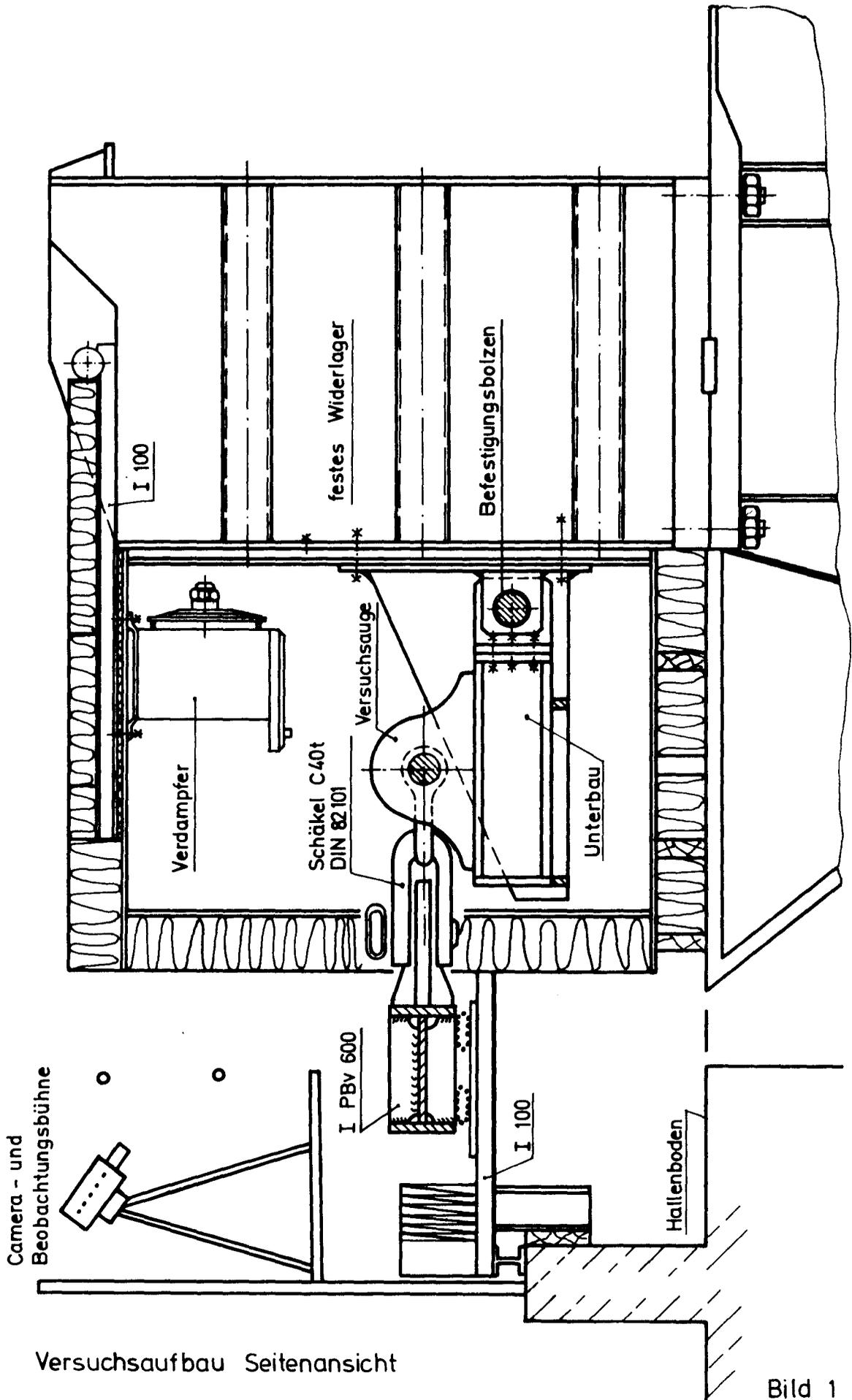
Lichtmikroskop-Aufnahmen der Bruchbereiche des Transportauges

Bild_14

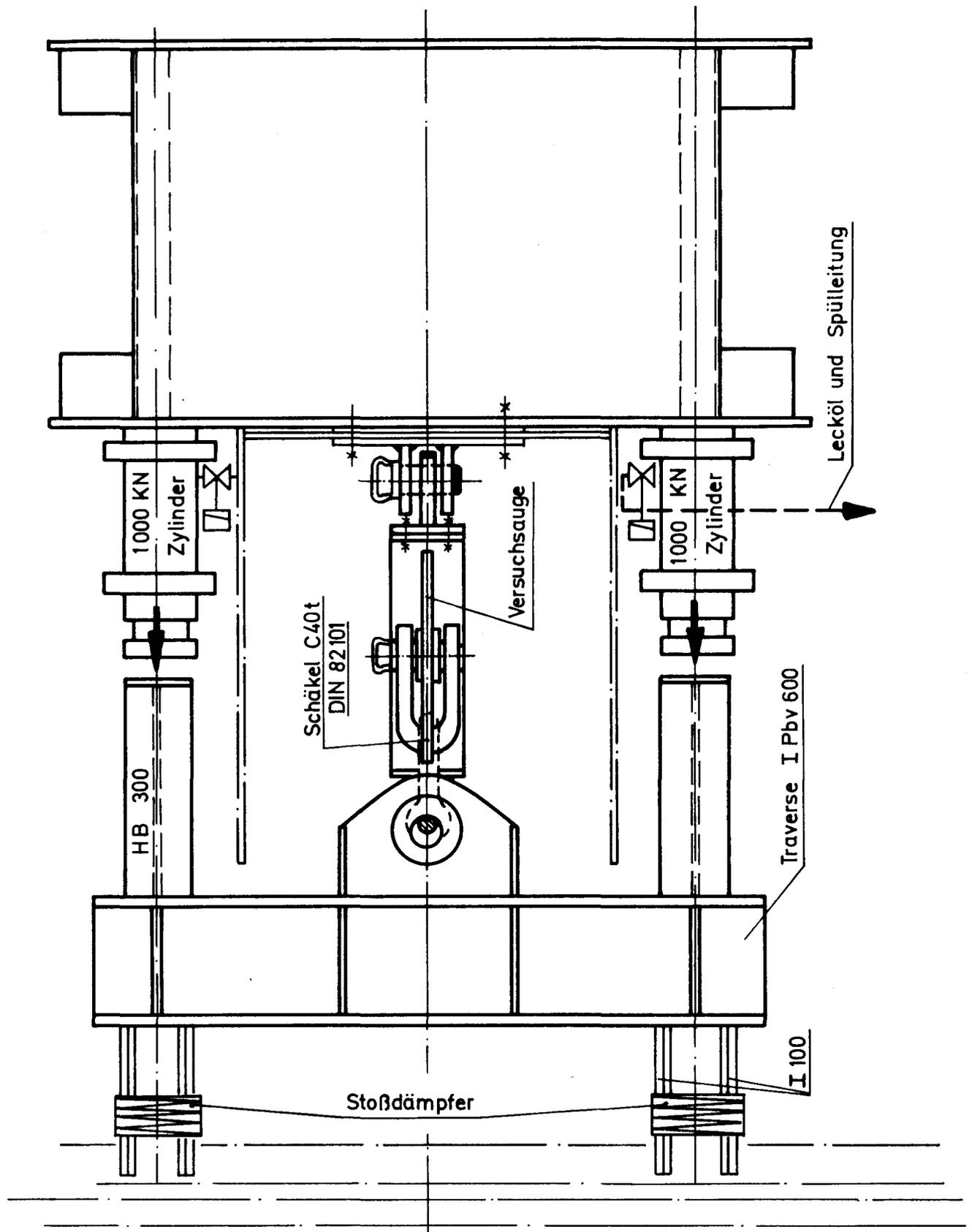
Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Bild_15_bis_Bild_22

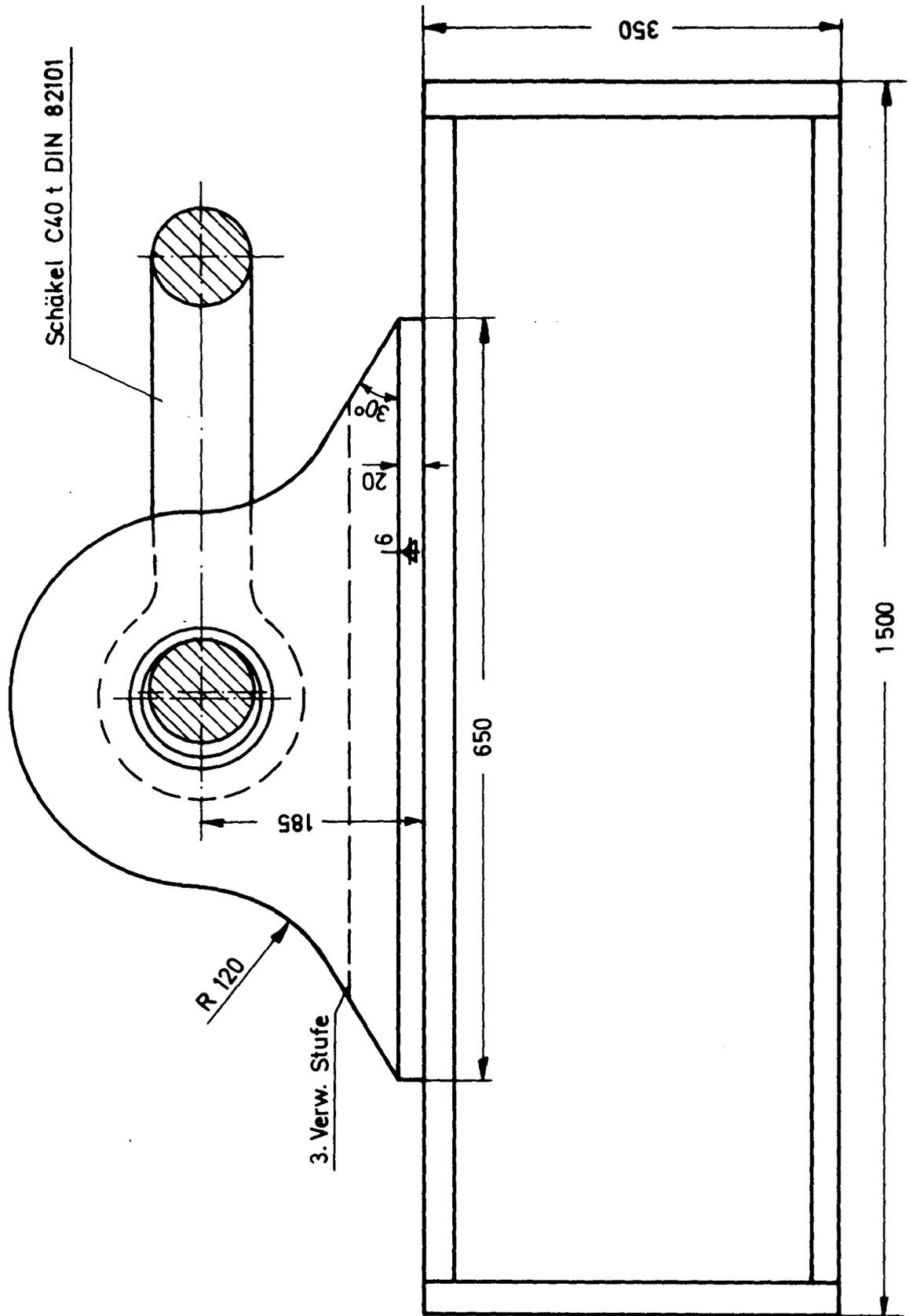
Abmessungen der Standardreihe von 20 t - 150 t Transportaugen



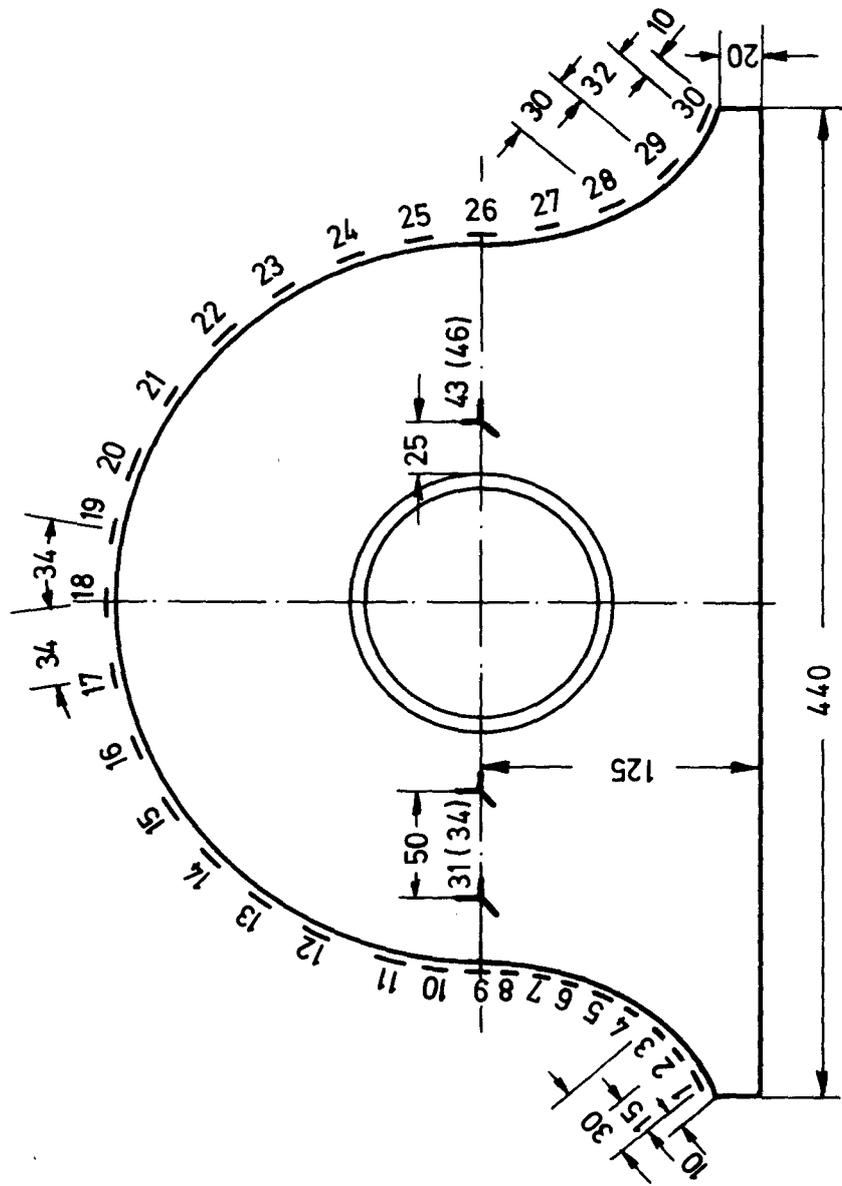
Versuchsaufbau Seitenansicht



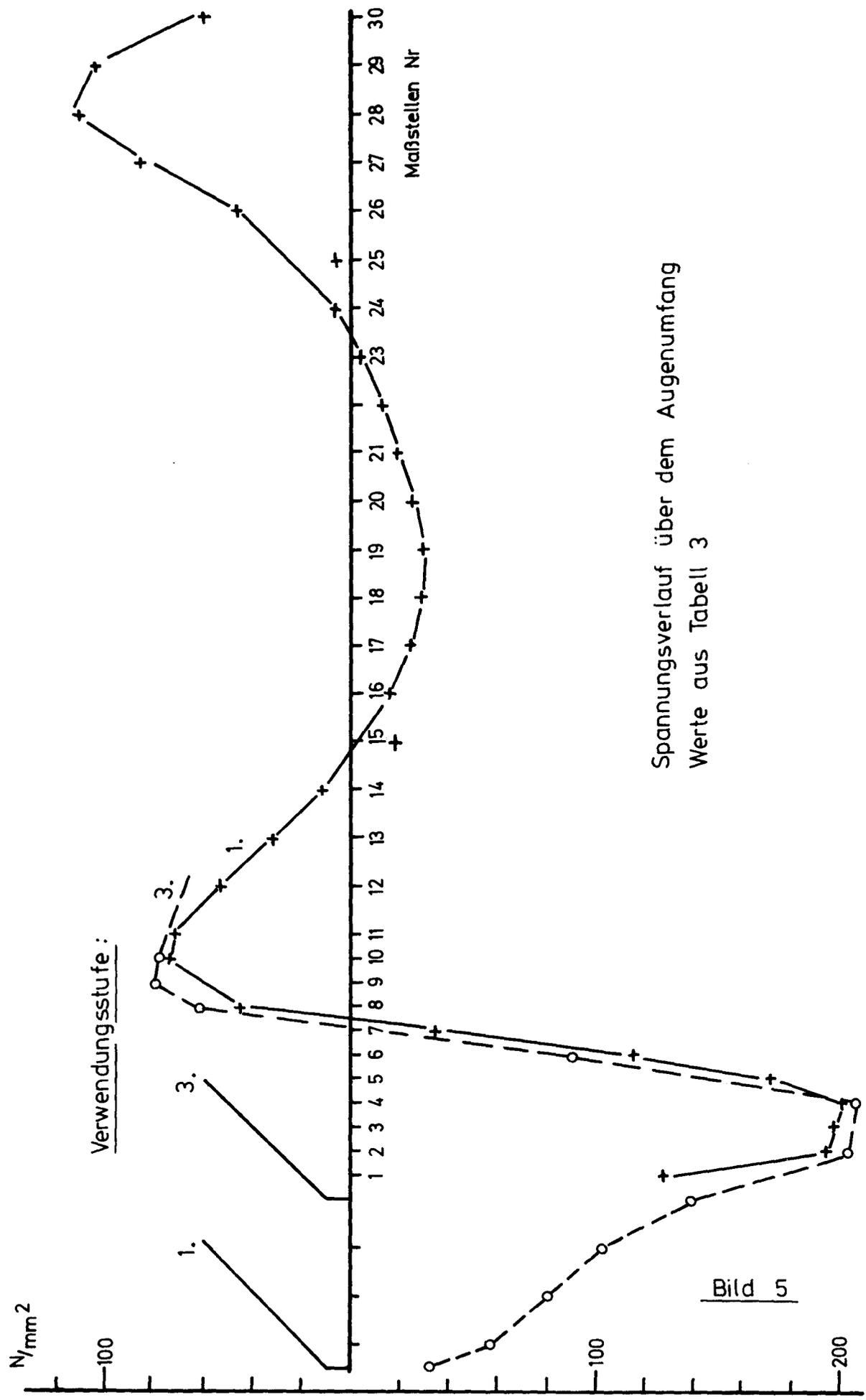
Versuchsaufbau Draufsicht



Transportauge mit Versuchsunterbau



Anordnung der Dehnungsmessstreifen (DMS)
auf Auge 50

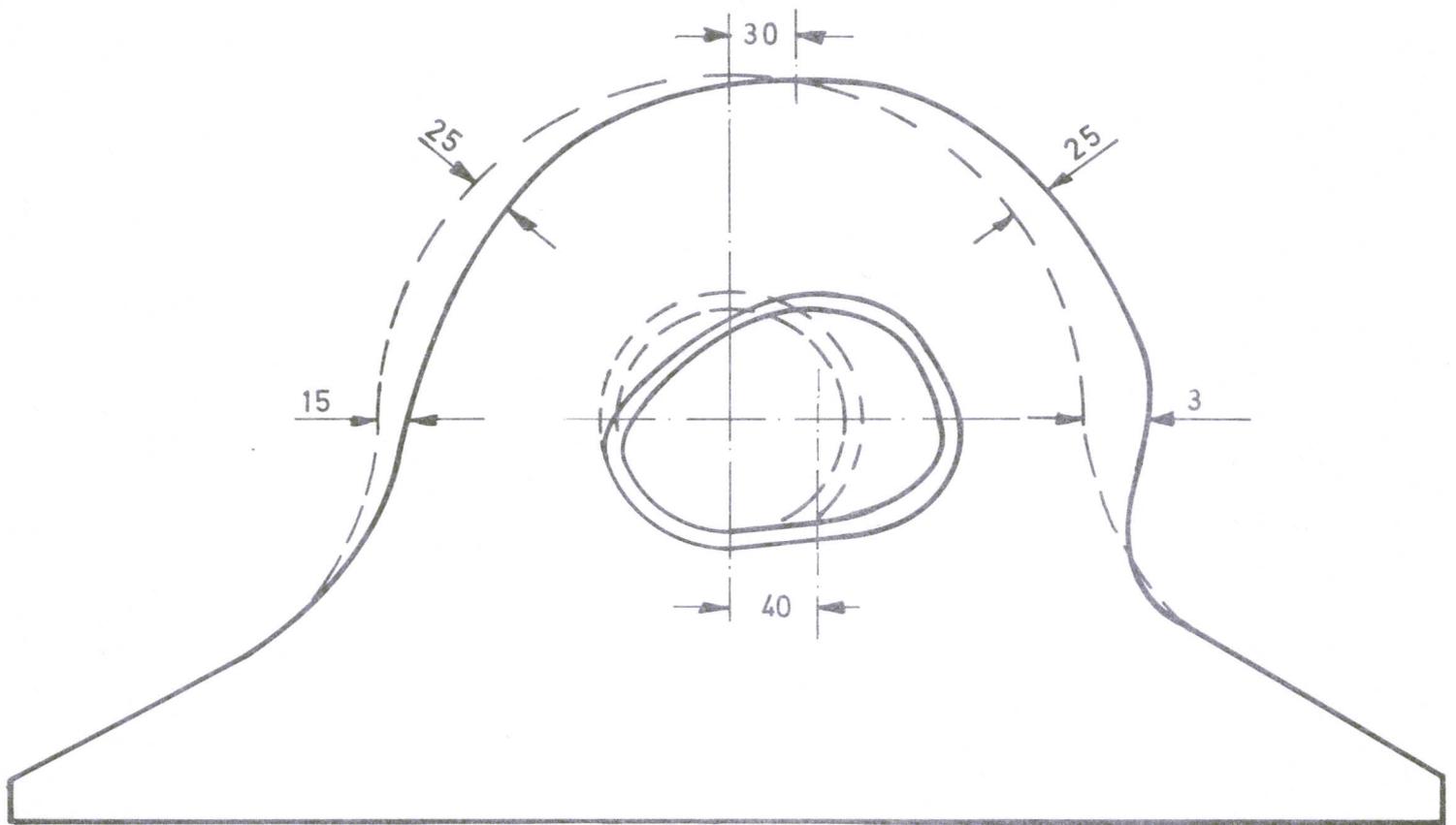
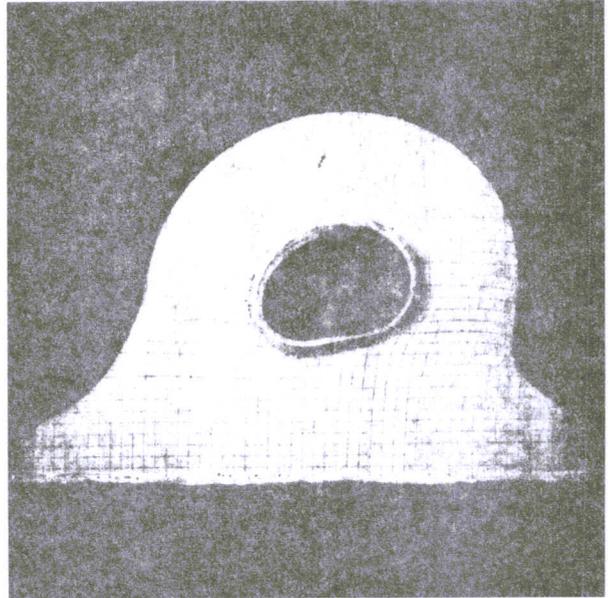


Verwendungsstufe :

Spannungsverlauf über dem Augenumfang
Werte aus Tabell 3

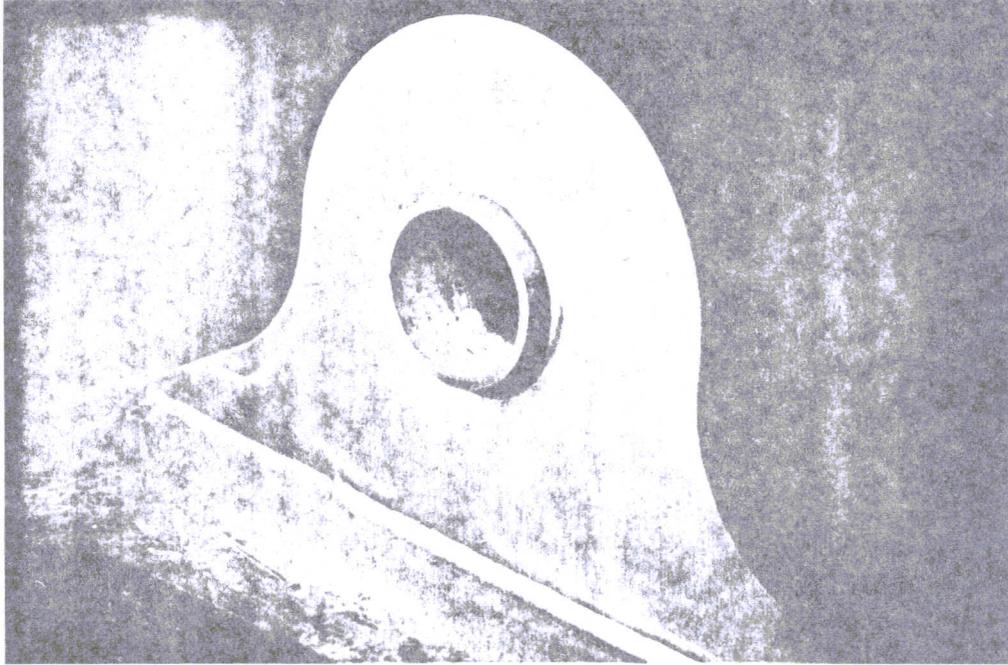
Bild 5

Verformung bei einer Belastung von 1193 KN

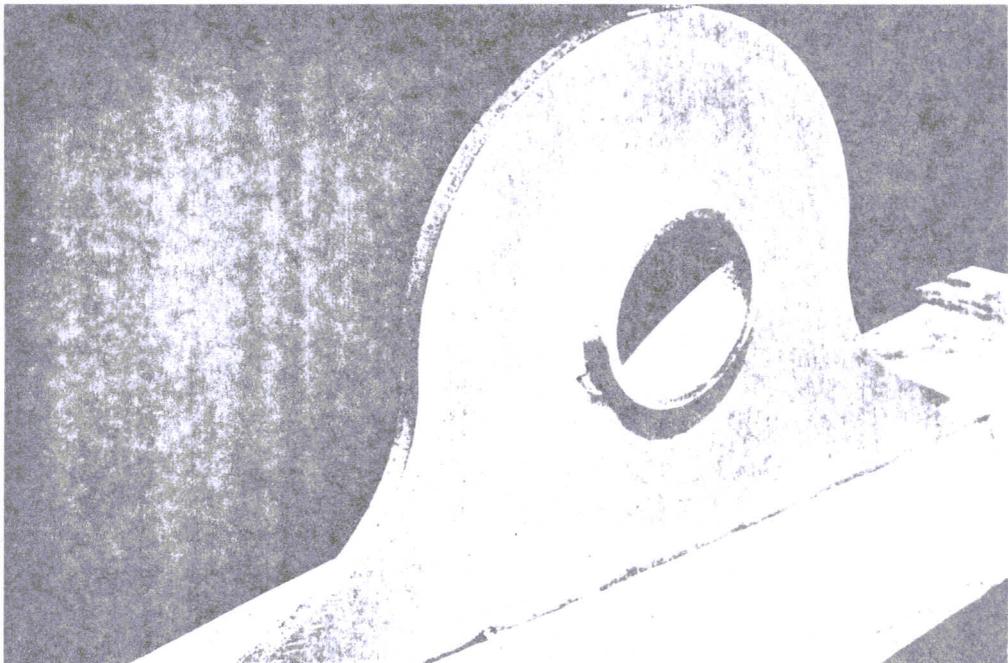


Verformungen Auge 51

Bild 6



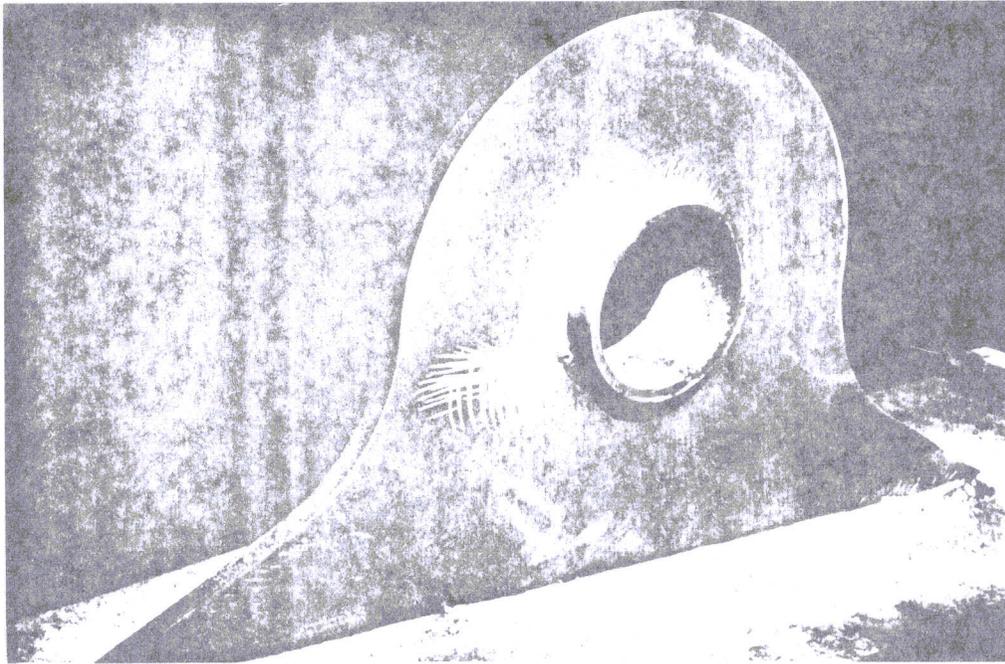
7.1



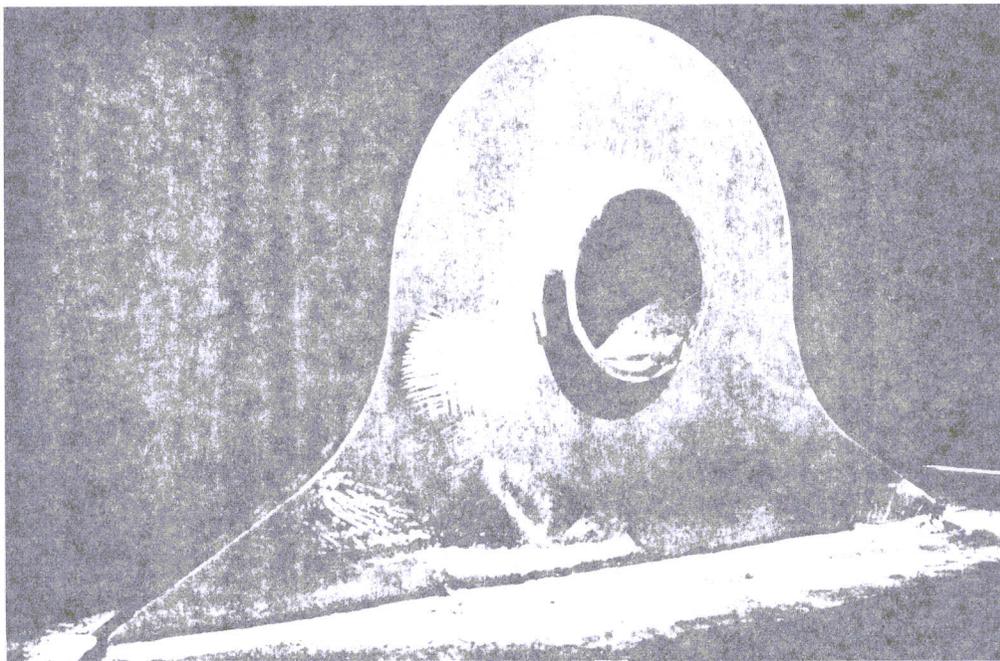
7.2

Bild 7

Untersuchungen mit Reißlack



7.3



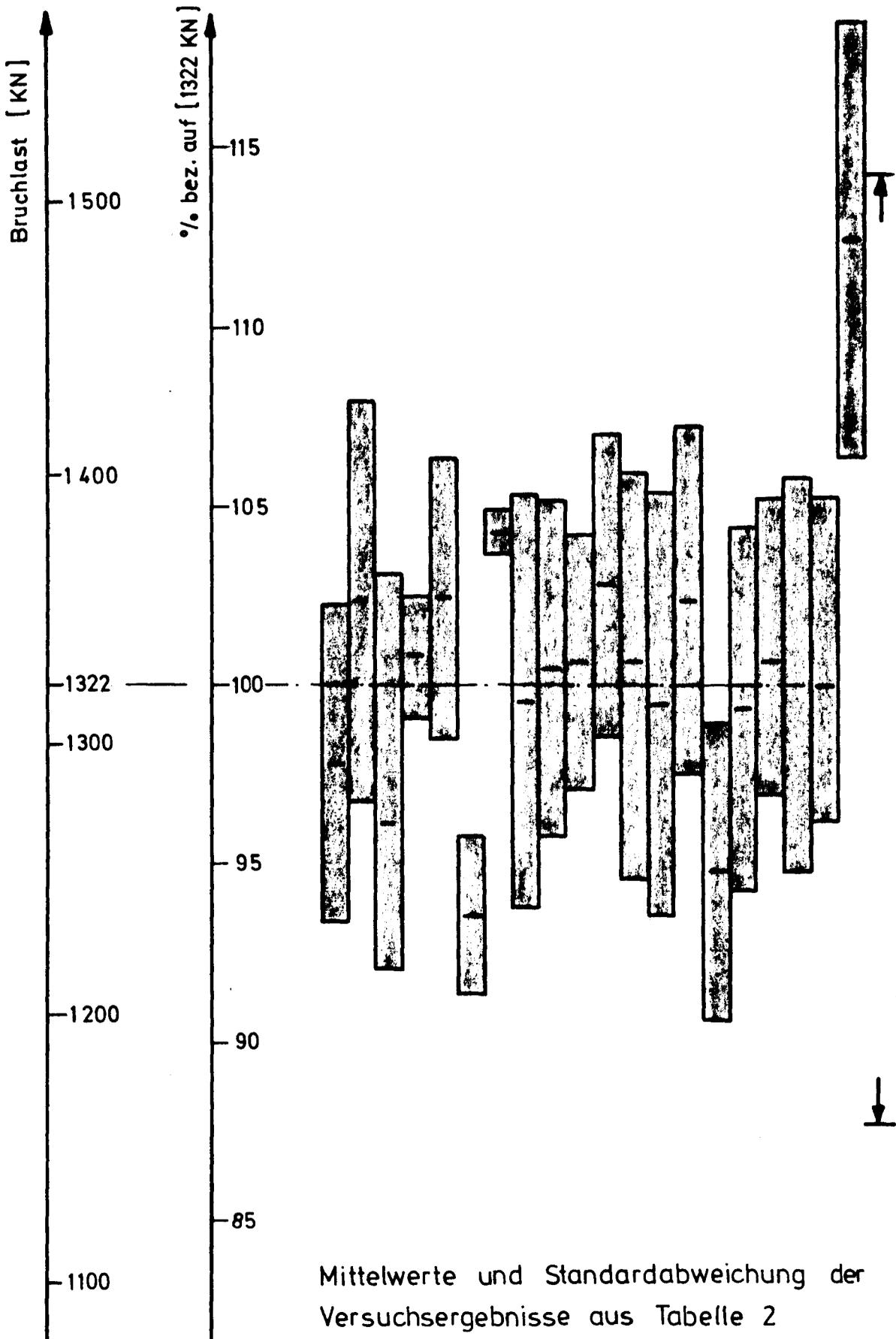
7.4

Bild 7

Untersuchungen mit Reißlack

Gruppen nach Tabelle 2

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 ²¹₂₂



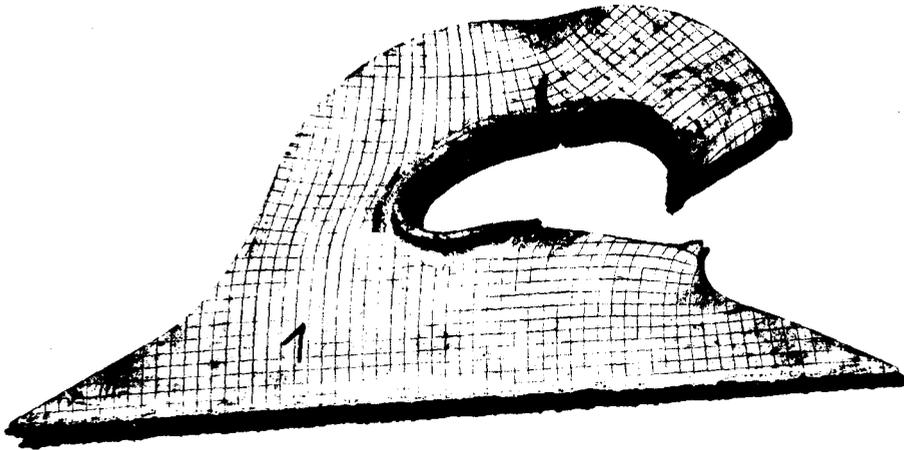
Mittelwerte und Standardabweichung der Versuchsergebnisse aus Tabelle 2

9.1

Transportauge Nr. 1

$\vartheta = +20^{\circ}\text{C}$

Zugrichtung 0°



Scherbruch
Bruchform C

9.2

Transportauge Nr. 10

$\vartheta = -20^{\circ}\text{C}$

Zugrichtung 0°



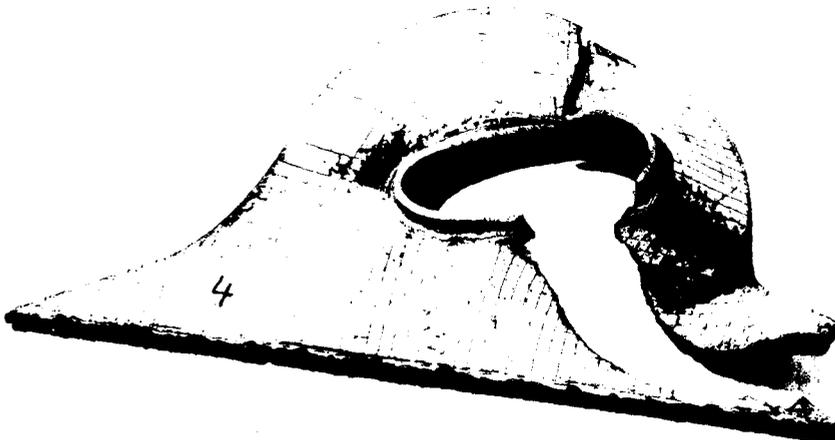
Scherbruch
Bruchform B

9.3

Transportauge Nr. 9

$\vartheta = -20^{\circ}\text{C}$

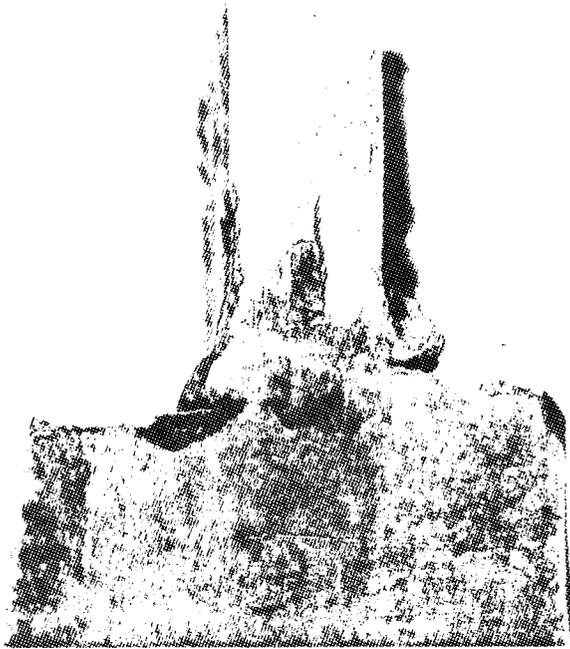
Zugrichtung 0°



Sprödbruch
Bruchform A

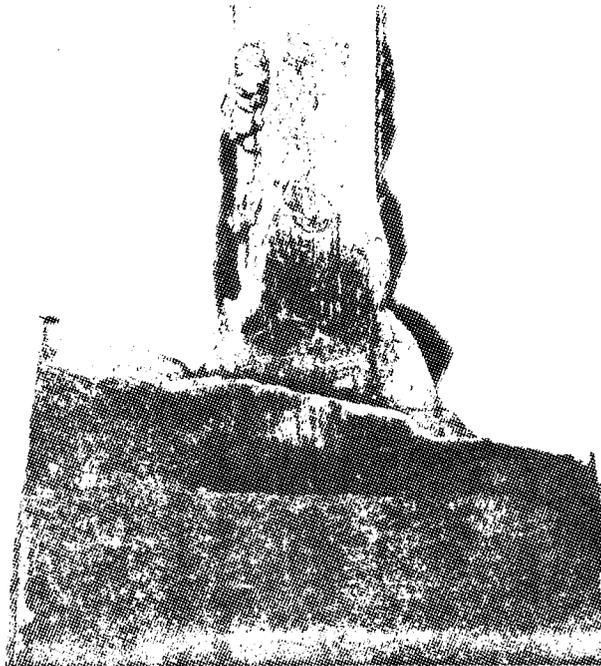
10.1

Transportauge Nr. 1



10.2

Nr. 10



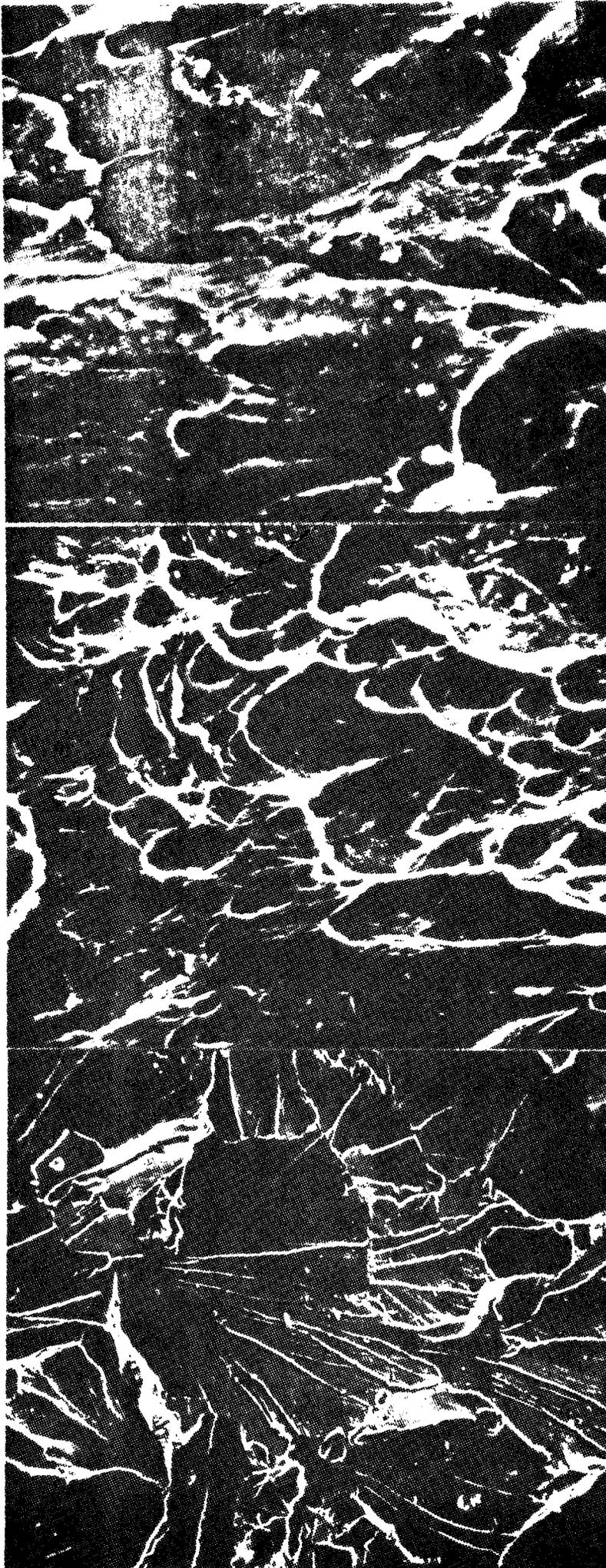
10.3

Nr. 9



Brucheinleitung vom eingeschweißten Rohrstück

Bild 10



11.1

Transportauge Nr. 1

Scherbruch

V = 2600:1

11.2

Transportauge Nr. 10

Normalspannungsbruch

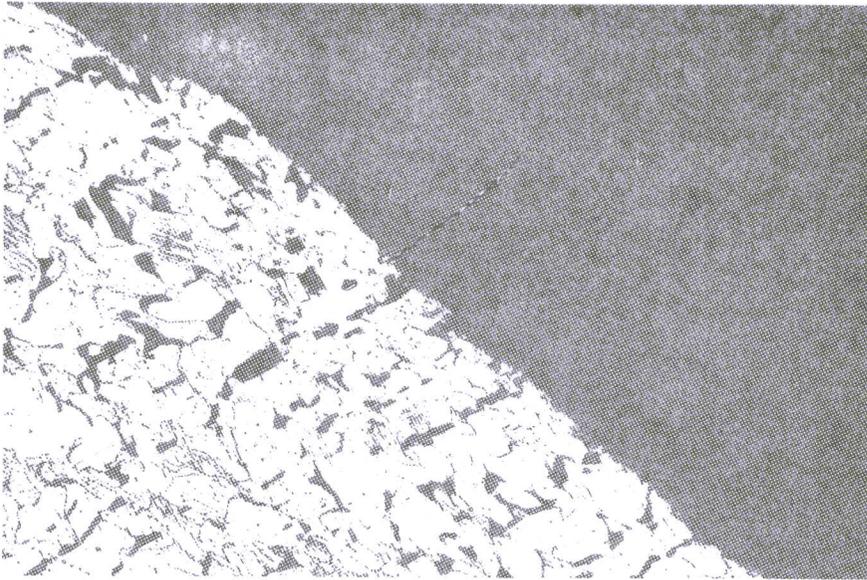
V = 2000:1

11.3

Transportauge Nr. 9

Sprödbbruch

V = 700:1

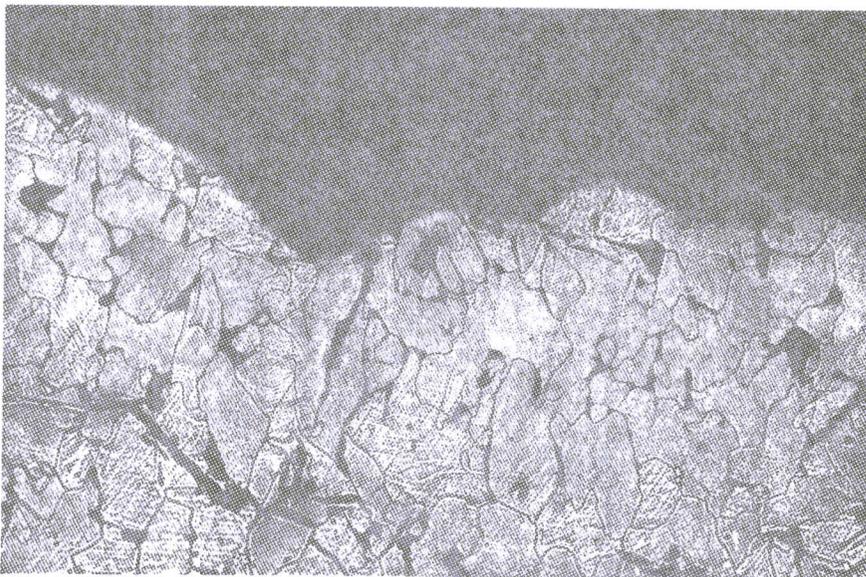


12.1

Transportauge Nr. 1

Scherbruch

V = 200:1

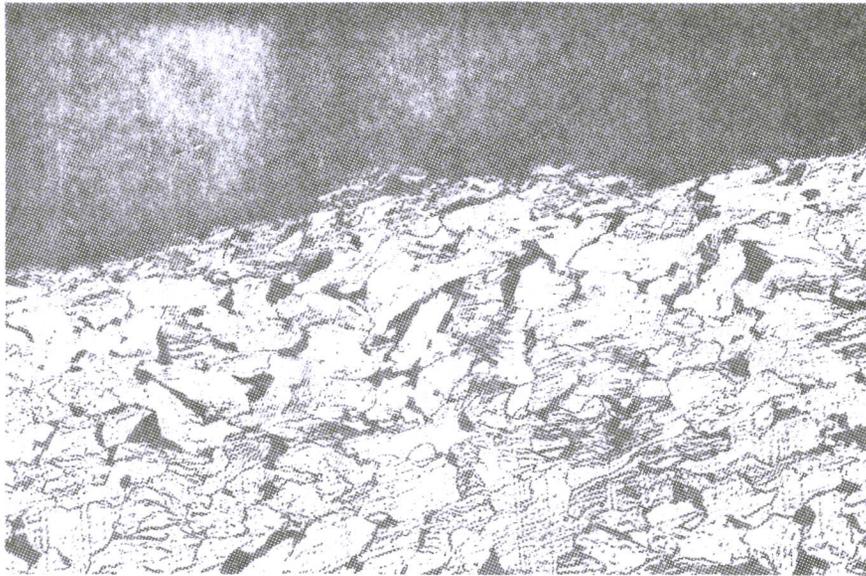


12.2

Transportauge Nr. 9

Sprödbbruch mit
Mikrospaltrissen

V = 200:1

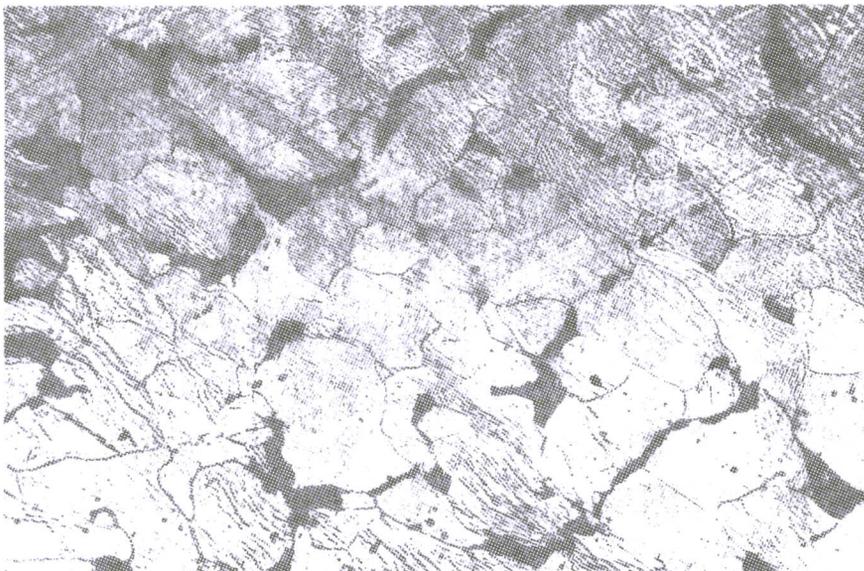


13.1

Transportauge Nr. 10

Normalspannungs-/
Scherbruch

V = 200:1

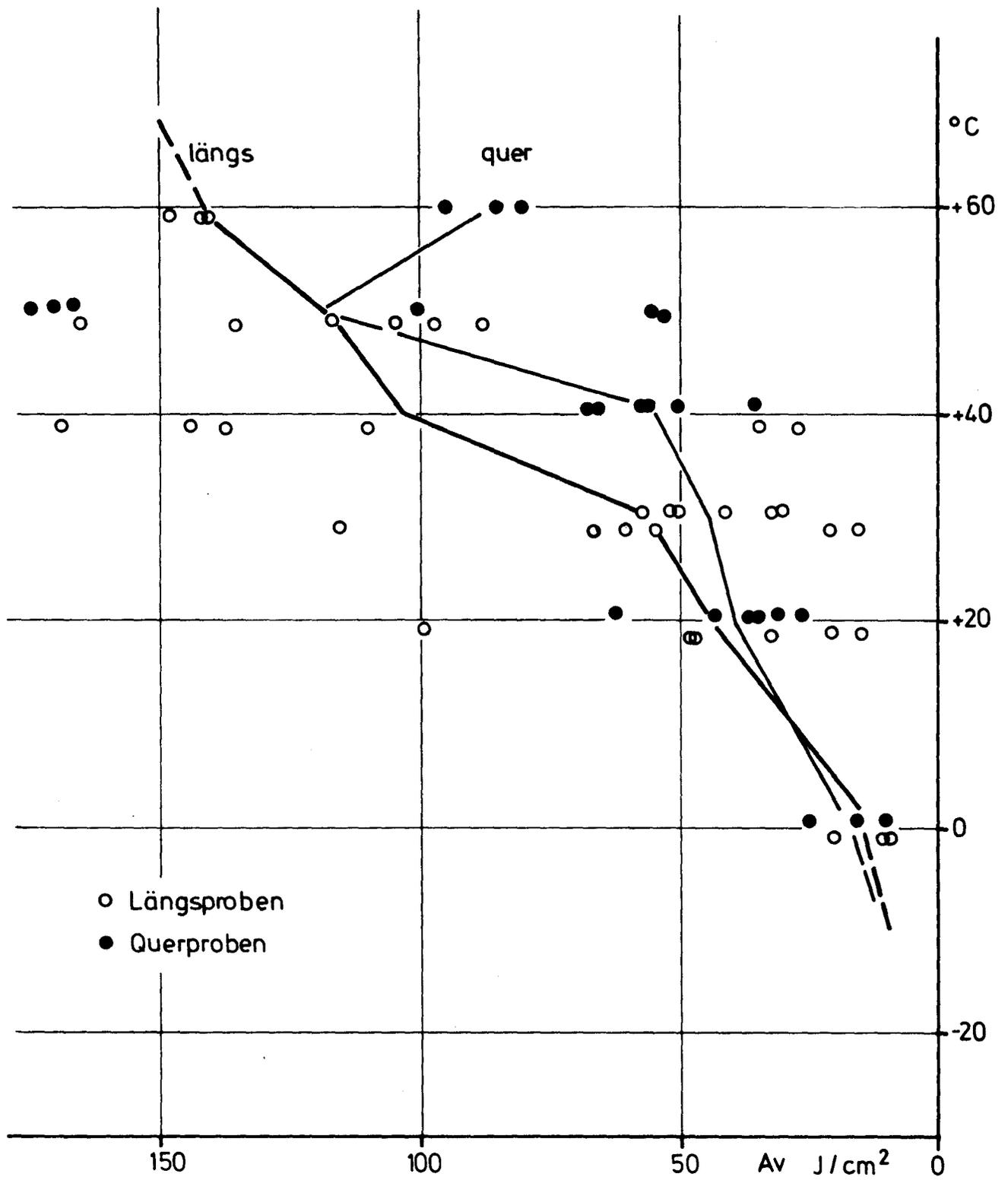


13.2

Transportauge Nr. 10

Normalspannungs-/
Scherbruch

V = 500:1



Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

20t Auge

M. = 1 : 5

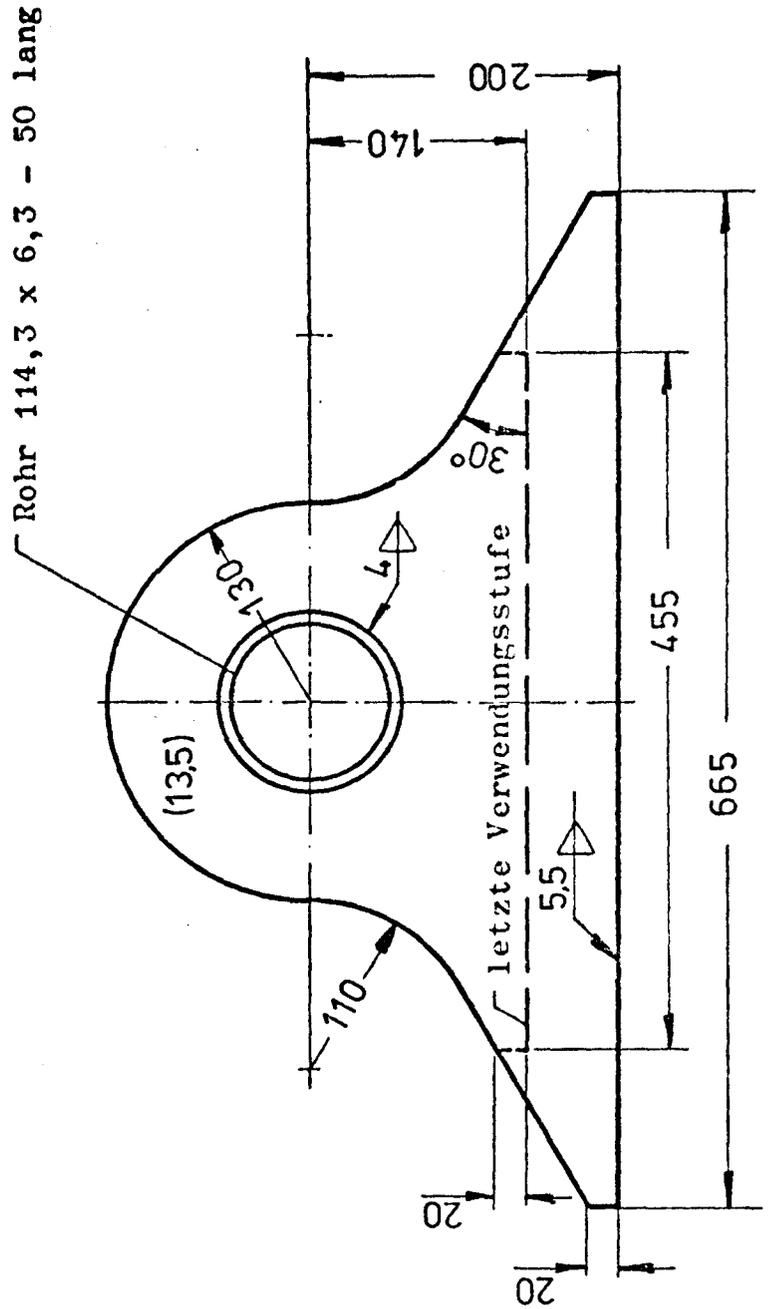
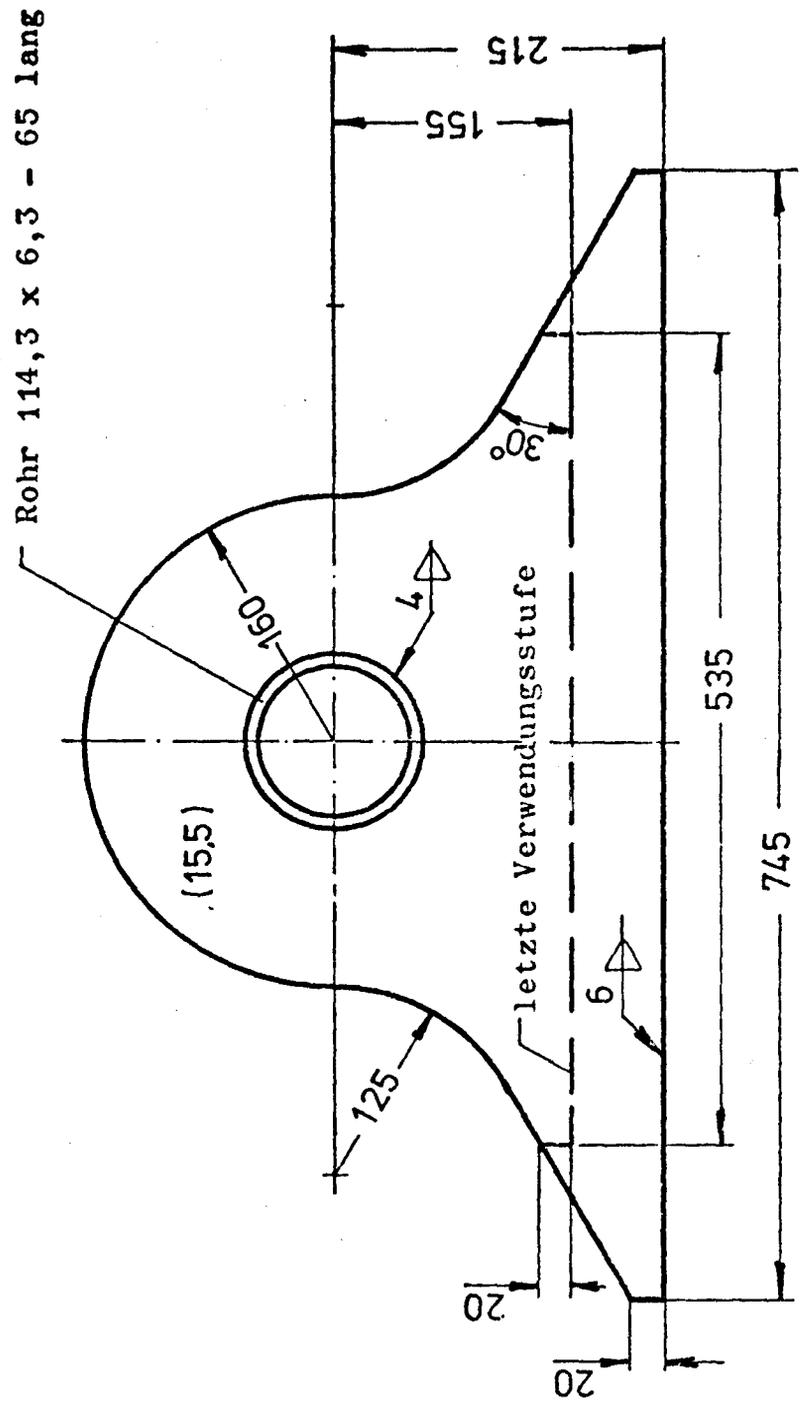


Bild 15

30t Auge

M. = 1:5



40t Auge

M. = 1:5

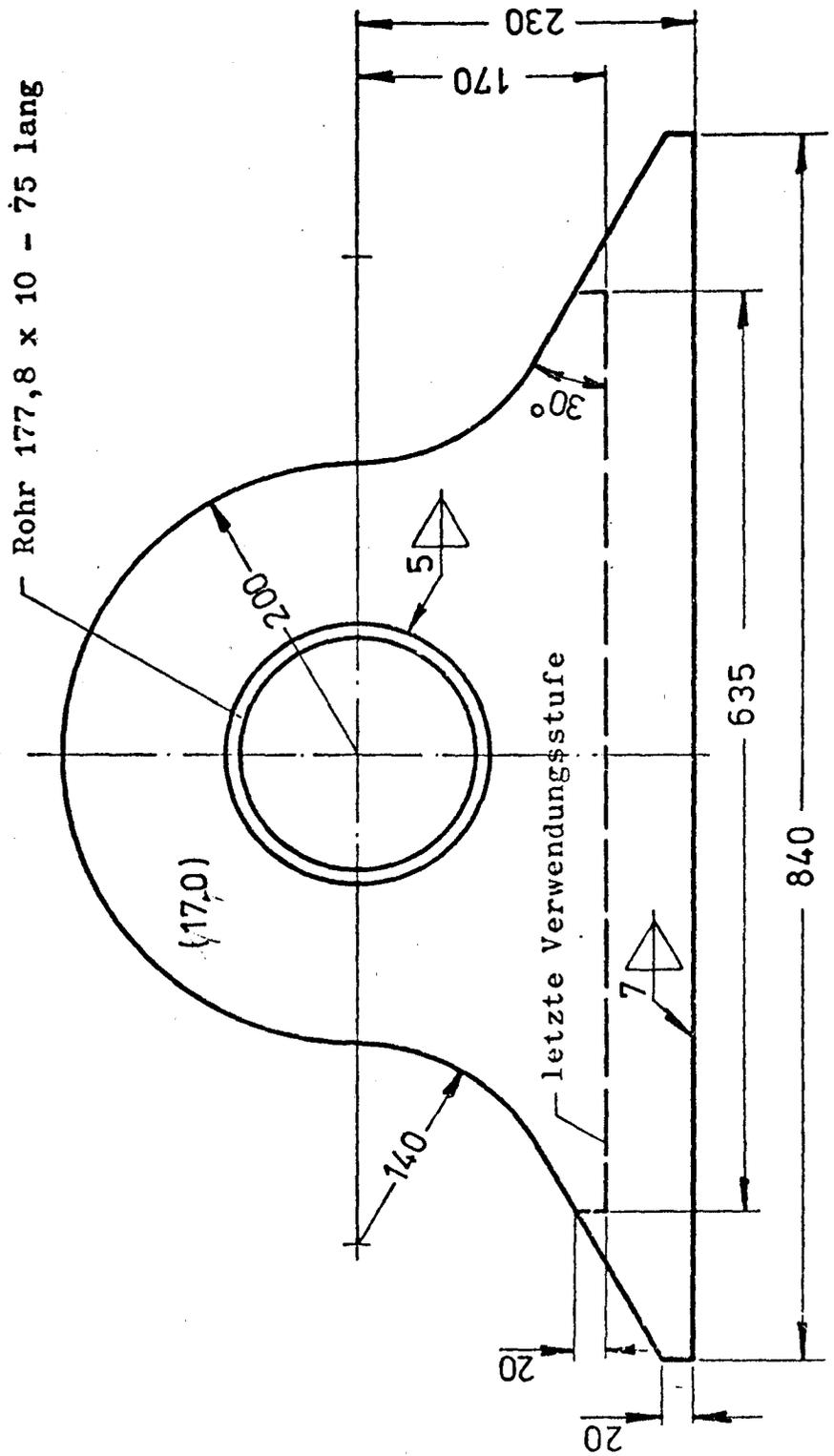


Bild 17

80t Auge

M.= 1:5

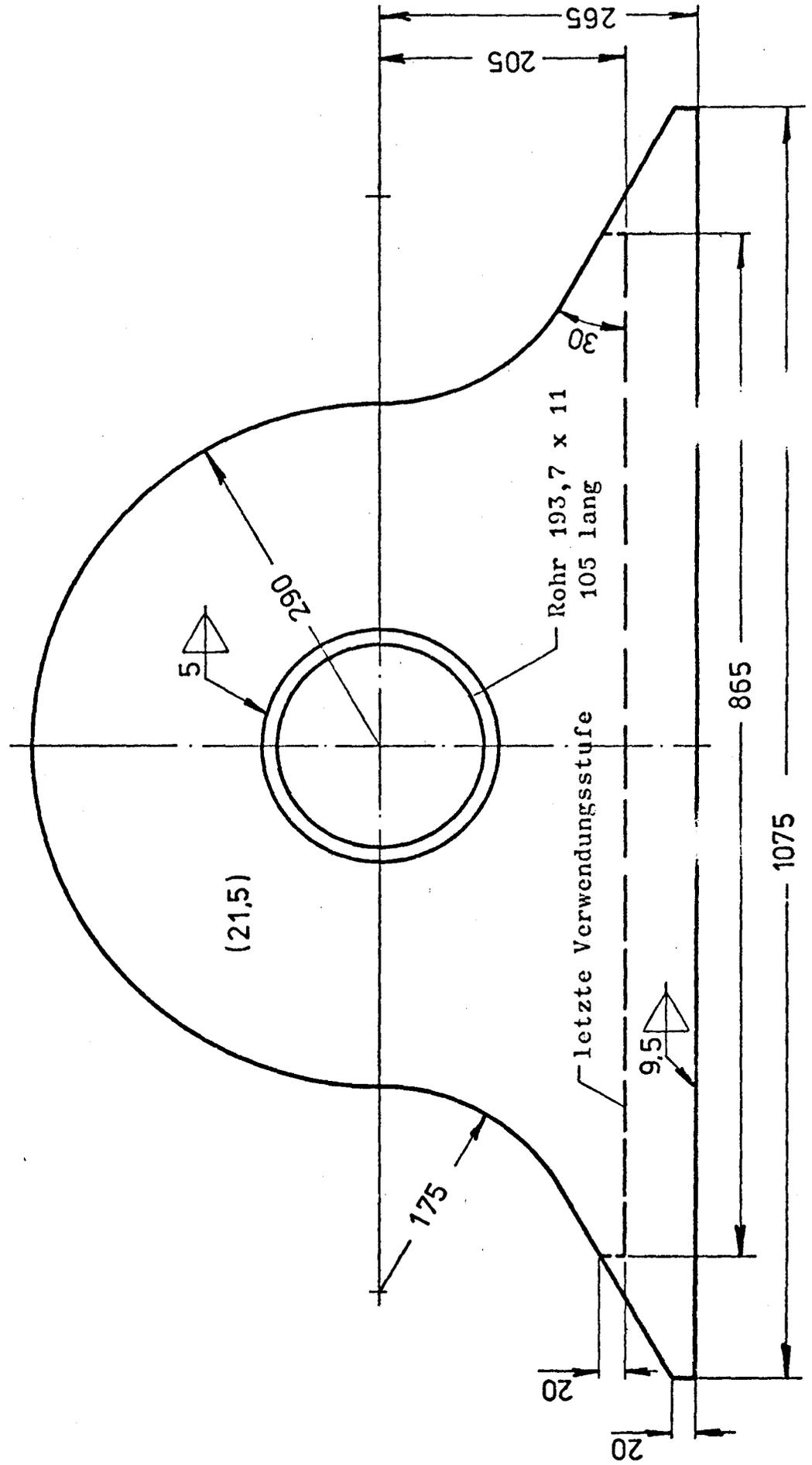
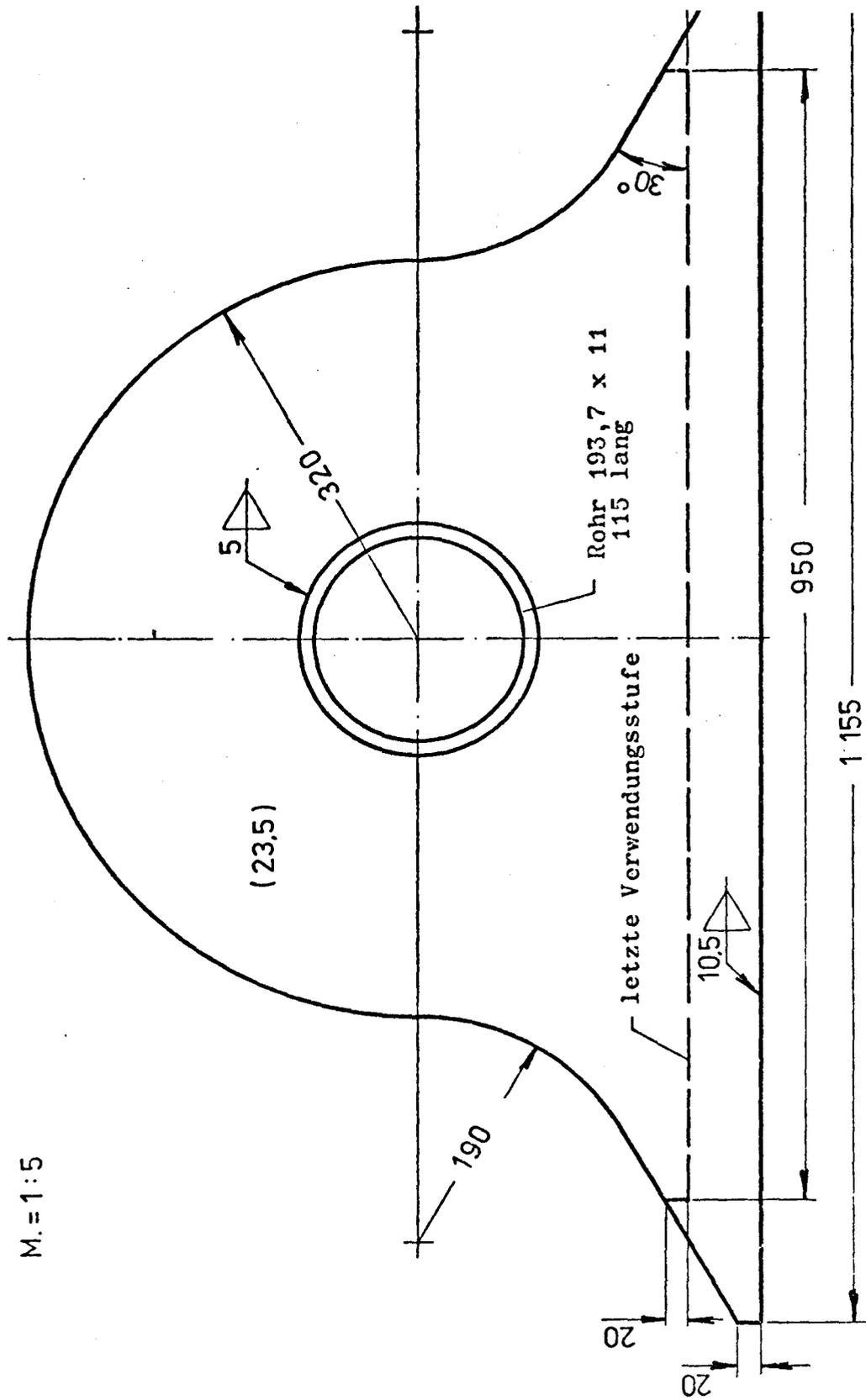


Bild 19

100 t Auge

M. = 1:5



150t Auge

M. = 1:5

