



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300713

- XXII. Heft: Verhandlungen der in Dresden (1866) und Berlin (1890) abgehaltenen Conferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsmethoden für Bau- und Konstruktions-Materialien. — Nachruf von A. Martens. Mit 1 Portrait in Lichtdruck. VIII u. 164 S. Preis M. 12.—
- XXIII. Heft: Verhandlungen der in Wien im Jahre 1893 abgehaltenen Conferenz zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsmethoden für Bau- und Konstruktions-Materialien. Bearbeitet von Prof. H. Gollner und Prof. A. Martens. Mit einer Tafel in Steindruck. 111 S. Preis M. 9.—
- XXIV. Heft: Die Biegeelastizität der Steinbalken. Belastungsversuche an einem Tonnenflechtwerkdache. Versuche über die Ausschläge schnell umlaufender Wellen. Mit 16 Abbildungen im Text, 2 Lichtdr.- und 3 lithographischen Tafeln. 56 S. Preis M. 12.—
- XXV. Heft: Dauerversuche von Bauschinger, ausgeführt in den Jahren 1886 — 1893. Prüfung der Werderschen Festigkeitsmaschine. Kniekversuche mit Winkel-eisen. Härteversuche. Mit 13 Abbildungen im Text und 4 lithographierten Tafeln. 48 S. Preis M. 10.—
- XXVI. Heft: I. Festigkeit und Abnützbarkeit von Hartsteinen. — II. Festigkeitsversuche mit Eisenbahn-Wagen-Kuppelungen. — III. Ueber die Biegefestigkeit gekrümmter Stäbe. Mit 1 Abbildung im Text und 2 lithographischen Tafeln. 43 S. Preis M. 8.—
- XXVII. Heft: I. Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes. — II. Prüfung einer gusseisernen Säule auf Ausknicken. — III. Das elastische Verhalten des Erdbodens. — IV. Probe-Belastung von Decken. Mit 6 Abbildungen im Text, 4 Stein- u. 2 Lichtdrucktafeln. 43 Seiten. 1900. Preis M. 12.—
- XXVIII. Heft: I. Versuche über Elastizität und Festigkeit von Gusseisen. — II. Ueber die Abhängigkeit der Härteziffer von der Grösse der Druckfläche und dem Krümmungshalbmesser. — III. Druckversuche mit Wasserkissen. Mit 14 Abbildungen im Text und 4 Steintafeln. 48 Seiten. 1902. Preis M. 10.—



MITTHEILUNGEN

AUS DEM

MECHANISCH-TECHNISCHEN LABORATORIUM

DER

K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE MÜNCHEN.

GEGRÜNDET VON J. BAUSCHINGER.

NEUE FOLGE.

HERAUSGEGEBEN VON

AUGUST FÖPPL.

DER GANZEN REIHE ACHTUNDZWANZIGSTES HEFT.

INHALT:

- I. VERSUCHE ÜBER ELASTICITÄT UND FESTIGKEIT VON GUSSEISEN. — II. ÜBER DIE ABHÄNGIGKEIT DER HÄRTEZIFFER VON DER GRÖSSE DER DRUCKFLÄCHE UND DEM KRÜMMUNGSHALBMESSER. — III. DRUCKVERSUCHE MIT WASSERKISSEN.

F. Nr. 20 775



MIT 14 ABBILDUNGEN IM TEXT UND 4 STEINTAFELN.

MÜNCHEN

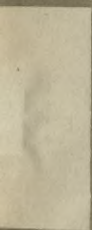
THEODOR ACKERMANN

KÖNIGLICHER HOF-BUCHHÄNDLER.

1902.

25 16.

22.



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315053



J. X. 47/1902

MITTHEILUNGEN

AUS DEM

MECHANISCH-TECHNISCHEN LABORATORIUM

DER

K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE MÜNCHEN.

GEGRÜNDET VON J. BAUSCHINGER.

NEUE FOLGE.

HERAUSGEGEBEN VON

AUGUST FÖPPL.

DER GANZEN REIHE ACHTUNDZWANZIGSTES HEFT.

INHALT:

- I. VERSUCHE ÜBER ELASTICITÄT UND FESTIGKEIT VON GUSSEISEN. — II. ÜBER DIE ABHÄNGIGKEIT DER HÄRTEZIFFER VON DER GRÖSSE DER DRUCKFLÄCHE UND DEM KRÜMMUNGSHALBMESSEK. — III. DRUCKVERSUCHE MIT WASSERKISSEN.

MIT 14 ABBILDUNGEN IM TEXT UND 4 STEINTAFELN.

MÜNCHEN

THEODOR ACKERMANN

KÖNIGLICHER HOF-BUCHHÄNDLER.

1902.

8-X.47/1802



MITTHELUNGEN

WISSENSCHAFTLICHES LABORATORIUM

206V/47.X.2



998V.1866

AUGUST FORB

Versuche über Elasticität und Festigkeit von Gusseisen.

Gusseisen ist ein wenig zuverlässiges Material. Nicht nur die Festigkeit, auch die Elasticität schwanken von einem Stücke zum anderen oft in hohem Grade. Ganz abgesehen davon, dass sehr verschiedene Gusseisensorten verwendet werden, gelingt es selbst dann, wenn es sich um Probekörper handelt, die unmittelbar neben einander aus demselben grösseren Gussstücke herausgearbeitet worden sind, nur selten, gut mit einander übereinstimmende Resultate bei einer grösseren Zahl von Parallel-Versuchen zu erhalten. Unregelmässigkeiten in der Zusammensetzung, grössere oder kleinere Einsprengungen, Schlackeneinschlüsse, Hohlräume, Spritzkugeln u. dgl., die nur selten ganz fehlen, auch Eigenspannungen, die durch ungleichförmige Abkühlung bei der Herstellung des Gussstückes entstanden sind, und die sich in den daraus entnommenen Proben, je nach den Umständen ganz oder zum Theile noch erhalten können, bewirken diese Unterschiede in erster Linie. Ferner können auch Unvollkommenheiten bei der Einspannung und überhaupt bei der Versuchsausführung Manches zu dem Mangel an Uebereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen beitragen. Bei einem verhältnissmässig spröden Metalle, wie dem Gusseisen, machen sich Fehler in der Einspannung namentlich bei den Festigkeitsziffern weit mehr bemerklich, als bei dehnbaren Stoffen. Zwar handelt es sich in diesem Falle nicht um einen Mangel, der dem Materiale an sich anhaftet, sondern um einen Mangel des Prüfungsverfahrens. Andererseits treten aber dieselben Schwierigkeiten, denen man bei der Versuchsausführung begegnet, bei den praktischen Verwendungen der Gussstücke in noch verstärktem Masse hervor. Sie sind daher ebenfalls geeignet, zur Vorsicht bei der Verwendung von Constructionstheilen aus Gusseisen, die zur Aufnahme von grösseren Spannungen bestimmt sind, zu mahnen. In der That haben auch die praktischen Erfahrungen, die man mit solchen Constructionen gemacht hat, schon in den meisten Fällen zum Ersatze des Gusseisens durch Schmiedeisen oder Stahl geführt.

Unter den vorher geschilderten Umständen ist es ein recht mühsames und im Allgemeinen nur wenig dankbares Geschäft, das Verhalten des Gusseisens zu studiren, falls es in der Absicht unternommen wird, dabei zu allgemein gültigen Gesetzen zu gelangen. Andererseits ist aber das Gusseisen ein sehr wichtiges Constructionsmaterial, das immer noch für viele Verwendungszwecke, bei denen seine Elasticität und Festigkeit in Frage kommt, sehr häufig verwendet wird und sich auch schwer durch andere Stoffe ersetzen lässt. Manche Vorkommnisse aus der technischen Praxis regen daher immer von Neuem wieder zur Beschäftigung mit ihm an. In der Regel handelt es sich dabei um unvorhergesehene und nicht leicht zu erklärende Brucherscheinungen. In der That bin ich auch selbst zu einigen der Versuche, die ich hier zu beschreiben beabsichtige, durch einen solchen Betriebsunfall gekommen, über den ich mich als Sachverständiger in einem Rechtsstreite zu äussern hatte. Da mir das, was ich hierbei fand, für die Beurtheilung des Streitfalles von Nutzen war, entschloss ich mich, diese Versuche noch etwas weiter auszudehnen und sie sammt einigen anderen, die zu verschiedenen Zeiten in anderer Absicht unternommen waren, da sie sich ebenfalls auf das Verhalten von Gusseisen bezogen, zusammen zu veröffentlichen. Einen Anspruch auf Vollständigkeit können diese Versuche freilich ebenso wenig erheben, wie alle früheren Veröffentlichungen über diesen Gegenstand. Namentlich lag es keineswegs in meiner Absicht, verschiedene Gusseisensorten mit einander zu vergleichen. Auch das Verhalten bei verschiedenen Temperaturen, das freilich sehr wichtig ist, aber neuerdings von anderen Seiten näher studirt wurde, lag ausserhalb des Planes meiner Arbeit. Immerhin denke ich, dass einige meiner Ergebnisse, insofern sie auf Versuchsanordnungen beruhen, die von den herkömmlichen abweichen, nicht ohne Werth für die Beurtheilung des Gusseisens sein werden.

Biegungsversuche mit geschlitzten Ringen.

Die für die Beurtheilung praktisch vorkommender Fälle wichtigste Beanspruchungsart des Gusseisens besteht in der Biegung. Zwar wird von der hohen Druckfestigkeit des Gusseisens in der Praxis noch weit mehr Gebrauch gemacht, als von seinem Biegungswiderstande. Bei reinen Druckbeanspruchungen versagt das Gusseisen aber selten. Reine Zugbeanspruchungen kommen andererseits nur in einzelnen Fällen vor. Selbst bei den unter innerem Drucke stehenden Röhren gibt die Zugbeanspruchung nicht allein den Ausschlag, schon deshalb, weil man dabei stets eine Mitwirkung von Gussspannungen in der Rohrwand befürchten muss, die auf eine Biegungsbeanspruchung hinausläuft. Auf die Untersuchung der bei der Biegung hervortretenden elastischen und Festigkeitseigenschaften des Gusseisens ist daher besonderes Gewicht zu legen.

Gewöhnlich untersucht man die Biegungserscheinungen an einem geraden Balken, der an beiden Enden unterstützt und in der Mitte belastet wird. In einem der folgenden Paragraphen werde ich auch selbst einige dahin gehörige Versuchsergebnisse mittheilen. Gegen diese Versuchsanordnung lässt sich aber ein gewichtiger Einwand erheben. Beim Gusseisen wachsen nämlich, wie man weiss, die Formänderungen schneller als die Lasten. Wird nun ein Balken in der Mitte belastet, so ist die Beanspruchung in den verschiedenen Querschnitten sehr verschieden. Der Biegungspfeil, den man beobachtet, kommt durch Formänderungen an allen diesen verschieden beanspruchten Stellen zu Stande. Daher kann das Anwachsen dieses Biegungspfeiles mit der Last kein reines Bild von den elastischen Eigenschaften des Materials bei wachsender Beanspruchung liefern. Es ist nicht einmal ausgeschlossen, dass sogar die Spannungsvertheilung und hiermit die Bruchgefahr durch diesen Umstand beeinflusst wird. Jedenfalls muss aber, um die Abhängigkeit der Biegungselasticität von der Grösse der Beanspruchung richtig zu erhalten, eine Anordnung getroffen werden, bei der alle Querschnitte von jenem Theile des Versuchskörpers, dessen Gestaltänderung beobachtet wird, gleiche Beanspruchung erfahren.

Freilich lässt sich auch dann nicht vermeiden, dass die Spannungen innerhalb jedes Querschnitts sehr verschieden gross und auch von entgegengesetztem Vorzeichen sind. Aus diesem Grunde lässt die Biegungselasticität überhaupt keinen einfachen Vergleich mit der Zug- und Druck-Elasticität zu. Ausserdem hängt darum auch die Biegungselasticität des Stabs von der Querschnittsgestalt ab.

Die Spannungsunterschiede innerhalb eines Querschnitts sind aber andererseits der Biegungsbeanspruchung als

solcher eigenthümlich; sie müssen sich daher in der Biegungselasticität stets geltend machen und dürfen und sollen in dem Versuche nicht vermieden werden. Nur darauf muss geachtet werden, dass auch die Querschnittsform von Einfluss ist; man darf daher Biegungsversuche, die mit Stäben rechteckigen Querschnitts gewonnen sind, nicht unmittelbar mit denen für Rundstäbe vergleichen u. s. f. Bei den Versuchen, über die ich hier berichten will, kommen nur Stäbe mit rechteckigem Querschnitte vor.

Der vorher ausgesprochenen Forderung, dass die Beanspruchung für alle Querschnitte gleich gross sein soll, lässt sich bei einem geraden Balken, der beiderseits unterstützt ist, leicht dadurch genügen, dass man zwei gleich grosse Lasten in gleichen Abständen von den Auflagern aufbringt. Das zwischen beiden Lasten liegende mittlere Stück des Balkens ist dann auf reine Biegung (ohne Hinzukunft einer Scheerkraft) beansprucht und das Biegemoment ist in allen Querschnitten gleich gross. Die zu einer gegebenen Last gehörige Formänderung darf natürlich nur für dieses mittlere Stück festgestellt werden. Man darf also nicht den ganzen Biegungspfeil beobachten, sondern nur den von der Sehne aus gerechneten, die beide Lastangriffspunkte mit einander verbindet. Aus diesem Biegungspfeile folgt auch sofort durch einfache Rechnung die Grösse des Krümmungshalbmessers für den Kreisbogen, in den die ursprünglich gerade Stabaxe zwischen beiden Belastungsstellen durch die Biegung übergegangen ist.

Anstatt den Versuch in dieser nächstliegenden Form durchzuführen, änderte ich ihn noch ein wenig ab, so dass die erforderlichen Messungen in möglichst einfacher Weise vorgenommen werden konnten. Der Stab sollte von vornherein gekrümmt sein und zwar so, dass die Mittellinie nahezu einen vollen Kreis bildete. Dadurch geht der Stab in die Gestalt eines Ringes über, der an einer Stelle aufgeschlitzt ist. Probekörper von dieser Form liessen sich leicht von demselben Material und derselben Beschaffenheit — soweit dies bei Gusseisen überhaupt möglich ist — gewinnen, indem man sie von einem gusseisernen Wasserleitungsrohre von 80 cm Durchmesser auf einer grossen Drehbank neben einander abstechen liess. Die Ringe wurden mir von der Maschinenfabrik, die diese Arbeit besorgte, im geschlossenen Zustande übergeben. Das Aufschlitzen und die weitere Vorbereitung der Probekörper wurde im Laboratorium vorgenommen.

Eine Hälfte der Ringe wurde mit der Gusschale an der äusseren und inneren cylindrischen Begrenzungsfläche den Versuchen unterworfen, die andere Hälfte wurde

aussen und innen abgedreht. Die ursprüngliche Absicht ging dahin, Parallelversuche für Stäbe mit und ohne Guss-haut anzustellen. Sie liess sich aber nicht befriedigend durchführen, weil die Wanddicke eines solchen Wasserleitungsrohres zu wenig gleichmässig ist und die Stücke des daraus entnommenen gekrümmten Stabes, wenn er nicht auf den cylindrischen Flächen ebenfalls bearbeitet, werden darf, zu starken Schwankungen ausgesetzt ist. Ich werde zwar einige Versuchsergebnisse für die Stäbe mit Guss-haut ebenfalls mittheilen; aus dem angegebenen Grunde ist ihnen aber weniger Werth beizulegen, als den Versuchen mit allseitig bearbeiteten Stäben.

Schon das Aufschlitzen eines solchen Ringes lässt sich als ein Versuch ansehen. Man kann daraus entnehmen, inwiefern in dem Wasserleitungsrohre Guss-spannungen bestanden, die einer Biegungsbeanspruchung der Rohrwand entsprachen. Aus anderen Erfahrungen mit

Wasserleitungsröhren, an denen jedoch keine genaueren Untersuchungen durchgeführt wurden, ist mir bekannt, dass solche Ringe nach dem Aufschlitzen zuweilen sehr starke Krümmungsänderungen erfahren. Es mag daher hier eingeschaltet werden, dass neben der üblichen Prüfung der Wasserleitungsröhren mit der Druckpumpe, die vor der Verlegung mit jedem Rohre vorgenommen zu werden pflegt, auch eine gelegentliche Prüfung einzelner Ringe, die von den beiden Rohrenden durch Abdrehen zu entnehmen wären, auf Guss-spannungen sehr zu empfehlen wäre. Vielleicht liessen sich die unliebsamen Rohrbrüche dadurch stark einschränken. Das Wasserleitungsrohr, von dem die bei meinen Versuchen benützten Ringe entnommen wurden, war übrigens, wie sich sofort zeigen wird, in der Umfangsrichtung nur mit verhältnissmässig geringen Guss-spannungen behaftet.

A. Formänderung beim Aufschneiden der Ringe.

Der Querschnitt des Rings mit Guss-haut war ein Rechteck von 3 cm Breite und etwa 2,5 cm Höhe. Der innere Durchmesser betrug etwa 80 cm. Das Aufschneiden erfolgte mit einer Säge von Hand; der Ring war hierbei in nächster Nachbarschaft der bearbeiteten Stelle eingespannt und bleibende Verbiegungen in Folge der Bearbeitung waren daher ausgeschlossen. Zu beiden Seiten des Querschnitts, durch den der Sägeschnitt geführt werden sollte, waren Marken angebracht, deren Abstand vor und nach dem Aufschneiden mit Hülfe eines Zirkels gemessen wurde. Da sich deutliche Marken im Gusseisen selbst nicht anbringen lassen, wurden an den betreffenden Stellen kleine Messingstiftchen von etwa 1,5 mm Durchmesser und ebenso grosser Länge eingelassen, auf denen feine Körner die Endpunkte der Messstrecke bezeichneten. — Selbstverständlich brachte man ein solches Stiftenpaar auf jeder der beiden ebenen Seitenflächen des Ringes ungefähr an der gleichen Stelle an, um eine Kontrolle zu haben; für das Aufklaffen bzw. Zusammenziehen des Ringes nach dem Aufschneiden wurde das Mittel aus den Aenderungen beider Messstrecken als massgebend angesehen.

Beim Messen der Formänderung nach dem Aufschneiden muss man sich noch einer besonderen Vorsichtsmassregel bedienen. Legt man nämlich den aufgeschnittenen Ring auf eine horizontale Tischplatte, so findet man die Spaltbreite an der Schlussstelle immer wieder anders, wenn der Ring auf der Tischplatte ein wenig verschoben wurde. Dies hängt mit der Reibung zwischen Ring und Tischplatte zusammen. Dem Eigengewichte des Rings entspricht eine gewisse Reibung, die sich bei jeder Lage einer Bewegung, also auch einer Gestaltänderung des Rings

widersetzt und die ausreicht, um eine kleine Verbiegung des Rings aufrecht zu erhalten. Man ist daher, wenn man den Ring auf einer Tischplatte vor sich liegen hat, niemals sicher, ob man ihn im spannungslosen, unverbogenen, von äusseren Kräften unbeeinflussten Zustande vor sich hat.

Diesem Uebelstande liess sich aber leicht abhelfen, indem man den Ring auf Kugeln legte. Dazu wurden gewöhnliche Gussstahlkugeln von etwa 5 bis 8 mm Durchmesser, wie man sie gerade zur Hand hatte — in jedem Versuche natürlich alle unter sich von gleicher Grösse — verwendet. Sechs Kugeln, von denen zwei die sich gegenüber liegenden Enden zu beiden Seiten des Spalts unterstützen, während die übrigen ungefähr gleichmässig über den Umfang vertheilt sind, reichen schon ziemlich aus, um den Ring so zu unterstützen, dass die Biegung durch das Eigengewicht unmerklich wird; besser ist es, noch einige mehr zu nehmen. Da keine grössere Richtplatte, auf die man den Ring hätte auflegen können, zur Verfügung stand und eine hölzerne Tischplatte zu uneben ist, um dem Zwecke zu entsprechen, half man sich dadurch, dass zuerst einer der noch nicht aufgeschnittenen Ringe auf eine hölzerne Tischplatte gelegt wurde. Die nach oben gekehrte, sauber abgedrehte Fläche dieses Rings bildete nun einen Theil einer horizontalen Ebene und so schmal diese Fläche auch war, genügte sie doch, um den zweiten Ring, an dem man die Messung vornehmen wollte, mit Zwischenschiebung der Kugeln darauf aufzulagern. Der Ring ist nun wegen der geringen rollenden Reibung der Kugeln zwischen den beiden abgedrehten Eisenflächen in horizontaler Richtung sehr leicht verschieblich und nach jeder Verschiebung findet man die Grösse der Messstrecke

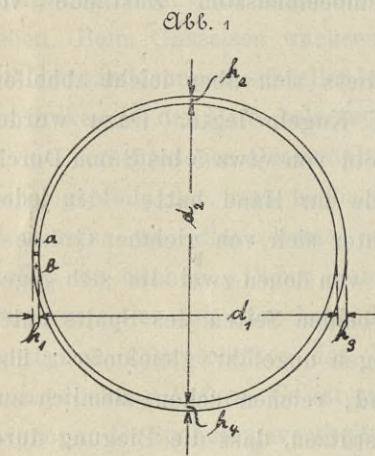
zwischen den beiden Messingstiftchen oder die davon abhängige Spaltbreite ebenso gross wie vorher.

Bei dem Rohre, von dem die Ringe entnommen waren, bestanden Gussspannungen von solcher Art, dass sich die Ringe nach dem Aufschneiden zusammenzogen. Es genügte daher nicht, einen einfachen Sägeschnitt zu führen, der eine Schicht von etwa 1 mm Breite aus dem Ringe entnahm, sondern man musste noch einen zweiten daneben setzen, so dass zwischen beiden ein schmaler Streifen von einigen mm Breite herausfiel. Dann erst konnte der Ring so weit zusammen federn, wie es seiner von äusseren Kräften nicht beeinflussten Gestalt entsprach.

Leider wurde versäumt, die Ringe vor dem Abstechen von dem Rohre nach der Reihenfolge, in der sie im Rohre neben einander lagen, zu bezeichnen. Nachher liess sich dies nicht mehr feststellen und die alsdann eingeführte Nummerirung ist willkürlich gewählt, ohne über die gegenseitige Lage der Ringe zu einander irgend einen Aufschluss zu geben.

Nach diesen Vorbemerkungen lasse ich die einzelnen Messungsergebnisse folgen.

Erster Ring, mit Gusshaut,



in der Wandstärke ziemlich stark verschieden, wie aus Abb. 1 und den weiter folgenden Zahlenangaben hervorgeht, wurde an der schwächsten Stelle aufgeschnitten. Die Marken für die Messung auf der Ansichtsseite sind mit a , b , die auf der gegenüber liegenden Seite mit a^1 b^1 bezeichnet. Die Messstrecken waren

| | $a-b$ | ; | a^1-b^1 |
|----------------------|---------|---|-----------|
| vor dem Aufschneiden | 30,0 mm | | 30,0 mm |
| nach „ „ | 27,4 „ | | 27,5 „ |

Zusammenziehung des Spalts daher 2,55 mm. Breite des Rings 30,0 mm, Gewicht 13,39 kg. Die Stärken waren $h_1 = 20,8$, $h_2 = 25,5$, $h_3 = 23,4$; $h_4 = 25,0$ mm und die inneren Durchmesser vor dem Aufschneiden $d_1 = 803,8$, $d_2 = 798,5$ mm.

Zweiter Ring, mit Gusshaut,

ebenfalls an der dünnsten Stelle aufgeschnitten, Gewicht 13,31 kg, Breite 30,0 mm, Stärken $h_1 = 21,0$, $h_2 = 25,0$, $h_3 = 25,0$, $h_4 = 26,5$ mm, Durchmesser $d_1 = 802,0$, $d_2 = 796,5$ mm. Die Messstrecken waren

| | $a-b$ | ; | a^1-b^1 |
|----------------------|---------|---|-----------|
| vor dem Aufschneiden | 29,8 mm | | 30,0 mm |
| nach „ „ | 27,4 „ | | 27,5 „ |

Zusammenziehung des Spalts daher 2,45 mm.

Dritter Ring, mit Gusshaut,

an der dicksten Stelle aufgeschnitten, Gewicht 13,03 kg, Breite 30,0 mm, Stärken $h_1 = 27,0$, $h_2 = 25,0$, $h_3 = 24,0$, $h_4 = 24,0$ mm, Durchmesser $d_1 = 798,5$, $d_2 = 799,0$ mm. Die Messstrecken waren

| | $a-b$ | ; | a^1-b^1 |
|----------------------|---------|---|-----------|
| vor dem Aufschneiden | 24,9 mm | | 24,9 mm |
| nach „ „ | 24,3 „ | | 24,3 „ |

Zusammenziehung des Spalts daher 0,6 mm.

Bei diesem Ringe waren auch auf dem zur Spaltebene senkrechten Durchmesser Marken angebracht worden, deren Abstand vor dem Auseinanderschneiden auf der einen Seite 823,1, auf der Gegenseite 823,7 und nach dem Aufschneiden 823,0 bzw. 823,6 betrug. Der zugehörige Durchmesser hatte sich daher um 0,1 mm verkleinert.

Vierter Ring, mit Gusshaut,

ebenfalls an der dicksten Stelle aufgeschnitten, Gewicht 13,17 kg, Breite 30,0 mm, Stärken $h_1 = 26,5$, $h_2 = 23,4$, $h_3 = 25,0$, $h_4 = 25,8$ mm; d_1 und d_2 nicht gemessen. Die Messstrecken waren

| | $a-b$ | ; | a^1-b^1 |
|----------------------|---------|---|-----------|
| vor dem Aufschneiden | 24,8 mm | | 24,9 mm |
| nach „ „ | 23,9 „ | | 24,1 „ |

Zusammenziehung des Spalts daher 0,85 mm. Auch hier verkleinerte sich der zur Spaltebene senkrechte Durchmesser um 0,1 mm; dabei ist jedoch zu beachten, dass bei der Messung dieser langen Strecken die Zehntel Millimeter nicht mehr ganz sicher sind. Hierauf ist es vielleicht auch zurückzuführen, dass sich die Aenderungen der Spaltbreite und des Durchmessers in beiden Fällen nicht ungefähr wie 3,14 : 1 verhalten, wie sonst wohl zu erwarten gewesen wäre.

Die folgenden Ringe waren sämtlich aussen und innen gut centrisch abgedreht, so dass die Gusshaut und mit ihr auch die Unregelmässigkeiten in der Wandstärke h wegfielen. Ich gebe hier nicht mehr die Längen der Messstrecken vor und nach dem Aufschneiden im Einzelnen, sondern nur die Aenderungen an, die sie durch das Aufschneiden erfuhren.

Fünfter Ring, abgedreht,

Gewicht 10,63 kg, Durchmesser $d = 803,2$, Breite = 30, Stärke $h = 19,4$ mm, Zusammenziehung des Spalts 1,1 mm. Bei dem Vergleiche dieser Zahl mit den vorhergehenden ist zu beachten, dass das System der Gussspannungen durch Wegnahme des Materials beim Abdrehen geändert

wird; voraussichtlich würde derselbe Ring eine grössere Spaltzusammenziehung erfahren haben, wenn er vor dem Abdrehen aufgeschnitten worden wäre.

Sechster Ring, abgedreht,

Gewicht 10,66 kg, Durchmesser $d = 803,5$, Breite = 30,0, Stärke $h = 19,4$ mm, Spaltzusammenziehung nicht gemessen; dagegen wurde der zum Spalt senkrechte Durchmesser nach dem Aufschneiden (soweit die Genauigkeit der Messung reicht) unverändert gefunden.

Siebenter Ring, abgedreht,

Gewicht 10,65 kg, Durchmesser $d = 803,3$, Breite 30,0, Stärke $h = 19,5$ mm. Der zum Spalt senkrechte Durchmesser verkleinerte sich nach dem Aufschneiden um 0,3 mm. Nach dieser Messung wurde der Ring in einem Schmiedefeuer, durch das man ihn der Reihe nach hindurchzog, gut ausgeglüht, in der Annahme, dass die Gussspannungen, die etwa nach dem Aufschneiden noch zurückgeblieben

sein konnten, dadurch beseitigt oder vermindert würden und dass dies eine weitere Gestaltänderung zur Folge haben könne. Nachdem der Ring wieder erkaltet war, hatte sich aber der Durchmesser, soweit die Genauigkeit der Messung reichte, gegen vorher nicht mehr verändert.

Achter Ring, abgedreht,

Gewicht 10,64 kg, Durchmesser $d = 803,2$, Breite = 30,0, Stärke $h = 19,4$ mm. Verkleinerung des Durchmessers nach dem Aufschneiden 0,7 mm.

Neunter Ring, abgedreht,

Gewicht 10,64 kg, Durchmesser $d = 803,2$, Breite = 30,0, Stärke $h = 19,4$ mm. Verkleinerung des Durchmessers nach dem Aufschneiden 1,5 mm.

Zehnter Ring, abgedreht,

Gewicht 10,61 kg, Durchmesser $d = 803,4$, Breite = 30,0, Stärke $h = 19,25$ mm. Verkleinerung des Durchmessers nach dem Aufschneiden 0,3 mm.

B. Folgerungen aus diesen Versuchsergebnissen.

Ueberblickt man die vorhergehenden Zahlenangaben, so fällt vor Allem die starke Verschiedenheit der Formänderung nach dem Aufschneiden auf. Daraus geht hervor, dass das System der Gussspannungen in einem solchen Rohre von sehr verwickelter und schnell wechselnder Art sein muss. Leider fehlt jeder Anhalt dafür, wie sich die einzelnen Ringe in dem Rohrabschnitte, aus dem sie entnommen waren, aufeinander folgten; sonst würde man in dieser Hinsicht vielleicht noch weitere Schlüsse ziehen können. Misslich ist auch, dass nicht bei allen Ringen die Spaltzusammenziehung, die, wie auch aus anderen Versuchen hervorgeht, stets viel grösser ist, als die Durchmesserverkleinerung, gemessen wurde, sondern bei den abgedrehten Ringen meist nur diese letztere. Dies rührt davon her, dass bei der Ausführung der Versuche anfänglich nicht an eine systematische Verwerthung dieser Messungen, wie wir sie hier im Auge haben, gedacht wurde. Der Versuchszweck war zunächst ein anderer; er erforderte, dass diese Messungen nebenher mit genügender Genauigkeit angestellt wurden und später erst kam der Wunsch, sie nach dieser Richtung hin zu verarbeiten.

Ein Wechsel im Vorzeichen war freilich im Verhalten dieser zusammengehörigen Ringe nicht zu beobachten. Nur der sechste Ring liess keine messbare Formänderung erkennen; alle übrigen zogen sich nach dem Aufschneiden zusammen, am meisten der abgedrehte neunte Ring. Daraus ist zu schliessen, dass bei diesen Ringen, so lange sie noch zusammenhingen, die äusseren Fasern gedrückt, die nach innengelegenen gezogen waren. Um zu einer Ab-

schätzung der Grösse dieser Beanspruchung zu gelangen, nehme man an, dass die ursprünglich kreisförmige Mittellinie des Rings auch bei der Formänderung nach dem Aufschneiden genau kreisförmig geblieben sei. Dabei muss freilich sofort hinzugefügt werden, dass diese Annahme durchaus willkürlich ist und wahrscheinlich keineswegs genau zutrifft. Man darf vielmehr die Beanspruchung, die auf Grund dieser Annahme berechnet wird, nur als eine untere Grenze betrachten; in Wirklichkeit kann die Spannung an der gefährlichsten Stelle beträchtlich grösser ausfallen.

Nach einer bekannten Formel der Elasticitätstheorie (vgl. z. B. meine Vorlesungen über Mechanik, Band III, Gl. 111, S. 209 d. 2. Auflage) ist

$$\frac{1}{\rho'} - \frac{1}{\rho} = \frac{M}{E\Theta}$$

wo auf der linken Seite die Krümmungsänderung des Rings steht, während die Bedeutung der übrigen Buchstaben leicht ersichtlich ist. Für den neunten Ring erhält man daher

$$M = E\Theta \left(\frac{1}{41,055} - \frac{1}{41,13} \right)$$

wenn die Längen in cm gemessen werden. Setzt man ferner $E = 10^6$ atm. und führt für Θ den Werth des Trägheitsmoments des rechteckigen Querschnitts von 3 cm Breite und 1,94 cm Höhe ein, so erhält man daraus

$$M = 81 \text{ cmkg.}$$

Für die Biegungsbeanspruchung der äussersten Fasern erhält man daraus — immer unter Zugrundelegung der vorher bezeichneten Annahme —

$$\sigma = \frac{6 \cdot 81}{3 \cdot 1,94^2} = 43 \text{ atm.}$$

Diese Biegungsspannung ist freilich nicht sehr erheblich. Man darf aber nicht vergessen, 1) dass sie an einzelnen Stellen erheblich grösser gewesen sein kann, 2) dass die Eigenspannungen vor dem Abdrehen des Rings voraussichtlich grösser gewesen sind, als nachher und 3) dass der Ring irgend einem normalen Rohre entnommen

war, das vorher kein Anzeichen dafür geliefert hatte, dass in ihm die Gussspannungen besonders gross gewesen seien. Offenbar gibt es vielmehr Rohre von denselben Abmessungen, bei denen das Federn der Ringe nach dem Aufschneiden einige Centimeter betragen dürfte. Ein Laboratorium hat natürlich nicht die Mittel, eine grosse Zahl von Rohren darauf hin zu prüfen und die ungünstigeren Fälle auf diese Weise selbst auszusuchen. Nur durch das Vorkommen von Betriebsunfällen, die zur Kenntniss eines Laboratoriumsleiters gelangen, kann dieser gelegentlich einen Einblick in solche Verhältnisse erlangen; leider wird ihm auch dann nicht immer Gelegenheit geboten, den Fall so zu untersuchen, wie er es verdiente.

C. Beanspruchung der Ringe durch gleichmässige Biegung.

Nachdem die Ringe aufgeschnitten waren, wurden sie an beiden Enden mit Hülfe von Einspannvorrichtungen gefasst, von denen aus Kräftepaare als Belastung auf die Ringenden übertragen werden konnten. Aus Tafel I ist die Anordnung genau ersichtlich. In der oberen Hälfte ist eine Uebersichtszeichnung im Massstabe 1 : 20 gegeben. Zwischen dem festen Auflager *A* und dem Rollenaflager *F* erstreckt sich ein Balken, dessen mittleres Stück zwischen *C* und *D* durch den dazwischen gespannten Ring ersetzt ist. Abgesehen vom Eigengewichte, das besonders berücksichtigt werden muss, trägt der Balken zwei gleich grosse Lasten *Q*, die beide 900 mm vom nächsten Auflager entfernt sind. Die Lasten *Q* bringen daher beiderseits Auflagerkräfte von derselben Grösse *Q* hervor und an jedem der beiden Arme *AC* und *DF* greift ein Kräftepaar vom Momente *O* 90 cm an, das durch die Einspannvorrichtung auf die Ringenden übertragen wird.

Das schon ziemlich beträchtliche Eigengewicht des Rings wird durch ein Gegengewicht *G* mit Hülfe eines Fadens, der über die Rolle *R* läuft, ausgeglichen. Jeder Versuch begann damit, zuerst den Ring an dem Haken *H* aufzuhängen und ihn durch das Gegengewicht *G* im Gleichgewichte zu halten, während er im Uebrigen ganz frei schwebte. Hierbei tritt schon eine Formänderung des Rings auf, die besonders gemessen wurde. Die Formänderung konnte auch hier wieder entweder durch Messung der Spaltbreite oder durch Messung des Durchmessers festgestellt werden. Wenn auch die erste Messung grössere Werthe liefert und bequemer durchzuführen ist, also insoweit auch genauer ist, musste hier doch der Messung des Durchmessers der Vorzug gegeben werden. Gleichmässig beansprucht durch das belastende Kräftepaar bei der weiteren Fortsetzung des Versuchs ist nämlich

nur der zwischen beiden Einspannvorrichtungen liegende Theil des Rings; innerhalb der Einspannvorrichtung selbst und von ihr aus nach dem freien Ende hin treten dagegen wechselnde Beanspruchungen auf. Die Spaltverbreiterung bei der Belastung durch das Kräftepaar ist aber durch die Formänderungen innerhalb der Einspannvorrichtungen erheblich mit bedingt und deshalb konnte nur die Messung des Durchmessers, dessen Aenderungen ausschliesslich von dem Verhalten des gleichmässig beanspruchten Ringtheiles abhängen, ein zuverlässiges Ergebniss liefern. Ausserdem waren auch bei diesen Belastungsversuchen die Formänderungen so gross, dass die durch Messung des Durchmessers mit Hülfe eines Stangenzirkels zu erzielende Genauigkeit — obschon dabei die Zehntel-Millimeter nicht mehr ganz sicher waren — vollkommen ausreichend erschien. Bei den ersten Versuchen wurden wieder kleine Messingstiftchen als Marken für die Messung des Durchmessers eingeschlagen, späterhin begnügte man sich aber damit, bei den abgedrehten Ringen nur durch Abtasten den äusseren Durchmesser festzustellen. Bei den grösseren Formänderungen war ein solches Verfahren ohnehin geboten, da zwei Marken, deren Verbindungslinie anfänglich auf einem Durchmesser lag, nach einer grösseren Verkürzung auf eine Sehne zu liegen kamen, die sich ziemlich stark vom Durchmesser unterscheiden konnte.

Die Rolle *R* war an dem Laufkrahne des Laboratoriums aufgehängt. Der Aufhängepunkt musste nämlich beweglich sein, da sich die Spaltbreite des Rings bei den grösseren Lasten bedeutend vergrösserte. Um ebensoviel schob sich das bewegliche Lager *F* auf seiner Rollenbahn, die einen entsprechend langen Spielraum lassen musste, nach aussen und um die Hälfte dieses Wegs musste der Aufhängepunkt der Rolle jedesmal folgen, damit der von

der Rolle R zum Haken H herabgehende Faden stets genau senkrecht blieb, was natürlich eine wesentliche Vorbedingung für die Erzielung genauer Resultate bildete. Uebrigens war die Rollenebene, die in der schematischen Uebersichtszeichnung der Deutlichkeit wegen in die Papierebene gelegt ist, in Wirklichkeit senkrecht zur Kraftebene gestellt.

Die Rolle R muss übrigens schon etwas höheren Ansprüchen genügen. Bei einer kleineren Rolle, die ich zuerst verwendet hatte, unterschieden sich in Folge der Zapfenreibung — die Seilsteifigkeit kam weniger in Betracht — die beiden Fadenspannungen zu viel von einander, so dass sich daraus merkliche Unsicherheiten bei der Abmessung der Formänderung ergaben. Die später verwendete Rolle aus Messing hatte einen Durchmesser von 100 mm und war in Spitzen gelagert. Um sie zu prüfen, liess ich an die beiden Enden eines um sie geschlungenen Fadens Lasten von je 10 kg anhängen, worauf die Last auf der einen Seite um so viel gesteigert wurde, bis das Gleichgewicht gestört wurde. Dazu war auf jeder Seite ein Uebergewicht von 0,187 kg erforderlich; der Wirkungsgrad der Rolle betrug daher 0,98. — Auch die rollende Reibung in dem beweglichen Lager bei F musste übrigens durch Verwendung glatt gehobelter und abgeschlichteter Eisenplatten und grösserer Walzen (von 70 mm Durchmesser) gering genug gehalten werden, um keine Unsicherheiten in der Messung herbeiführen zu können.

Bei den ersten Versuchen hatte ich die Stangen AC und DF bei C und D steif mit den Ringenden verbinden lassen. Nach einer Belastung stellten sich die Stangen natürlich etwas schief. So lange es sich nur um kleinere Formänderungen handelte, schadete dies nicht viel; es war nur nöthig, die Horizontalprojektionen der Strecken AB und EF jedesmal besonders zu messen und deren Werth an Stelle der Länge von 90 cm als Hebelarm des Kräftepaars zu benutzen. Für grössere Lasten und Formänderungen versagte aber diese Einrichtung und ich liess sie durch die auf der unteren Hälfte von Tafel I in der Hälfte der natürlichen Grösse dargestellte ersetzen. Mit Hilfe der Schraube S konnten nun die Stangen nach jeder Belastung wieder horizontal gestellt werden.

Die Absicht bei diesen Biegungsversuchen ging namentlich darauf hinaus, ausser den federnden Formänderungen, bei der Biegung auch die bleibenden zu messen. Ueber die bleibenden Formänderungen, deren das Gusseisen bei der Biegung fähig ist, ehe es bricht, fehlt es in der Litteratur an irgendwie ausreichenden Angaben, obschon der an sich freilich geringe Grad der Zähigkeit, der sich darin ausspricht, offenbar für die Beurtheilung mancher Erscheinungen sehr wichtig ist.

Die bleibenden Formänderungen hängen natürlich von der Vorgeschichte des Materials, also von der Art, wie die Last gesteigert wurde, welche Belastungswechsel der Bruchbelastung vorausgingen u. s. f. in hohem Grade ab. Daher wurde der Belastungsvorgang in verschiedenen Fällen verschieden gewählt. Freilich wäre es mit Rücksicht auf die schon früher betonte Unzuverlässigkeit des Gusseisens wünschenswerth gewesen, eine grössere Zahl von Versuchen der gleichen Art anzustellen, um auf diese Weise zu brauchbareren Mittelwerthen zu gelangen. In solchen Fällen ist eben das Bessere der Feind des Guten und da sich eine entsprechend weitere Ausdehnung der Versuche durch die Umstände verbot, schien es immer noch nützlicher zu sein, mit den Versuchsbedingungen in den einzelnen Fällen zu wechseln, um dadurch zu einer ungefähren Uebersicht über deren Einfluss zu gelangen, als alle Versuche nach dem gleichen Schema durchzuführen, um für einen einzigen Fall bessere Mittelwerthe zu erlangen.

Bei der Ausführung eines Versuchs verfuhr man wie folgt: Der Ring wurde zuerst, wie früher beschrieben, horizontal auf Kugeln liegend gemessen. Dann wurde er aufgeschnitten und wiederum gemessen, wobei die unter A zusammengestellten Ergebnisse aufgezeichnet wurden. Dann wurde er an dem Haken H frei schwebend aufgehängt, so dass er sich mit dem ihm gleichen Gegengewichte G im Gleichgewichte befand. In dieser Lage sind die einzelnen Querschnitte des Rings schon einem von den Eigengewichten der einzelnen Theile herrührenden, verhältnissmässig geringen Biegemomente ausgesetzt, wodurch jedoch bereits merkliche Formänderungen entstehen. Die massgebende Strecke, die auch den ferneren Beobachtungen unterworfen werden sollte (gewöhnlich der äussere, horizontale Durchmesser) wurde daher in dieser frei schwebenden Lage von Neuem gemessen. Hierauf wurden die Stangen AC und DF mit der zugehörigen Armirung angebracht und Alles gut eingestellt.

Das Gewicht der gesammten Armirung betrug auf jeder Seite (mit Einschluss des Gehänges, an dem später die Lasten Q angebracht wurden) 10,5 kg. Der durch einen Versuch ermittelte Abstand des Schwerpunkts von der Auflagerschneide am Ende wurde zu 60,0 cm ermittelt, bezw. durch Hinzufügung von kleinen Ausgleichgewichten, die in den 10,5 kg schon mit enthalten sind, beiderseits auf 60 cm gebracht. Das Eigengewicht entsprach daher einer am Gehänge B angreifenden Last Q von 7,0 kg. Hiermit war für den Ring schon ein verbiegenderes Moment von 6,3 mkg gegeben, das über die ganze Länge hin, mit Ausnahme der kurzen Einspannenden, gleichmässig auftrat. Hierauf erfolgte eine Messung. Dann wurde beiderseits

die durch den besonderen Versuchsplan gebotene Last Q — zuerst gewöhnlich 5 kg — aufgebracht, und zwar möglichst sanft und stossfrei. Nun wurden durch eine geringe Verschiebung des Laufkrahns der von der Rolle R nach H herabführende Faden wieder senkrecht und und die Stangen der Armirung durch Anziehen der Schrauben S wieder horizontal eingestellt, worauf die Messung von Neuem erfolgen konnte. Bei jeder späteren Belastungsänderung wurde hierauf in derselben Weise von Neuem verfahren.

Ich lasse zunächst die Versuchsergebnisse mit den abgedrehten Ringen folgen, bei denen die vorher im Einzelnen auseinandergesetzten Verbesserungen, die sich im Laufe der Versuche als nöthig oder wünschenswerth herausgestellt hatten, schon angebracht waren. Dabei ist bei

Angabe der Lasten für die Armirung stets 7 kg mit eingerechnet. Die Nummerirung der Ringe ist dieselbe wie unter A , worauf wegen weiterer Angaben über Gewicht und Abmessungen der einzelnen Ringe verwiesen wird, während einige andere Angaben der Vollständigkeit wegen nochmals wiederholt sind.

a. Sechster Ring.

Gemessen wurde der äussere, horizontal liegende Durchmesser; er betrug vor dem Aufschneiden 842,3, nach dem Aufschneiden ebenfalls 842,3 mm. Nachdem der Ring freischwebend an H aufgehängt war, betrug der Durchmesser 841,6 mm. Nun wurde die Armirung angebracht, wofür eine Last von 7 kg an den Aufhängestellen zu setzen ist. Man erhielt zuerst folgende Reihe:

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|----|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
| Durchmesser | 841,6 | 856,2 | 867,5 | ? | 898,4 | 915,0 | 938,8 | 969,0 | 956,0 | 941,7 | 927,0 | 913,0 | 898,5 | 883,7 | 862,4 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 14,6 | + 11,3 | — | — | + 16,6 | + 23,8 | + 30,2 | - 13,0 | - 14,3 | - 14,7 | - 14,0 | - 14,5 | - 14,8 | - 21,3 |
| Angewachsen gegen 0 | — | + 14,6 | + 25,9 | — | + 56,8 | + 73,4 | + 97,2 | + 127,4 | + 114,4 | + 100,1 | + 85,4 | + 71,4 | + 56,9 | + 42,1 | + 20,8 |

Die letzte Lastangabe 0 bezieht sich natürlich darauf, dass die Armirung abgenommen war und der Ring am Haken H freischwebend hängend gemessen wurde. Bei dieser Belastungsreihe, die, wie sich noch zeigen wird, nahe an die Bruchlast heranreichte, betrug demnach die bleibende Formänderung im Durchmesser ausgedrückt 20,8 mm. Wir wollen diese Zahl sofort noch ein wenig umrechnen. Macht man die hier genau genug zutreffenden Annahmen, dass die Querschnitte eben geblieben seien und die Nulllinie trotzdem in der Querschnittsmittellinie läge, so lässt sich nämlich ausrechnen, wie gross die bleibenden Dehnungen und Verkürzungen in den äussersten Fasern anzusetzen sind: Bezeichnet man den Krümmungshalbmesser mit ρ , seine geringe Aenderung mit $\Delta\rho$, ein Längenelement der Mittellinie des Stabs mit ds , wofür genau genug auch die Länge der Faserelemente an den Kanten gesetzt werden kann, mit Δds deren Aenderung durch die Verbiegung, ferner mit $d\varphi$ und $\Delta d\varphi$ den zu ds gehörigen Centriwinkel und seine Aenderung, so hat man

$$\rho \cdot \Delta d\varphi = \Delta\rho \cdot d\varphi ; \Delta ds = \frac{h}{2} \cdot \Delta d\varphi ; ds = \rho \cdot d\varphi$$

und durch Verbindung dieser Gleichungen erhält man für die spezifische Längenänderung ε an den Kanten:

$$\varepsilon = \frac{\Delta ds}{ds} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho^2}$$

oder hier mit $h = 1,95$ cm, $\rho = 41$ cm, $\Delta\rho = 1,04$ cm

$$\varepsilon = 0,000603 = 60,3 \cdot 10^{-5}$$

Diese Zahl gestattet einen nützlichen Vergleich mit den im 24. Hefte dieser »Mittheilungen« S. 33 gefundenen Bruchdehnungen, die dem Bruche von Granitbalken vorausgehen und die dort zu

$$57,0 \text{ bis } 61,7 \cdot 10^{-5}$$

berechnet waren. Freilich besteht hier der wesentliche Unterschied, dass die oben angegebene Kantendehnung beim Gusseisen eine bleibende war, während sich die Zahlen beim Granit auf die viel grössere elastische Dehnung beziehen, die dem Bruche unmittelbar vorausging. Immerhin gibt es einen nützlichen Vergleich, wenn man beachtet, dass die im vorliegenden Falle ermittelte spezifische Dehnung beim Gusseisen ungefähr ebenso gross ist wie die gesammte Bruchdehnung bei jenem Granit. Die gesammte Dehnung beim Gusseisen war im vorliegenden Falle im Verhältnisse 127,4 : 20,8 grösser als die bleibende und mit dem Vorbehalte, dass hierbei freilich die Bruchgrenze noch nicht ganz erreicht war, erhalten wir hiermit auch einen Anhaltspunkt für die Beurtheilung der geringeren Sprödigkeit des Gusseisens gegenüber jenen Steinen. — Natürlich lassen sich auch die späteren Angaben über die beobachteten bleibenden Formänderungen stets leicht in der gleichen Weise verwerthen. Da sonst immer alles nahezu gleich bleibt, verhalten sich stets die grössten Kantendehnungen zu einander wie die zugehörigen Durchmesseränderungen.

An die vorher mitgetheilte Belastungsreihe schloss sich unmittelbar eine zweite an, die bis zum Bruche fortgesetzt wurde. Darauf bezieht sich die folgende Zusammen-

stellung, in der die Aenderungen des Durchmessers gegenüber dem ersten Belastungsfalle 0 in der vorigen Tabelle angegeben sind.

| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 |
| Durchmesser = | 862,4 | 878,4 | 890,4 | 904,0 | 918,4 | 933,5 | 951,0 | 971,1 | Bruch! |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 16,0 | + 12,0 | + 13,6 | + 14,4 | + 15,1 | + 17,5 | + 20,1 | |
| Angewachsen gegen das erste 0 | + 20,8 | + 36,8 | + 48,8 | + 62,4 | + 76,8 | + 91,9 | + 109,4 | + 129,5 | |

Die Last von $7 + 35 = 42$ kg wurde gerade erreicht, als der Bruch eintrat. Dieser erfolgte bei der Einspannung auf der einen Seite; von einem Gussfehler oder dgl. war in der Bruchfläche nichts zu erkennen. Da der Ring im übrigen unbeschädigt war, konnte der Durchmesser aufs Neue gemessen werden, nachdem der Ring horizontal auf Kugeln aufgelegt worden war. Es zeigte sich, dass der Ring nicht genau kreisförmig geblieben war, wie man bei gleichförmiger Beschaffenheit hätte erwarten müssen. Der Durchmesser wechselte zwischen 872,5 und 874,7 mm. Nimmt man hiervon das Mittel $= 873,6$ mm und vergleicht es mit dem anfänglich in dieser Lage gemessenen Durchmesser von 842,3 mm, so erhält man eine bleibende Vergrößerung des Durchmessers in Folge der Verbiegung von 31,3 mm. Die ihr zugehörige Kantendehnung ϵ berechnet sich in derselben Weise wie vorher zu $90,7 \cdot 10^{-5}$. Für die Biegezugfestigkeit erhält man nach den üblichen einfachen Formeln rund 2000 atm.

Auf Tafel II ist ein Formänderungsdiagramm zu finden, das in üblicher Weise aus den Messungsergebnissen für diesen Ring zusammengestellt ist. Die Abscissen geben die Durchmesseränderungen, die Ordinaten die zugehörigen Lasten an; die den Aesten der Diagrammlinie beigeetzten Pfeile geben an, in welcher Richtung die Formänderung

vor sich ging, ob es sich also um aufsteigende oder um absteigende Belastung handelte.

b. Siebenter Ring.

Hier sollte der Versuch genau in derselben Weise durchgeführt werden, wie beim vorigen Ringe. Bei der zweiten Belastungsreihe kam aber ein Versehen vor, indem sich eines der Gehänge für die Lasten beim Abnehmen und Wiederaufbringen der Armierung etwas verschoben hatte. Die zweite Belastungsreihe musste daher verworfen werden; ausserdem stürzte noch während des Abnehmens der Belastung der ganze Ring um und fiel auf den Boden. Die hierdurch herbeigerufene Erschütterung ist, wie man noch aus späteren Versuchen ersehen wird, nicht ohne Einfluss auf die bleibende Formänderung. Eine dritte Belastungsreihe endlich konnte ohne Störung bis zum Bruche durchgeführt werden; da die nicht genau bekannten Vorgänge der zweiten Belastungsreihe vorausgingen, ist sie aber von geringerem Werte und jedenfalls nicht unmittelbar mit der zweiten Belastungsreihe beim vorigen Ringe zu vergleichen.

Beim geschlossenen Ringe war der Durchmesser hier zu 842,3, nach dem Aufschneiden zu 842,0 und in freischwebender Lage zu 841,3 gefunden worden. Dann erhielt man:

Erste Belastungsreihe.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
| Durchmesser = | 841,3 | 856,6 | 868,7 | 883,9 | 901,2 | 922,3 | 948,2 | 978,8 | 967,5 | 952,8 | 937,5 | 923,0 | 907,6 | 891,6 | 868,3 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 15,3 | + 12,1 | + 15,2 | + 17,3 | + 21,1 | + 25,9 | + 30,6 | - 11,3 | - 14,7 | - 15,3 | - 14,5 | - 15,4 | - 16,0 | - 23,3 |
| Angewachsen gegen 0 | — | + 15,3 | + 27,4 | + 42,6 | + 59,9 | + 81,0 | + 106,9 | + 137,5 | + 126,2 | + 111,5 | + 96,2 | + 81,7 | + 66,3 | + 50,3 | + 27,0 |

Nachdem der Ring die zweite fehlerhafte Belastungsreihe durchgemacht hatte und auf den Boden gestürzt war, wurde er zunächst nochmals horizontal auf Kugeln

liegend gemessen. Der Durchmesser war 859,5 und in freischwebender Lage (am Haken *H* aufgehängt) 858,8. Hierauf folgte:

Dritte Belastungsreihe.

| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 38 |
| Durchmesser = | 858,8 | 874,9 | 888,5 | 903,3 | 920,0 | 938,6 | 958,1 | 983,0 | Bruch! |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 16,1 | + 13,6 | + 14,8 | + 16,7 | + 18,6 | + 19,5 | + 24,9 | |
| Angewachsen gegen das erste 0 | + 17,5 | + 33,6 | + 47,2 | + 62,0 | + 78,7 | + 97,3 | + 116,8 | + 141,7 | |

Der Bruch erfolgte an zwei Stellen, anscheinend gleichzeitig, obschon sich darüber wegen der sehr kurzen Zeitdauer des Bruchvorgangs natürlich nichts bestimmtes aussagen lässt. Beide Bruchflächen zeigten kleinere Gussfehler; unmittelbar in der Nähe der Einspannstellen war keine von ihnen gelegen. Immerhin betrug das zwischen ihnen liegende mittlere Stück etwas mehr als einen Halbkreis, so dass man den Durchmesser auch nach dem Bruche nochmals (horizontal, auf Kugeln liegend) messen konnte. Man fand 861,6 mm; die bleibende Formänderung entsprach daher gegenüber dem ursprünglichen Zustande des aufgeschlitzten Ringes einer Vergrößerung des Durchmessers

um 20,3 mm. Die nach den gewöhnlichen Formeln berechnete Biegezugfestigkeit stellt sich auf 1846 atm.

c. Achter Ring.

Der Belastungsvorgang entsprach hier zuerst genau dem vorher innegehaltenen; späterhin schlossen sich aber eine Reihe anderer Massnahmen an, wobei der Einfluss von Erschütterungen, der Einfluss des Ausglühens und der Einfluss der Zeit ermittelt werden sollte.

Der äussere Durchmesser des geschlossenen Rings war gleich 842,0 mm; nach dem Aufschneiden betrug er in horizontaler Lage 841,3 und am frei schwebend aufgehängten Ringe 840,4 mm. Nun folgte:

Erste Belastungsreihe.

| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Durchmesser = | 840,4 | 856,7 | 867,3 | 881,4 | 898,0 | 919,6 | 947,4 | 982,0 | 969,3 | 954,3 | 938,6 | 923,2 | 907,7 | 892,4 | 867,4 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 16,3 | + 10,6 | + 14,1 | + 16,6 | + 21,6 | + 27,8 | + 34,6 | — 12,7 | — 15,0 | — 15,7 | — 15,5 | — 15,4 | — 15,3 | — 25,0 |
| Angewachsen gegen 0 | — | + 16,3 | + 26,9 | + 41,0 | + 57,6 | + 79,2 | + 107,0 | + 141,6 | + 128,9 | + 113,9 | + 98,2 | + 82,8 | + 67,3 | + 52,0 | + 27,0 |

Hierbei wurde festgestellt, dass die zwischen einer Belastungsstufe und der nächsten verstrichene Zeit im Durchschnitt 2 Minuten betrug, sofern es sich dabei nur um ein Aufbringen oder Abnehmen von Gewichten auf die Armirung mit nachfolgender Messung handelte. Das

Abnehmen oder Anbringen der Armirung erforderte natürlich einen längeren Zeitaufwand. Unmittelbar auf die vorhergehende Belastungsreihe folgte eine zweite, bei der man sonst in genau gleicher Weise vorging, aber die Last um 5 kg weiter steigerte.

Zweite Belastungsreihe.

| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Durchmesser = | 867,4 | 884,3 | 897,6 | 911,5 | 927,0 | 944,2 | 962,7 | 985,8 | 1031,2 | 1018,0 | 1001,0 | 985,0 | 967,0 | 950,2 | 932,2 | 913,8 | 886,0 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 16,9 | + 13,3 | + 13,9 | + 15,5 | + 17,2 | + 18,5 | + 23,1 | + 45,4 | — 13,2 | — 17,0 | — 16,0 | — 18,0 | — 16,8 | — 18,0 | — 18,4 | — 27,8 |
| Angewachsen geg. das erste 0 | + 27,0 | + 43,9 | + 57,2 | + 71,1 | + 86,6 | + 103,8 | + 122,3 | + 145,4 | + 190,8 | + 177,6 | + 160,6 | + 144,6 | + 126,6 | + 109,8 | + 91,8 | + 73,4 | + 45,6 |

Hierauf wurde der Ring wieder horizontal auf Kugeln gelegt und so gemessen; der Durchmesser betrug 886,4, hatte sich also gegenüber der Anfangsablesung in der gleichen Lage um 45,1 mm vergrössert. Der Unterschied gegenüber den 45,6 mm aus der Tabelle erklärt sich wahrscheinlich aus dem Einflusse der inzwischen verstrichenen Zeit (nicht genauer beobachtet; wahrscheinlich ungefähr 10 Minuten). Dann wurde der Ring glatt auf den hölzernen Fussboden des Laboratoriums gelegt und dem ganzen Umfange nach mit einem 0,7 kg schweren Holzhammer abgeklopft. Nachdem dies geschehen war, legte man ihn wieder auf die Kugeln und mass den Durchmesser von Neuem. Er betrug jetzt 879,0 mm, die bleibende Vergrößerung von 45,1 mm hatte sich daher um 7,4 mm auf 37,7 mm vermindert. Der Ring wurde hierauf nochmals auf den Fussboden gelegt und mehrere

Minuten lang von einem kräftigen Manne möglichst stark mit dem Holzhammer abgeklopft. Nach hierauf erneuter Messung hatte sich der Durchmesser abermals bis auf 875,6 mm vermindert, also um weitere 3,4 mm. Die jetzt noch zurückgebliebene Vergrößerung gegenüber dem ursprünglichen Werthe war gleich 34,3 mm.

Es war nun von Wichtigkeit, zu sehen, ob ein nachfolgendes Ausglühen die zurückgebliebene Formänderung noch weiter vermindern könne. Dies bestätigte sich in der That; nach starkem Ausglühen ging der Durchmesser auf 862,5 mm, also nochmals um 13,1 mm zurück. Freilich konnte die gesammte Formänderung auch hierdurch nicht rückgängig gemacht werden, da der Durchmesser immer noch um 21,2 mm grösser geblieben war, als im ursprünglichen Zustande.

Der Ring wurde jetzt wieder am Haken frei schwebend

aufgehängt, worauf nach 3 Tagen die Fortsetzung des Versuchs folgte. Ohne Belastung war der Durchmesser in dieser Lage gleich 861,0 mm. Unmittelbar lässt sich diese Zahl mit der vorhergehenden von 862,5 mm, die sich auf die horizontale Lage bezieht, zwar nicht ver-

gleichen; mit Berücksichtigung vorhergehender Angaben scheint sich jedoch der Durchmesser in der 3tägigen Ruhepause noch um etwa 0,6 mm verkleinert zu haben. Die dritte Belastungsreihe, die sich nun anschloss, gleicht genau der vorhergehenden.

Dritte Belastungsreihe.

| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Durchmess. = | 861,0 | 879,0 | 892,7 | 908,1 | 927,2 | 950,8 | 978,2 | 1012,6 | 1059,5 | 1044,8 | 1027,0 | 1008,8 | 990,3 | 972,2 | 954,3 | 935,2 | 905,8 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 18,0 | + 13,7 | + 15,4 | + 19,1 | + 23,6 | + 27,4 | + 34,4 | + 46,9 | — 14,7 | — 17,8 | — 18,2 | — 18,5 | — 18,1 | — 17,9 | — 19,1 | — 29,4 |
| Angewachsen geg. d. erste 0 | + 20,6 | + 38,6 | + 52,3 | + 67,7 | + 86,8 | + 110,4 | + 137,8 | + 172,2 | + 219,1 | + 204,4 | + 186,6 | + 168,4 | + 149,9 | + 131,8 | + 113,9 | + 94,8 | + 65,4 |

Die zurückgebliebene Formänderung hatte sich also jetzt gegenüber dem vorigen, im Uebrigen ganz gleichen Versuche noch um fast 50 v. H. gesteigert. Hierauf wurde der Ring wieder genau so wie vorher behandelt. Nachdem er auf die Kugeln gelegt war, betrug sein Durchmesser noch 905,2 mm, hatte sich also um 0,6 mm vermindert, während man bei normalem Verhalten eine Vergrößerung um etwa 0,9 mm hätte erwarten müssen. Der Unterschied von 1,5 mm ist daher auf die elastische Nachwirkung unter Mitwirkung der durch den Transport und die Handhabung des Rings, die im Uebrigen ganz vorsichtig erfolgte, verursachten kleineren Erschütterungen zu schieben. Dann wurde der Ring wieder abgeklopft, wodurch sich sein Durchmesser auf 890,8, also um 14,4 mm verminderte. Zurückgeblieben war jetzt noch eine Vergrößerung des Durchmessers gegenüber dem ursprünglichen Zustande von 49,5 mm. Nach einem zweiten Abklopfen verminderte sich der Durchmesser noch weiter auf 890,0, also um weitere 0,8 mm. Dass das zweite Abklopfen diesmal von geringerem Einflusse blieb, als vorher nach der zweiten Belastungsreihe, ist wohl darauf zurückzuführen, dass schon das erste Abklopfen möglichst kräftig ausgeführt wurde, während damals zuerst weniger starke Schläge angewendet worden waren.

Hierauf wurde der Ring von Neuem ausgeglüht, wodurch er sich zu einem Durchmesser von 874,6 mm zusammenzog. Das Ausglühen hatte daher eine Verminderung des Durchmessers um 15,4 mm zur Folge: dagegen blieb gegenüber dem Anfangszustande noch eine Vergrößerung um 33,3 mm zurück, also erheblich mehr als nach dem ersten Ausglühen, das auf die im Uebrigen ganz gleiche zweite Belastungsreihe gefolgt war. Dagegen wurde in beiden Fällen rund die Hälfte der vorher bestandenen Formänderung durch das Ausklopfen und Ausglühen rückgängig gemacht.

Es lag nun nahe, die Versuche mit diesem Ringe

stets in der gleichen Weise fortzusetzen und sie so lange zu wiederholen, bis sich entweder ein konstanter Zustand herausgebildet hätte oder der Bruch eintreten würde. Dabei schien es gar nicht unmöglich, dass man durch eine fortgesetzte Behandlung von der hier beschriebenen Art den Ring unbegrenzt weiter deformieren, ihn vielleicht gar schliesslich ganz grad strecken könnte. Dies hat sich indessen nicht bestätigt, vielmehr brach der Ring späterhin unter einer Last, die kleiner war, als die von ihm schon wiederholt getragene Höchstlast. Nach dem, was man über den Einfluss wiederholter Beanspruchungen weiss, kann dies freilich an sich nicht überraschen; dagegen ist wohl zu bedenken, dass zwischen den einzelnen Höchstbeanspruchungen jedesmal ein Ausglühen lag. Das Ausglühen kann daher nicht etwa, wie es nach den bis jetzt berichteten Beobachtungen scheinen könnte, den Erfolg haben, das Material in der neu angenommenen Gestalt gewissermassen zu bestätigen und ihm im Uebrigen dieselben Eigenschaften wie zu Anfang von Neuem zu verleihen. Wahrscheinlich bleiben vielmehr auch nach jedem Ausglühen noch Zerrungen und mit ihnen innere Spannungen (Eigenspannungen, von im Uebrigen ganz gleicher Art wie die Gussspannungen) zurück, die von den vorhergehenden Belastungen herrühren.

Mit einer geringen Abänderung, von der sich freilich nicht sagen lässt, welchen Einfluss sie gehabt haben mag, wurden nun in der That die Versuche in der gleichen Art weiter geführt. Die Abänderung bestand darin, dass man den Ring bei der jetzt folgenden vierten Belastungsreihe längere Zeit unter der Höchstlast stehen liess, um den sich hierbei geltend machenden, wie man sehen wird, unter diesen Umständen sehr erheblichen Einfluss der Belastungsdauer zu beobachten.

Einen Tag nach Abschluss der dritten Belastungsreihe wurde zur vierten geschritten.

Vierte Belastungsreihe, erster Theil.

| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Durchmesser = | 873,0 | 891,7 | 906,0 | 923,2 | 942,1 | 965,6 | 993,0 | 1025,5 | 1075,5 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 18,7 | + 14,3 | + 17,2 | + 18,9 | + 23,5 | + 27,4 | + 32,5 | + 50,0 |
| Angewachsen gegen das erste 0 | + 32,6 | + 51,3 | + 65,6 | + 82,8 | + 101,7 | + 125,2 | + 152,6 | + 185,1 | + 235,1 |

Nun liess man die Vorrichtung unberührt stehen und beobachtete von Zeit zu Zeit die Vergrößerung, die die Formänderung inzwischen erfahren hatte. Dabei wurden jedesmal vor der Ablesung durch geringes Rücken des Laufkrahns und Anziehen der Schrauben *S* der Aufhängefaden und die Stangen der Armirung wieder genau eingestellt. So vorsichtig dies auch gemacht wurde, liessen sich doch, namentlich beim Anziehen der Schrauben, geringe Erschütterungen nicht ganz vermeiden. Bei der Beurtheilung der folgenden Zahlen ist dies zu beachten.

Unter einer beiderseits aufgebrachten Last von 42 kg wuchs der Durchmesser innerhalb der nachstehend angegebenen, vom Beginne der Belastung an gerechneten Zeiten wie folgt an:

Nach 0 Std. war d. Durchm. 1075,5 mm,

| | | | | | | |
|------------|---|---|---|--------|---|--------------------|
| „ 1/4 „ | „ | „ | „ | 1078,8 | „ | gewachs. um 3,3 mm |
| „ 1 1/4 „ | „ | „ | „ | 1080,0 | „ | „ „ 4,5 „ |
| „ 2 1/4 „ | „ | „ | „ | 1081,5 | „ | „ „ 6,0 „ |
| „ 25 1/4 „ | „ | „ | „ | 1089,0 | „ | „ „ 13,5 „ |
| „ 41 1/4 „ | „ | „ | „ | 1089,5 | „ | „ „ 14,0 „ |
| „ 47 „ | „ | „ | „ | 1090,0 | „ | „ „ 14,5 „ |

Nach zwei Tagen hatten sich demnach die anfänglich in Folge der elastischen Nachwirkung stark hervortretenden Formänderungszuwüchse allmählich so weit vermindert, dass es sich nicht mehr lohnte, den Versuch noch weiter zu verfolgen. Die vierte Belastungsreihe wurde daher nunmehr mit dem Abtragen der Belastung zu Ende geführt.

Vierte Belastungsreihe, zweiter Theil.

| Last = | 42 | 37 | 32 | 27 | 22 | 17 | 12 | 7 | 0 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Durchmesser = | 1090,0 | 1071,0 | 1051,0 | 1033,5 | 1015,0 | 996,2 | 976,4 | 955,8 | 924,0 |
| Angewachsen gegen vorher | — | — 19,0 | — 20,0 | — 17,5 | — 18,5 | — 18,8 | — 19,8 | — 20,6 | — 31,8 |
| Angewachsen gegen das erste 0 | + 249,6 | + 230,6 | + 210,6 | + 193,1 | + 174,6 | + 155,8 | + 136,0 | + 115,4 | + 83,6 |

Nach der Entlastung wurde diesmal der Einfluss einer Ruhepause untersucht, während deren man den Ring von Erschütterungen und Temperaturwechseln möglichst frei hielt. Nachdem der Ring aus dem Hang herausgenommen und auf Kugeln gelegt war, wurde er sofort gemessen; der Durchmesser betrug jetzt in der horizontalen Lage 924,8, in ziemlich guter Uebereinstimmung mit der Zahl 924,0 für die schwebende Lage, so dass zwischen beiden schnell hintereinander ausgeführten Messungen keine merkliche Formänderung vor sich gegangen sein kann. Nun liess man den Ring auf den Kugeln unberührt liegen und beobachtete von Zeit zu Zeit, um wie viel er sich inzwischen zusammengezogen hatte.

Nach 0 Std. war der Durchm. 924,8 mm

| | | | | | | |
|------------|---|---|---|-------|---|----------------|
| „ 1/4 „ | „ | „ | „ | 924,6 | „ | abg. um 0,2 mm |
| „ 1 1/4 „ | „ | „ | „ | 924,5 | „ | „ „ 0,3 „ |
| „ 17 1/2 „ | „ | „ | „ | 924,1 | „ | „ „ 0,7 „ |

Nun liess man den Ring noch einige Tage lang liegen, ohne dass sich der Durchmesser weiter änderte; er blieb auf 924,1 mm stehen. Man erkennt daraus, dass sich die elastische Nachwirkung nach der Entlastung, so lange wenigstens, als keine Erschütterungen vorkommen,

viel weniger bemerklich macht, als nach der Belastung, wenn diese nahe an der Bruchlast liegt.

Nachdem im Ganzen 5 Tage verstrichen waren, wurde der Ring ausgeglüht; hierdurch ging der Durchmesser sofort von 924,1 auf 895,1 mm, also um 29,0 mm zurück. Alsdann wurde der Ring wieder wie in den früheren Fällen mit dem Holzhammer abgeklopft; dadurch ging er noch weiter um 0,3 bis auf 894,8 mm zusammen. Man sieht indessen beim Vergleiche mit den früheren Behandlungen, bei denen das Ausklopfen dem Ausglühen vorausging, während hier die Reihenfolge umgekehrt war, dass das Ausglühen gewaltsamer ist, als das Abklopfen. Denn während in den früheren Fällen das Ausglühen auch nach vorhergegangenen Abklopfen noch eine beträchtliche Rückbildung der erlittenen Formänderung zur Folge hatte, machte diesmal das Ausklopfen nach vorausgegangenem Ausglühen nur noch einen geringen Eindruck auf das Probestück.

Beachtenswerth ist, dass jetzt nach erfolgtem Ausglühen und Abklopfen noch eine Formänderung von 894,8—841,3 = 53,5 mm zurückgeblieben war und dass von der unmittelbar nach Abschluss der vierten Belastungsreihe zurückgebliebenen Formänderung von 83,6 mm nur

der Betrag von 30,1 mm durch die nachfolgende Behandlung wieder aufgehoben worden war. Vergleicht man, dass nach der zweiten Belastungsreihe eine durch Ausglühen u. s. f. nicht mehr rückgängig zu machende Formänderung von 21,2 mm erzielt war, die nach der dritten Belastungsreihe auf 33,3 und nach der vierten, bei der

freilich eine längere Belastungsdauer mitspielte, auf 53,5 mm anwuchs, so liegt in der That die Vermuthung nahe genug, dass man durch weitere Wiederholungen die Formänderung noch erheblich steigern könnte. Die sich jetzt unmittelbar anschliessende 5. Belastungsreihe widerlegt aber diese Vermuthung.

Fünfte Belastungsreihe.

| Last = | 0 | 7 | 12 | 17 | 22 | 27 | 32 | 37 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Durchmesser = | 893,0 | 913,0 | 928,0 | 945,9 | 967,1 | 994,3 | 1026,0 | 1066,5 |
| Angewachsen gegen vorher | — | + 20,0 | + 15,0 | + 17,9 | + 21,2 | + 27,2 | + 31,7 | + 40,5 |
| Angewachsen gegen das erste 0 | + 52,6 | + 72,6 | + 87,6 | + 105,5 | + 126,7 | + 153,9 | + 185,6 | + 226,1 |

Bei der Last von 37 kg zeigte sich gleich anfänglich ein merkliches Zunehmen der Formänderung mit der Zeit, so dass ein wenig (vielleicht eine Minute oder zwei) zugewartet werden musste, bis man die Messung des Durchmessers vornehmen konnte. Nach der Messung verstrich noch etwa eine Minute, während deren der Ring, der sich beruhigt zu haben schien, beobachtet wurde. Dann trat, als man gerade mit dem Auflegen weiterer Lasten beginnen wollte, ganz plötzlich der Bruch ein. Die Bruchfläche zeigte auf einer Stelle am Rande auf der Zugseite eine etwas dunklere Stelle, die auf einen Fehler hinzuweisen scheint. Das grössere der beiden Bruchstücke umfasste mehr als einen Halbkreis; der Durchmesser konnte daher auch nach dem Bruche nochmals festgestellt werden; er betrug 936,4 mm. Die bleibende Durchmesser-Vergrösserung stellt sich daher jetzt auf 95,1 mm; sie ist also wiederum bedeutend grösser, als nach der vierten Belastungsreihe. Hierbei ist noch zu beachten, dass jetzt nur eine Last von 37 kg anstatt 42 kg erreicht wurde und dass ferner beim Herabstürzen der Bruchstücke und schon beim Bruche selbst sehr heftige Erschütterungen stattfanden, die einen Theil der Formänderung, die sonst zurückgeblieben wäre, tilgten.

Die bleibende Durchmesser-Vergrösserung entspricht einer Kantendehnung von rund $260 \cdot 10^{-5}$ und war hier weit grösser als bei dem unter *a.* besprochenen sechsten Ringe. Die grösste Kantendehnung, die überhaupt — mit Einschluss der elastischen — beim achten Ring erreicht wurde, kam im Laufe der vierten Belastungsreihe vor. Nachdem der Ring zwei Tage lang unter der grössten Last gestanden hatte, betrug die Durchmesser-Vergrösserung 249,6 mm und dies entspricht einer Kantendehnung von etwa $680 \cdot 10^{-5}$, also mehr als zehnmal so viel, als bei dem früher zum Vergleiche angeführten Granit. Freilich war die grösste Kantendehnung, die dem

Bruche unmittelbar vorausging, um etwa 10 v. H. kleiner, als die damals erreichte.

Man erkennt übrigens aus den Zusammenstellungen, dass der Elasticitätsmodul, wenn er auf gleiche Belastungsänderungen bezogen wird, bei den späteren Belastungsreihen im Vergleiche zu den früheren allmählich sank und namentlich bei der letzten Belastungsreihe merklich kleiner war als vorher. Wahrscheinlich ist es diesem Umstande zuzuschreiben, dass bei der letzten Belastungsreihe die frühere Höchstlast nicht mehr erreicht werden konnte, denn es ist eine sich oft wiederholende Erfahrung, dass unter zwei sich im Uebrigen gleichenden Probestücken aus spröden Materialien jenes, das bei gleichen Lasten grössere Formänderungen erfährt, also das mit kleinerem Elasticitätsmodul auch die kleinere Festigkeit besitzt.

d. Neunter Ring.

Der neunte und der ihm unter *e* folgende zehnte Ring wurden unter sich nach gleichem Versuchsplane behandelt und gaben auch ziemlich gut übereinstimmende Resultate. Bei diesen Versuchen sollten die bleibenden und die federnden Dehnungen in der Art von einander geschieden werden, wie man es gewöhnlich macht, also indem man während der im Uebrigen stetig fortschreitenden Belastungsreihe, die ohne Unterbrechung und sonstige ungewöhnliche Massnahmen bis zum Bruche fortgeführt wurde, in regelmässigen Abständen immer wieder bis auf die Nullbelastung zurückging. Nur insofern wurde hiervon abgewichen, als man bei den Entlastungen stets noch die Armirung daran liess, so dass also alle späteren Formänderungen auf die Belastung mit 7 kg als Norm bezogen sind. Dies geschah, weil die Entfernung und Anbringung der Armirung einen grösseren Zeitaufwand erfordert hätte und weil dabei leicht auch stärkere Erschütterungen hätten

vorkommen können. Im Uebrigen ist die bleibende Formänderung, die einer Belastung mit 7 kg entspricht, auch nur geringfügig, so dass diese Abweichung vom üblichen Verfahren die Verwendung der Messungsergebnisse nicht merklich beeinträchtigt.

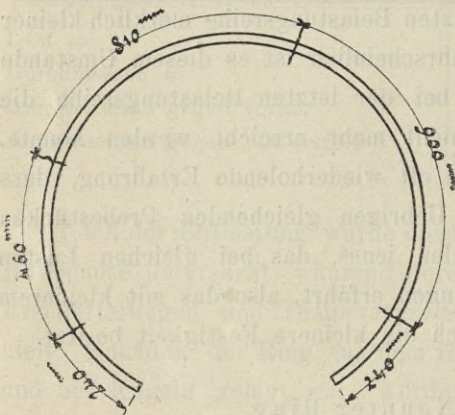
Für den neunten Ring erhielt man die folgende Messungsreihe:
 Aeusserer Durchmesser des geschlossenen Rings = 842,0 mm
 „ „ „ geschlitzten „ = 840,5 „
 Desgleichen im Hang = 840,0 „

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 7 | 12 | 17 | 7 | 17 | 22 | 7 | 22 | 27 |
| Durchmesser = | 840,0 | 854,0 | 865,4 | 855,8 | 865,4 | 879,2 | 858,0 | 879,6 | 895,7 | 861,9 | 897,2 | 917,1 |
| Angewachsen gegen vorher | — | +14,0 | +11,4 | -9,6 | +9,6 | +13,8 | -21,2 | +21,6 | +16,1 | -33,8 | +35,3 | +19,9 |
| Angewachsen gegen 0 | — | +14,0 | +25,4 | +15,8 | +25,4 | +39,2 | +18,0 | +39,6 | +55,7 | +21,9 | +57,2 | +77,1 |
| Angewachsen gegen das erste 7 kg | — | — | +11,4 | +1,8 | +11,4 | +25,2 | +4,0 | +25,6 | +41,7 | +7,9 | +43,2 | +63,1 |

(Fortsetzung der Tabelle)

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------|-------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|-------|
| Last = | 7 | 27 | 32 | 7 | 32 | 37 | 7 | 37 | 42 | 7 | 42 | 44 |
| Durchmesser = | 867,9 | 917,8 | 944,5 | 876,8 | 945,5 | 976,5 | 889,0 | 978,7 | 1025,8 | 910,8 | 1030,2 | Bruch |
| Angewachsen gegen vorher | -49,2 | +49,9 | +26,7 | -67,7 | +68,7 | +31,0 | -87,5 | +89,7 | +47,1 | -115,0 | +119,4 | |
| Angewachsen gegen 0 | +27,9 | +77,8 | +104,5 | +36,8 | +105,5 | +136,5 | +49,0 | +138,7 | +185,8 | +70,8 | +190,2 | |
| Angewachsen gegen das erste 7 kg | +13,9 | +63,8 | +90,5 | +22,8 | +91,5 | +122,5 | +35,0 | +124,7 | +171,8 | +56,8 | +176,2 | |

Abb. 2.



Der Ring trug die Last von 44 kg für kurze Zeit und brach dann plötzlich zusammen. Er zerfiel durch vier Bruchflächen, die sich anscheinend gleichzeitig gebildet hatten, in 5 Bruchstücke, wie es durch beistehende Abb. 2 dargestellt ist. Ein Diagramm, das den

ganzen Versuchsverlauf graphisch darstellt, findet man wieder auf Tafel II.

e. Zehnter Ring.

Unter Verweisung auf Abschnitt d lasse ich hier sofort die Messungsergebnisse folgen:

Aeusserer Durchmesser des geschlossenen Rings = 841,9 mm
 „ „ „ geschlitzten „ = 841,6 „
 Desgleichen im Hang = 841,0 „

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Last = | 0 | 7 | 12 | 7 | 12 | 17 | 7 | 17 | 22 | 7 | 22 | 27 |
| Durchmesser = | 841,0 | 855,1 | 866,8 | 856,6 | 866,7 | 881,0 | 860,0 | 880,8 | 898,5 | 863,8 | 898,6 | 918,8 |
| Angewachsen gegen vorher | — | +14,1 | +11,7 | -10,2 | +10,1 | +14,3 | -21,0 | +20,8 | +17,7 | -34,7 | +34,8 | +20,2 |
| Angewachsen gegen 0 | — | +14,1 | +25,8 | +15,6 | +25,7 | +40,0 | +19,0 | +39,8 | +57,5 | +22,8 | +57,6 | +77,8 |
| Angewachsen gegen das erste 7 kg | — | — | +11,7 | +1,5 | +11,6 | +25,9 | +4,9 | 25,7 | 43,4 | +8,7 | +43,5 | +63,7 |

(Fortsetzung der Tabelle)

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------|-------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|-------|
| Last = | 7 | 27 | 32 | 7 | 32 | 37 | 7 | 37 | 42 | 7 | 42 | 44 |
| Durchmesser = | 869,6 | 920,5 | 946,0 | 878,0 | 947,2 | 981,8 | 891,4 | 982,3 | 1025,0 | 909,8 | 1028,8 | Bruch |
| Angewachsen gegen vorher | -49,2 | +50,9 | +25,5 | -68,0 | +69,2 | +34,6 | -90,4 | +90,9 | +42,7 | -115,2 | +119,0 | |
| Angewachsen gegen 0 | +28,6 | +79,5 | +105,0 | +37,0 | +106,2 | +140,8 | +50,4 | +141,3 | +184,0 | +68,8 | +187,8 | |
| Angewachsen gegen das erste 7 kg | +14,5 | +65,4 | +90,9 | +22,9 | +92,1 | +126,7 | +36,3 | +127,2 | +169,9 | +54,7 | +173,7 | |

Die Last von 44 kg wurde beim Aufbringen gerade erreicht, als der Bruch eintrat. Auch hier zerfiel der Ring durch 4 Bruchflächen in 5 Stücke, die ähnlich wie die beim vorigen Ringe vertheilt waren.

f. Dritter und vierter Ring (mit Gushaut).

Die wichtigeren und zuverlässigeren Biegungsversuche sind mit den vorher aufgezählten bereits erschöpft. Die jetzt noch übrig bleibenden sind mit den nicht abgedrehten Ringen Nr. 1 bis 4 angestellt worden und leiden schon von vornherein an dem Uebelstande, dass die Stärke $\frac{1}{2}$ des Rings längs des Umfangs ziemlich stark wechselte. Diese Versuche sind als Vorversuche zu betrachten, bei denen die früher beschriebenen Verbesserungen in der Versuchseinrichtung erst nach und nach eingeführt und erprobt wurden. Ich werde sie daher auch nicht so ausführlich mittheilen als die vorher besprochenen. Ganz weglassen will ich sie freilich auch nicht, da sie von gröberem Fehlern ebenfalls frei sein dürften und daher immerhin nicht ganz ohne Werth sind.

Beim dritten und vierten Ringe wurden übrigens die Messungen nach einer Richtung hin noch etwas weiter ausgedehnt. Man mass nämlich ausser dem Durchmesser auch noch die Spaltbreite an zwei Stellen, von denen die eine in der Nähe der inneren (Abstand = 2,0 mm), die andere in der Nähe der äusseren Begrenzungsfläche (Ab-

stand = 2,0 mm) des Rings lag. Die sich gegenüber liegenden Endquerschnitte des Rings drehen sich bei der Formänderung ein wenig gegen einander, so dass sich der Spalt unter der Belastung nach aussen hin etwas mehr öffnet, als auf der inneren Seite. Misst man an beiden Stellen, so erhält man ausser der mittleren Spaltvergrößerung, die als Mittel aus beiden Messungen gefunden wird, auch noch den Winkel, um den sich die beiden Enden gegen einander gedreht haben und der gleich der Summe aller Winkeländerungen im ganzen Ringe ist. Bei den späteren Versuchen, über die vorher schon berichtet wurde, habe ich diese zeitraubenden Messungen aufgegeben; zunächst schon, weil aus den Unterschieden zwischen den Längenänderungen an den nahe benachbarten Stellen der Verbiegungswinkel nur mit geringer Genauigkeit gefunden werden kann, namentlich aber, weil alle Messungen am Spalt nicht nur von der Formänderung des gleichmässig auf Biegung beanspruchten mittleren Ringtheiles, sondern auch von dem Verhalten der eingespannten Enden abhängt.

Für den dritten Ring erhielt man

| | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Last | 0 | 6,89 | 16,89 | 6,89 | 16,89 | 26,89 | 6,89 | 36,65 | 6,89 |
| Durchmesser | 822,9 | 828,3 | 837,9 | 831,2 | 838,4 | 852,6 | 833,4 | 868,3 | 837,3 |
| Spalt, innen | 23,5 | 40,8 | 72,2 | 49,5 | 72,7 | 119,0 | 56,3 | 171,9 | 68,9 |
| Spalt, aussen | 23,5 | 41,6 | 74,7 | 50,7 | 75,3 | 123,5 | 57,8 | 179,0 | 71,1 |

Nun wurde der Ring ganz herausgenommen und horizontal auf Kugeln gelegt. Der Durchmesser war 827,1, um 3,8 mm mehr als der in dieser Lage zu Anfang gefundene Werth von 823,3 mm. Die Spaltbreite betrug innen 35,8 gegenüber 24,3 oder um 11,5 mm mehr und aussen 36,2 gegenüber 24,3 oder um 11,9 mm mehr.

Ein Körper, von dem vorausgesetzt wird, dass er im ursprünglichen unbelasteten Zustande spannungslos gewesen sei, beherbergt, wenn er nach einer Biegung bleibende Formänderungen erlitten hat, ohne Zweifel ein System von Eigenspannungen. Es schien daher von Interesse, zu untersuchen, ob sich diese auf einfache Art nachweisen liessen. Ich liess daher im Scheitel des Rings, also in dem dem Spalte gegenüber liegenden Querschnitte auf der äusseren cylindrischen Begrenzungsfläche eine 1 mm tiefe Kille einschneiden, in der Annahme, dass dadurch ein Theil der Eigenspannungen vernichtet werden und hierdurch eine Längenänderung der Messstrecken veranlasst werden könnte. In dieser Erwartung sah ich mich aber getäuscht; soweit die Genauigkeit der Messung reichte, fand in Folge des Einschnittes keine Aenderung des Durchmessers oder der Spaltbreite statt. Wenn man erwägt, dass sich durch den vorgenommenen Einschnitt

ein Ausgleich vorher bestehender Eigenspannungen nur auf einer sehr kurzen Strecke hin zu vollziehen vermochte, kann dieses Ergebniss freilich nicht überraschen. Wenn man auf die ganze Länge des Rings hin auf der Aussen- oder Innenseite einen starken Spahn weggenommen hätte, wäre wohl ein anderes Resultat zum Vorschein gekommen. Ich hatte diesen Versuch ursprünglich auch vor, sah aber dann davon ab, weil bei einer solchen Bearbeitung neue Verbiegungen schwer zu vermeiden gewesen wären und daher kein zuverlässiges Resultat zu erhoffen war. Dagegen habe ich mir für eine gelegener Zeit vorbehalten, den experimentellen Nachweis von Eigenspannungen in bleibend deformirten Körpern dadurch zu führen, dass der Körper in eine Säure gelegt wird, die die äusseren Schichten allmählich wegätzt.

Für den vierten Ring, mit dem ziemlich ausgedehnte Versuchsreihen vorgenommen wurden, sehe ich von der Einzelwiedergabe der Beobachtungsziffern ab und verweise in dieser Hinsicht nur auf die graphische Darstellung auf Tafel II, die das Beobachtungsmaterial mit ausreichender Genauigkeit wieder gibt. Ich bemerke nur noch, dass bei den höheren Lasten die mittlere Spalterweiterung ziemlich genau das 3,14fache der Durch-

messervergrößerung bildete. Da aber die Aenderung der Spaltweite aus den schon früher hervorgehobenen Gründen kein einwandfreies Mass für die Formänderung des gleichmässig verbogenen mittleren Ringtheiles abgibt, ist in der Zeichnung nur die Durchmesseränderung dargestellt.

Die grösste Last, die bei den durch die Zeichnung wiedergegebenen Belastungsreihen vorkam, betrug 50,7 kg, auf den Hebelarm von 90 cm umgerechnet. Als diese Last später nochmals aufgebracht wurde, stand der Ring etwa 2 Minuten lang unter ihr, worauf mit dem Abmessen der Strecken begonnen werden sollte, als plötzlich der Bruch eintrat. An der Bruchstelle, die einen Gussfehler aufwies, war die Stärke h des Rings gleich 2,05 cm. Die Biegungsspannung berechnet sich daher nach der gewöhnlichen Formel zu 2170 atm.

g. Erster und zweiter Ring (mit Guss-haut).

Diese beiden Ringe wurden nicht durch gleichmässige Biegung beansprucht, sondern durch zwei entgegengesetzte gleiche Kräfte, die an den Ringenden angriffen, auseinander gebogen. Das Biegemoment war daher an jeder Stelle dem senkrechten Abstände von der Richtungslinie der zum Spalte gehörigen Sehne proportional und am grössten in dem dem Spalte diametral gegenüber liegenden Querschnitte. Mit den vorhergehenden lassen sich daher diese Versuche überhaupt nicht vergleichen; einige Angaben darüber mögen aber doch hier Platz finden. Den Einfluss des Eigengewichts auf die Formänderung hebe ich nicht besonders hervor, sondern begnüge mich mit der Angabe der Spalterweiterungen, die durch die übrigen zum Eigengewichte hinzukommenden Lasten bewirkt wurden.

Für den ersten Ring erhielt man:

| | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|----------------|------|-------|
| Last | 0 | 10 | 20 | 30 | 0 | 30 | 40 | 0 | 50 | 0 | 60 |
| Spaltweite | 33,7 | 51,0 | 71,4 | 95,5 | 38,0 | 95,6 | Nicht gemessen | 41,9 | Nicht gemessen | 49,4 | Bruch |
| Aufbiegung | — | 17,3 | 37,7 | 61,8 | 4,3 | 61,9 | | 8,2 | | 15,7 | |

Der Bruch erfolgte in einem Querschnitt, der ziemlich genau dem Spalte diametral gegenüber lag. Die Stärke h betrug an dieser Stelle 23,4 mm. Da der Hebelarm der Last gleich dem mittleren Durchmesser oder

gleich rund 80 cm gesetzt werden kann, erhält man für die Bruchspannung $\sigma = 1750$ atm.

Ganz ähnlich wurde mit dem zweiten Ringe verfahren; man erhielt

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Last | 0 | 10 | 20 | 30 | 0 | 30 | 40 | 0 | 40 | 0 | 40 | 45 | 50 | 0 |
| Spaltweite | 33,2 | 51,1 | 71,7 | 96,7 | 37,8 | 96,7 | 125,1 | 42,5 | 126,0 | 42,9 | 126,0 | 142,5 | 162,2 | 50,3 |
| Aufbiegung | — | 17,9 | 38,5 | 63,5 | 4,6 | 63,5 | 91,9 | 9,3 | 92,8 | 9,7 | 92,8 | 109,3 | 129,0 | 17,1 |

(Fortsetzung der Tabelle.)

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|----------------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| Last | 50 | 55 | 0 | 55 | 60 | 60, nach längerem Zuwarten | 0 | 60 | 65 | 0 | 65 | 67 |
| Spaltweite | 162,3 | 182,4 | 57,0 | 184,0 | 206,4 | 208,4 | 65,6 | 209,2 | 237,0 | 77,6 | 244,0 | Bruch |
| Aufbiegung | 129,1 | 149,2 | 23,8 | 150,8 | 173,2 | 175,2 | 32,4 | 176,0 | 203,8 | 44,4 | 210,8 | |

Der Bruch erfolgte gleichzeitig in zwei Querschnitten, die zu beiden Seiten des durch die Spaltmitte gezogenen Durchmessers lagen und um 35 mm von einander entfernt

waren. Die Stärke h war an beiden Stellen = 25,0 mm. Da der Hebelarm der Last wieder gleich 80 cm gesetzt werden kann, erhält man für die Bruchspannung $\sigma = 1715$ atm.

§ 2.

Versuche mit einem Gusseisenbalken.

Seit längeren Jahren wurden im Laboratorium eine Anzahl von Gusseisenbalken aufbewahrt, die früher in der Absicht hergestellt worden waren, vergleichende Biegungsversuche damit anzustellen. Diese Absicht kam jedoch nicht zur Ausführung und einer von den Balken, über den mir weitere Angaben nicht zur Verfügung stehen, wurde zur Ausführung der hier zu beschreibenden Versuche benützt. Ich liess ihn auf allen Seiten abhobeln und an den Enden die aus Abb. 3 ersichtlichen Löcher

bohren, um ihn zugleich als Zugstab benützen zu können. Der Querschnitt ist ein Rechteck von 8 cm Breite auf

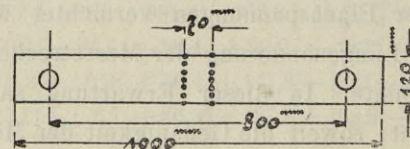


Abb. 3.

12 cm Höhe, die Länge beträgt im Ganzen 100 cm. Bei den Biegungsversuchen betrug die Spannweite 90 cm.

Mit dem Balken wurden nur Elasticitätsversuche an- gestellt, eine Bruchbelastung dagegen sorgfältig vermieden. Die Versuche wurden öfters mit ihm wiederholt, ein Theil davon in den zwei letzten Jahren regelmässig bei den für die Studirenden abgehaltenen Uebungen. Ich lege namentlich Werth darauf, dass hierbei eine Messung der elastischen Verlängerung und Verkürzung vorgenommen wird, die die Fasern in verschiedenen Abständen von der Querschnittsmitte bei der Biegung erfahren. Ausserdem wurden mit dem Balken Zug- und Druckversuche, sowie Messungen der Querdehnung bei Druck- bzw. Querver- kürzung bei Zugbelastung vorgenommen.

Für die Vornahme der Feinmessungen der sehr kleinen Längenänderungen bei allen diesen Versuchen dienten Spiegelapparate von der schon im 24. Hefte dieser „Mit- theilungen“ in der Abhandlung über die Biegungselasticität der Steinbalken beschriebenen Art. Sie wurden an Stiften befestigt, die ein für alle Mal an dem Balken angebracht sind. Die Stifte sind aus Rundeisen, 6 mm stark, 11 bis 25 hoch und mit einer Schraube von 2,5 mm Durchmesser und 3 mm Tiefe in den Balken eingelassen. Sie stehen auf den beiden Breitseiten in je zwei Reihen von je sieben Stück. Die beiden Reihen auf einer Seite liegen sym- metrisch zur Balkenmitte, jede um 35 mm von der Mitte entfernt. Bei den meisten Versuchen handelte es sich um die Messung der elastischen Längenänderung von Fasern, die zur Balkenaxe parallel gehen. In diesem Falle wird ein Spiegelapparat zwischen je zwei gleich gelegenen Stiften beider Reihen auf jeder Seite befestigt. Die Mess- strecke beträgt daher 70 mm, was für diese Messungen vollkommen ausreicht. — Bei den Beobachtungen über die Querdehnung muss auf jeder Breitseite ein Apparat zwischen zwei Stiften derselben Reihe angebracht werden.

Das Verfahren ist bei allen diesen Messungen im Wesentlichen dasselbe geblieben, das ich schon im 24. Heft der „Mittheilungen“ beschrieben habe. Nur an Stelle der Messung der Drehungen, die der Körper an der betrach- teten Stelle erfährt, mit Hilfe eines „Controlspiegels“, wogegen sich ein nicht unberechtigter, wenn auch hin- sichtlich des schliesslichen Erfolges unerheblicher Einwand erheben lässt, trat überall die schon von Bauschinger stets angewendete Beseitigung der aus den Drehungen des Versuchsstückes entspringenden Fehlerquelle durch Messung mit zwei Spiegelapparaten, die auf entgegen- gesetzten Seitenflächen angebracht sind und deren Federn auf den Rollen im entgegengesetzten Sinne aufliegen, so dass sich der eine Spiegel bei einer Drehung der be- treffenden Messstrecke vorwärts, der andere rückwärts dreht. Hierdurch werden die aus der Eigendrehung des Versuchsstückes hervorgehenden Fehler in den Einzel-

Mittheilungen a. d. mech. techn. Laboratorium. H. 28.

ablesungen bei der Bildung des arithmetischen Mittels aus beiden beseitigt.

Hierbei darf ich nicht unerwähnt lassen, dass vor zwei Jahren ein sonst in wissenschaftlichen Kreisen un- bekannt gebliebener Herr Roser, der zu jener Zeit Assi- stent von Herrn Baudirektor Professor von Bach in Stutt- gart war, in der Zeitschrift des Vereins deutscher In- genieure 1899, S. 205, einen heftigen Angriff gegen meine im 24. Heft beschriebenen Versuche veröffentlicht hat. Es lässt sich nicht in Abrede stellen, dass der Herr einige Schwächen oder Mängel meiner Versuchsausführung, auch einen Irrthum bei der Beschreibung mit Geschick bemerkt und zur Bemängelung meiner Schlussfolgerungen verwerthet hat. In allen diesen Fällen handelt es sich aber nur um verhältnissmässig geringfügige Fehler im Schlussresultat, das, wenn man die Verbesserungen an- bringt, kaum anders aussieht als vorher. Jene Arbeit ist daher eine ganz einseitige Streitschrift. Es muss wohl dem Mangel an Erfahrung des Verfassers zugeschrieben werden, dass er durch Aufzählung aller bei solchen Mes- sungen, zumal bei ungeschickter Handhabung möglichen Fehlerquellen das Vertrauen in die Schlussergebnisse zu erschüttern sucht. Ein erfahrener Experimentator weiss, dass man durch Wechsel in den Versuchsbedingungen und durch den Vergleich der verschiedenen Beobachtungen mit einander sehr wohl in der Lage ist, gröbere Fehler- quellen zu erkennen und zu vermeiden oder unschädlich zu machen.

Auf die Einzelheiten der Ausführungen des Herrn Roser brauche ich hier um so weniger einzugehen, als die von ihm angegriffenen Versuche inzwischen auch von anderer Seite wiederholt und bestätigt wurden. Zwar hatte schon lange vor mir, wie ich bald nach Veröffent- lichung des 24. Heftes bemerkte, Barlow in ganz ähn- licher Art, wenn auch mit einfacheren Hilfsmitteln die elastischen Längenänderungen der in verschiedenen Ab- ständen von der Mitte liegenden Fasern bei der Biegung von Gusseisenbalken gemessen und aus dem Vergleiche geschlossen, dass die Nulllinie bei der Biegung eines Gusseisenbalkens von rechteckigem Querschnitte ziemlich genau mit der Mitte zusammenfallen müsse. Gegen die Versuche von Barlow wurde von Herrn R. die durch das einfachere Messverfahren bedingte geringere Genauigkeit in's Feld geführt, dabei aber nicht beachtet, dass auch mit unvollkommenen Hilfsmitteln durch häufige Wieder- holung der Messungen brauchbare Mittelwerthe gewonnen werden können. Wenn ein Experimentator wie Barlow auf Grund sehr umfangreicher Versuche zu einer sehr bestimmt ausgesprochenen Feststellung gelangt, darf man sich zu ihrer Widerlegung nicht damit begnügen, die aus

den beispielsweise mitgetheilten Zahlen hervortretenden Beobachtungsfehler anzuführen. Man ist vielmehr schuldig, den Nachweis der Unrichtigkeit oder Unzulänglichkeit durch eigene Beobachtungen zu führen.

Dies war nun freilich von der Gegenpartei versäumt worden; an Stelle eigener Versuche, die zur Klärung der Frage und vor Allem auch zur Belehrung Jener, die sie anstellten, hätten dienen können, begnügte man sich mit unfruchtbaren polemischen Erörterungen. Natürlich hätte eine solche Kritik von Seiten eines jungen Mannes, der noch mit keiner eigenen Leistung vor die Oeffentlichkeit getreten war, nur wenig Eindruck machen können, wenn man nicht gewusst hätte, dass es sich hier um einen Assistenten des Herrn von Bach handle. Die Vermuthung war daher nicht abzuweisen, dass der Meister selbst hinter seinem Schüler stehe. Aus diesem Grunde war der Kundgebung ohne Zweifel eine gewisse Beachtung zu schenken, wie man nun auch im Uebrigen darüber denken mochte. Ich hielt es daher für sehr wünschenswerth, dass von ganz unbetheiligter Seite, die die nöthige Gewähr für eine zuverlässige Durchführung zu bieten vermochte, eine Nachprüfung meiner Versuchsergebnisse vorgenommen werden möchte. Ich wandte mich daher mit einer dahingehenden Bitte an eine der ersten Autoritäten auf dem Gebiete des Materialprüfungswesens, nämlich an Herrn Professor von Tetmajer, den damaligen Vorstand des Züricher Laboratoriums. Herr College v. Tetmajer kam meinem Wunsche in liebenswürdigster Weise entgegen, wofür ich mich, ihm auch an dieser Stelle meinen Dank auszusprechen, verpflichtet fühle. Er führte die Versuche mit verbesserten Einrichtungen und dem ihm eigenen Geschick für eine Reihe verschiedener Steinbalken durch. In den Mittheilungen der Materialprüfungs-Anstalt am schweizerischen Polytechnikum Zürich, Heft I, dritte vollständige Auflage, Zürich 1900, S. 328, hat er über seine Versuchsergebnisse berichtet, die mit den von mir früher gefundenen im Wesentlichen übereinstimmen. Namentlich hat sich hierbei von Neuem gezeigt, dass die Nulllinie bei der Biegung längst nicht so weit von der Querschnittsmitte entfernt ist, wie man früher auf Grund unzureichender theoretischer Betrachtungen bei Steinbalken von rechteckigem Querschnitte angenommen hatte.

Schon im vorigen Hefte dieser Mittheilungen, S. 3, habe ich übrigens kurz darauf hingewiesen, dass auch durch die Versuche von Herrn Professor Grübler über die Festigkeit von Schleifsteinen (Zeitschrift des Vereins D. Ing. 1899, S. 1294) auf anderem Wege eine mittelbare Bestätigung der aus meinen Elasticitätsmessungen an gebogenen Steinbalken gezogenen Schlussfolgerungen herbeigeführt worden ist.

Der Hinweis auf diese neueren Versuche bildet die beste Antwort auf die unbegründeten Ausstellungen, die gegen meine frühere Arbeit erhoben worden sind. Ich glaube daher annehmen zu dürfen, dass nun auch Jene, die durch den Widerspruch des Herrn R. gegen meine Versuchsergebnisse misstrauisch geworden waren, zu einer anderen Auffassung bekehrt worden sind. Wie man sich auf der Gegenseite selbst, angesichts der Tetmajer'schen und der Grübler'schen Versuche, jetzt zu der Frage stellt, vermag ich freilich nicht zu sagen, da mir darüber keine Aeußerung bekannt geworden ist.

Uebrigens vermag ich keineswegs zu behaupten, dass die Frage der Biegungsfestigkeit des Gusseisens durch die hier mitzutheilenden Messungen endgültig gelöst sei. Es scheint vielmehr, dass hierbei noch manche Dinge — etwa Eigenspannungen, die von den bei dem Versuche aufgebrauchten Lasten unabhängig sind, vielleicht auch die schon von Barlow vermuthete Abhängigkeit der Bruchgefahr nicht nur von der Spannung an der betreffenden Stelle selbst, sondern auch von dem dort bestehenden Spannungsgefälle — mit hineinspielen, die bis jetzt noch nicht hinreichend aufgeklärt sind. Jedenfalls glaube ich aber annehmen zu dürfen, dass meine Messungen einen für die Klarstellung der Frage nicht zu unterschätzenden Beitrag bilden.

Auf die Untersuchung der bleibenden Dehnungen, die den Hauptgegenstand der im vorigen Paragraphen beschriebenen Versuche bildete, bin ich bei den Versuchen mit dem Gusseisenbalken nicht eingegangen. Ich habe vielmehr nur die rein elastischen Dehnungen gemessen, die sich einstellten, nachdem der Balken wiederholt mit der betreffenden Last beansprucht und dadurch in einen constanten Zustand versetzt worden war, ganz so wie dies auch bei den im 24. Hefte mitgetheilten Versuchen geschehen war. Bei der Deutung der Versuchsergebnisse ist dies wohl zu beachten. Wie schon früher bekannt war und auch aus den Versuchen in § 1 deutlich genug zu entnehmen ist, hängt das elastische Verhalten des Gusseisens in ziemlich hohem Grade von der Behandlung ab, die es vorher erlitten hat. Das ist eine der unvermeidlichen Schwierigkeiten, die sich allen Elasticitätsversuchen mit diesem Stoffe entgegenstellen.

Uebrigens führe ich die Versuche nicht in der Reihenfolge an, in der sie angestellt wurden, sondern in einer für den Zweck der Veröffentlichung übersichtlicheren Ordnung. Zuerst kamen die Biegungsversuche, dann die Versuche mit Druck in der Längsrichtung, hierauf die unter den Biegungsversuchen angeführten mit Druck in der Querrichtung, dann die Zugversuche. Die Versuche über die Querrichtung bei Längsbeanspruchung folgten erst vie

später bei Gelegenheit der Uebungen für die Studirenden, bei denen die früheren Versuche öfters wiederholt wurden. Für den Zweck dieser Veröffentlichung habe ich übrigens

die Messung der Querverkürzung, um zuverlässigere Zahlen zu erhalten, noch einmal besonders von Herrn Assistenten Schenk vornehmen lassen.

A. Zug- und Druckversuche.

Der Röllchendurchmesser der verwendeten Spiegelapparate betrug 6,670 mm, der Abstand der Spiegel von dem Massstab 1750 mm. Bei einer Messlänge von 70 mm ist daher jeder mm Ausschlag mit

$$\frac{6,679}{4 \times 1750 \times 70} = 1,361 \cdot 10^{-5}$$

zu multipliciren, um daraus die spezifische Dehnung der zugehörigen Faser zu berechnen. Nimmt man, wie es aus bekannten und vorher auch schon besprochenen Gründen geschah, die Summe aus den Ausschlägen der zu beiden Seiten angebrachten Spiegel als Mass für die Längenänderung der betreffenden Strecke, so ist diese Summe noch mit $0,680 \cdot 10^{-5}$ zu multipliciren, um daraus die spezifische Längenänderung zu erhalten.

Bei den Zugversuchen schien es mit Rücksicht auf die Festigkeit der Einspannagen nicht rathsam, mit der Belastung über 40 t hinauszugehen. Diese Last wurde unmittelbar vor der Ausführung der Hauptversuchsreihe

wiederholt (10 mal, darunter einmal auch für eine Dauer von 10 Minuten, sonst etwa nur für die Dauer von einer Minute) aufgebracht, bis sich an der Ablesung nichts mehr änderte. Dann wurden der Reihe nach 5, 10, 15 t u. s. w. aufgebracht und dazwischen jedesmal auf Null zurückgegangen. Die Nullablesung blieb während dieser Reihe innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler constant. Die beobachteten Längenänderungen sind daher als rein elastische zu betrachten. Die Spiegel sassen natürlich auf den in die Mittelebene des Balkens fallenden Stiften. In der folgenden Tabelle bedeutet P die ganze Last in t, σ die auf 1 qcm entfallende in kg, also die Zugspannung in atm. (wobei wegen der verhältnissmässig grossen Entfernung der Lastangriffsstellen von der Messstrecke auf eine nahezu gleichmässige Vertheilung der Spannungen über den Querschnitt gerechnet werden darf), Δl die Summe der Ausschläge beider Spiegel in Scalentheilen, ϵ die daraus durch Multiplikation mit $0,68 \cdot 10^{-5}$ berechnete spezifische Dehnung.

Zugversuch

| P | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| σ | 52,1 | 104,2 | 156,2 | 208,3 | 260,4 | 312,5 | 364,6 | 416,6 |
| Δl | 5,4 | 11,1 | 17,8 | 25,2 | 32,4 | 40,1 | 47,9 | 55,9 |
| ϵ | $3,7 \cdot 10^{-5}$ | $7,5 \cdot 10^{-5}$ | $12,1 \cdot 10^{-5}$ | $17,1 \cdot 10^{-5}$ | $22,0 \cdot 10^{-5}$ | $27,3 \cdot 10^{-5}$ | $32,6 \cdot 10^{-5}$ | $38,0 \cdot 10^{-5}$ |

Der für den gesammten Spannungszuwachs von 0 bis 416,6 atm. berechnete Elasticitätsmodul E stellt sich daher auf

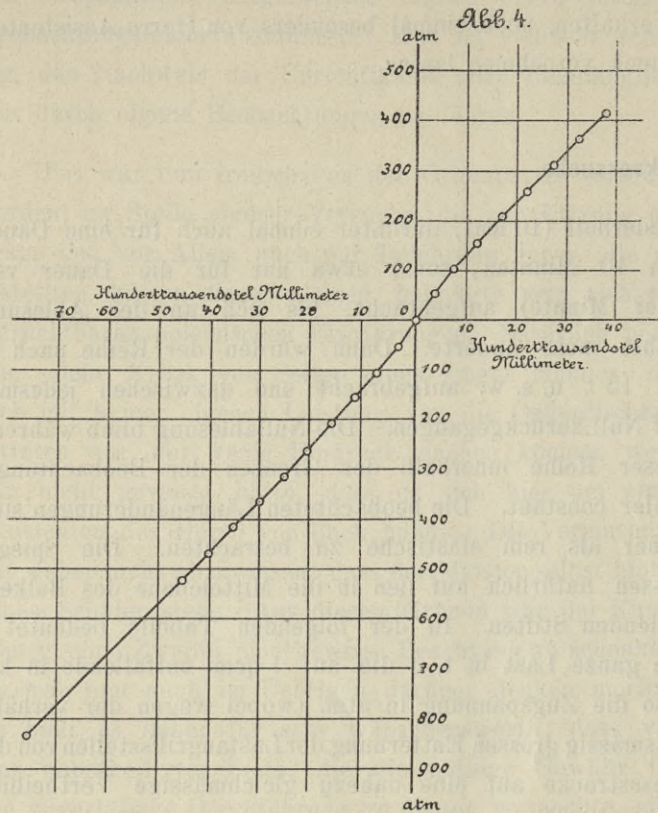
$$E = \frac{416,6}{38,0} \cdot 10^{-5} = 1096\,000 \text{ atm.}$$

Bei den Druckversuchen lag der Stab mit den beiden gehobelten Endflächen unmittelbar zwischen den Druckplatten der Werder'schen Maschine. Hier wurde die Belastung bis

auf 80 t gesteigert. Auch diesmal gingen den Versuchen mehrere Belastungen mit der Höchstlast voraus, so lange bis keine bleibenden Zusammendrückungen mehr beobachtet werden konnten. Bis zu 50 t oder 521 atm. wurde die Last jedesmal um 5 t gesteigert; dann folgte nur noch die Belastung mit 80 t. Im Uebrigen wurde der Versuch genau so wie im vorigen Falle durchgeführt und auch die Bedeutung der Buchstaben in der Tabelle ist dieselbe wie vorher.

Druckversuch.

| P | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 80 |
|------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| σ | 52,1 | 104,2 | 156,2 | 208,3 | 260,4 | 312,5 | 364,6 | 416,6 | 468,7 | 520,8 | 833,3 |
| Δl | 4,5 | 10,7 | 17,3 | 23,9 | 30,9 | 37,4 | 44,4 | 51,7 | 59,7 | 66,9 | 111,8 |
| ϵ | $3,1 \cdot 10^{-5}$ | $7,3 \cdot 10^{-5}$ | $11,8 \cdot 10^{-5}$ | $16,3 \cdot 10^{-5}$ | $21,0 \cdot 10^{-5}$ | $25,4 \cdot 10^{-5}$ | $30,2 \cdot 10^{-5}$ | $35,2 \cdot 10^{-5}$ | $40,6 \cdot 10^{-5}$ | $45,5 \cdot 10^{-5}$ | $76,0 \cdot 10^{-5}$ |



B. Querverkürzung bei Längszug.

Die Spiegelgeräte waren hier zwischen Stiften derselben Reihe anzubringen. Der Vorsicht halber (weil nämlich bei den sehr nahe an der Kante stehenden Stiften befürchtet werden konnte, dass sie sich nach dieser Seite hin leicht ein wenig neigen könnten) wurden dazu jedoch nicht die beiden äussersten Stifte einer Reihe ausersehen, sondern die ihnen zunächst nach innen hin folgenden, oder nach den unter C folgenden Zeichenerklärungen die Stifte 2 und 6 einer Reihe. Deren Abstand betrug 78,5 mm. Hiernach ist die Summe der Ausschläge beider Spiegel, die nur ein mit den übrigen Versuchen nicht vergleichbares Mass für die Längenänderung liefern würde, mit

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{6,679}{4 \times 1750 \times 78,5} = 0,608 \cdot 10^{-5}$$

zu multipliciren, um daraus die spezifische Längenänderung zu erhalten.

Für eine Zugbelastung des Stabs mit 40 t wurde die Querverkürzung der Messstrecke im Mittel aus 10 Versuchen zu 10,6 Scalentheilen, die spezifische Verkürzung daher zu $6,4 \cdot 10^{-5}$ gefunden. Zur Beurtheilung des Genauigkeitsgrades dieser Messung, der freilich bei solch kleinen Längenänderungen nicht sehr befriedigend ist, möge noch bemerkt werden, dass bei jenen 10 unter den gleichen Bedingungen vorgenommenen Versuchen der kleinste beobachtete Werth 10,1 und der grösste 11,0 Scalentheile betrug. Auf einen Fehler von einigen Pro-

Für den Spannungszuwachs von 0 bis 416,6 atm. berechnet sich der Elasticitätsmodul zu 1 180 000 atm., zwischen 0 und 520,8 zu 1 145 000 atm. und zwischen 0 und der Höchstbelastung von 833,3 atm. zu 1 096 000 atm. Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Spannung und der spezifischen Längenänderung wird sowohl für Zug- als Druckbelastung durch die beistehende Linie angegeben. Zuglasten sind dabei nach oben, Drucklasten nach unten, Dehnungen nach rechts und Verkürzungen nach links abgetragen.

centen muss man daher auch beim Mittelwerthe der Messung immer noch gefasst sein.

Beachtet man, dass für die Last von 40 t die Längsdehnung unter A zu $38,0 \cdot 10^{-5}$ gefunden wurde, so erhält man für die Poisson'schen Verhältnissziffer $\frac{1}{m}$ zwischen Querverkürzung und Längsdehnung für den Spannungszuwachs von 0 bis 416,6 atm.

$$\frac{1}{m} = \frac{6,4}{38,0} = 0,168$$

$$\text{oder } m = 5,94$$

Ausserdem wurde noch eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Last von 5 zu 5 t gesteigert und die zugehörige Querverkürzung bei jeder Laststufe gemessen wurde. Diese Zahlen sind freilich, da sie nicht als Mittelwerthe aus einer grösseren Anzahl von Versuchen gewonnen wurden, ungenauer als die vorher für die Last von 40 t angeführte. Immerhin geben sie wenigstens eine ungefähre Vorstellung von dem Anwachsen der Querverkürzung mit wachsender Last. Danach scheint es, dass von der kleinsten Last von 5 t abgesehen, bei der die Querverkürzung verhältnissmässig sehr gering ausfiel, diese späterhin — im Gegensatze zur Längsdehnung — ziemlich genau proportional mit der Last anwächst. Die Zahlen sind aus der folgenden Tabelle zu entnehmen.

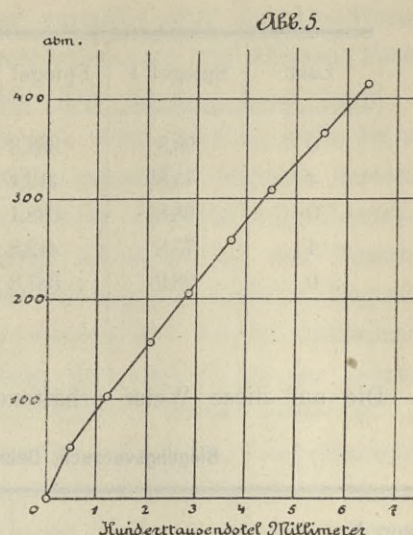
Querverkürzung.

| | | | | |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Zugkraft P | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Längsspannung σ | 52,1 | 104,2 | 156,2 | 208,3 |
| Querverkürzung in Scalentheilen | 0,6 | 2,0 | 3,6 | 4,8 |
| Specifische Querverkürzg. | $0,4 \cdot 10^{-5}$ | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | $2,9 \cdot 10^{-5}$ |

(Fortsetzung der Tabelle.)

| | | | | |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Zugkraft P | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Längsspannung σ | 260,4 | 312,5 | 364,6 | 416,6 |
| Querverkürzung in Scalentheilen | 6,1 | 7,4 | 9,2 | 10,6 |
| Specifische Querverkürzg. | $3,7 \cdot 10^{-5}$ | $4,5 \cdot 10^{-5}$ | $5,6 \cdot 10^{-5}$ | $6,4 \cdot 10^{-5}$ |

In Abb. 5 ist der Zusammenhang zwischen Last und Querverkürzung auch noch in Form eines Diagramms wieder gegeben.



C. Biegung.

Der Balken wurde, wie schon im 24. Hefte bei den Steinbalken beschrieben, beiderseits auf Walzen gelagert und auch die in der Mitte angreifende Last wurde durch Vermittelung einer Walze auf ihn übertragen. Von den 7 Stiften einer Reihe waren die äussersten um 1,5 mm von der Kante (bis zur Stiftmitte gemessen) entfernt. Da die ganze Querschnittshöhe 120 mm betrug, berechnet sich demnach der Abstand von Stiftmitte zu Stiftmitte in einer Reihe zu 19,5 mm. Der äusserste Stift einer Reihe auf der Zugseite sei mit 1, der folgende mit 2 u. s. f. bezeichnet, so dass also 4 den Stift in der Mitte und 7 den äussersten Stift auf der Druckseite bedeutet. Die Strecke, die den Stift 1 einer Reihe mit dem gleichbezeichneten Stifte der anderen auf der gleichen Seitenfläche angebrachten Reihe verbindet, sei als Strecke 1 bezeichnet. Auf jeder der beiden Breitseiten des Balkens befindet sich eine Strecke 1 und das Rechteck, das durch beide begrenzt wird, soll die Faserschicht 1 heissen. Nimmt man den Mittelwerth aus den Längenänderungen beider Strecken 1 (beide Längenänderungen sind der symmetrischen Belastung und Anordnung wegen als gleich gross zu erwarten und die Mittelwerthbildung hat daher nur den Zweck, Beobachtungsfehler zu beseitigen), so mag dieser kurz als die Längenänderung der Faser 1 bezeichnet werden. Ein Mass für diese Längenänderung erhält man in der Summe der Ausschläge der zu beiden Seiten angebrachten Spiegel und durch Multiplikation mit $0,68 \cdot 10^{-5}$ kann daraus auch die specifische Längenänderung ϵ der Faser berechnet werden.

Bei den Biegungsversuchen wurde nur eine einzige Last und zwar von 4 t angewendet. Die nach der ge-

wöhnlichen Formel berechnete Spannung in der äussersten Faser im mittleren Querschnitt stellt sich dabei auf rund 470 atm. Der Balken hätte natürlich noch weit grössere Lasten aufnehmen können, ohne zu zerbrechen. Bei den praktischen Anwendungen kommen aber grössere Lasten, als sie der Beanspruchung von 470 atm entsprechen, nicht leicht vor und es schien zweckmässig, sich auch bei der Ausführung der Versuche nicht zu weit von den praktisch vorkommenden Fällen zu entfernen. Ausserdem fallen die zu erwartenden Dehnungen der Fasern hierbei noch in das schon durch die Zug- und Druckversuche unter A gedeckte Gebiet, so dass ein unmittelbarer Vergleich zwischen Längsspannung und Biegung möglich ist.

Bei den Messungen wurde fortwährend zwischen der Belastung mit 4 t und dem unbelasteten Zustande abgewechselt. Bei der Messung für eine Faser wechselte man zuerst einige Male zwischen 0 und 4 t, um sich zu überzeugen, ob man genügend constante Resultate erhielt. Dann wurden in der darauf kommenden Hauptreihe die Ablesungen für die aufeinander folgenden Lasten 0, 4, 0, 4, 0 t notirt, aus den drei Nullablesungen einerseits und den zwei Ablesungen für 4 t andererseits die Mittel gebildet und der Spiegelausschlag gleich dem Unterschiede zwischen beiden Mitteln gesetzt. Gleichzeitig wurden natürlich auch auf der andern Seite die Spiegelablesungen festgestellt und die Längenänderung der Faser durch die Summe beider Spiegelausschläge dargestellt. Ein Biespiel für die äusserste Faser auf der Druckseite mag dies noch näher erläutern.

Man erhielt:

Faser 7.

| Last | Spiegel I | Spiegel II |
|------|-----------|------------|
| 0 | 98,8 | 388,3 |
| 4 | 75,8 | 413,1 |
| 0 | 98,8 | 388,1 |
| 4 | 75,8 | 412,8 |
| 0 | 98,9 | 387,8 |

Mittel für Spiegel I bei 0 = 98,8
 " " " bei 4 t = 75,8
 Spiegelausschlag = 23,0

Mittel für Spiegel II bei 0 = 388,1
 " " " bei 4 t = 413,0
 Spiegelausschlag = 24,9

Faserverkürzung daher = 47,9 oder die spezifische Verkürzung
 $\epsilon = 47,9 \cdot 0,68 \cdot 10^{-5} = 32,6 \cdot 10^{-5}$

Die auf diese Weise erhaltenen Messungsergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Biegungsversuch, Dehnungen der Fasern durch die Last von 4 t in der Mitte bei 90 cm Spannweite.

| Faser, Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Abstand von der Mitte in mm | +58,0 | +38,7 | +19,3 | 0 | -19,3 | -38,7 | -58,0 |
| Dehnung Δl | +49,0 | +33,5 | +17,1 | +1,9 | -11,8 | -25,5 | -47,9 |
| Specifiche Dehnung ϵ | $+33,3 \cdot 10^{-5}$ | $+22,8 \cdot 10^{-5}$ | $+11,6 \cdot 10^{-5}$ | $+1,3 \cdot 10^{-5}$ | $-8,0 \cdot 10^{-5}$ | $-17,3 \cdot 10^{-5}$ | $-32,6 \cdot 10^{-5}$ |

Diese Zahlen bedürfen aber noch einer Verbesserung, wenn man sie auf den Fall anwenden will, dass das Biegemoment allein die Formänderung hervorbringt. Da die Messstrecken in die Mitte der Spannweite fielen, ging nämlich die Richtungslinie der aufgebracht Last durch sie hindurch, derart, dass jede Messstrecke durch sie halbirt wurde. Daher kommt zur Formänderung durch das Biegemoment noch jene, die durch den von der Last veranlassten Querdruck zwischen den Fasern bewirkt wird. Man stelle sich vor, dass zu der Last P , die in der Mitte der einen Schmalseite des Balkens als Biegunslast aufgebracht ist, noch eine zweite von derselben Grösse und entgegengesetzten Richtung hinzugefügt werde, die auf der gegenüberliegenden Schmalseite angreift. Die Auflagerkräfte werden dann zu Null und der Balken ist nicht mehr gebogen. Trotzdem zeigen die einzelnen Messstrecken Längenänderungen, die durch die in der Querrichtung übertragene Druckbelastung des Balkens verursacht werden.

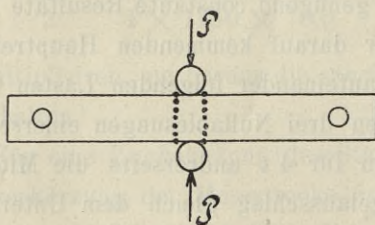


Abb. 6.

In dieser Form liess sich der Versuch leicht durchführen. Man brauchte nur den Balken in der Mitte der einen Schmalseite zu stützen und auf der Gegenseite die Last von 4 t aufzubringen (siehe Abb. 6). Dabei genügte es, der Symmetrie wegen, die Aenderungen der Messstrecke auf einer Seite (mit Einschluss der Mitte) zu beobachten.

Wie zu erwarten war, erfuhren bei diesem Lastangriffe alle Messstrecken eine Dehnung; dagegen war diese Dehnung nicht etwa bei den äussersten Messstrecken, auf die die Lasten unmittelbar einwirkten, am grössten, sondern sie wuchs vielmehr von da aus nach der Mitte zu, wo sie ihren grössten Werth annahm. Wenn man indessen bedenkt, dass die äussersten Messstrecken bei ihrer verhältnissmässig grossen Länge von 70 mm nur in ihrem mittleren Theile auf ein kurzes Stück hin dem Querdrucke ausgesetzt waren und sich von den dadurch weiter nach aussen hin veranlassten Formänderungen, die für sich genommen auf eine Verkürzung hinauslaufen, nähere Rechenschaft zu geben versucht, wie dies auf Grund der Hertz'schen Theorie (vgl. meine „Festigkeitslehre“, 2. Aufl. § 71 und 72) leicht möglich ist, versteht man alsbald, dass auch dieses Beobachtungsergebniss nicht anders zu erwarten war. Die gemessenen Längenänderungen sind die folgenden:

Faser Nr. 1 oder 7 2 oder 6 3 oder 5 4 (Mitte)
 $\Delta l = +0,9 \quad +2,1 \quad +3,0 \quad +3,5$

Es fragt sich jetzt, wie gross auf Grund dieses Versuchs der Antheil an der Längenänderung Δl zu veranschlagen ist, der bei dem vorher besprochenen Biegungsversuche auf die durch den Querdruck veranlassten lokalen Formänderungen entfällt, die mit dem Biegemomente nicht zusammenhängen. Wir wollen vor Allem versuchen, diese Frage für die mittlere Faser Nr. 4 zu beantworten, die für uns wegen der Entscheidung über die Lage der Nulllinie von besonderer Wichtigkeit ist. Zunächst ist klar, dass die mittlere Faser dieselbe Längenänderung erfährt, ob nun der Balken von einer Last P in der einen

oder von der andern Last P in der entgegengesetzten Richtung durchgebogen wird, sobald man nur voraussetzen darf, dass Alles symmetrisch zur Mittelebene ist. Dies trifft nun freilich insofern hier nicht ganz zu, als bei dem Biegungsversuche der Balken vorher in einen constanten Zustand übergeführt wurde, indem die Fasern auf der einen Seite wiederholt auf Zug, die andern wiederholt auf Druck beansprucht worden waren. Ferner ist auch zu beachten, dass eine Biegungslast P beim Gusseisen, das dem Hooke'schen Gesetze nicht folgt, andere Formänderungen bewirkt, wenn sie allein an dem Balken angreift, als wenn sie sich einer anderen — in diesem Falle einer ihr entgegengesetzt gleichen — zugesellt. Da es sich aber hier nur um eine verhältnissmässig kleine Correctionsgrösse handelt, bei der schon eine ungefähre Einschätzung genügt und die Abweichung des Gusseisens vom Proportionalitätsgesetze bei den geringen Spannungs- und Dehnungsunterschieden, die in der mittleren Faser auftreten, ohnehin nicht sehr erheblich ist, genügt es, wenn wir von diesen Umständen absehen. Dann ist die durch eine einzige Last P in Folge rein örtlicher Formänderungen wegen des Querdrucks zwischen den Fasern bewirkte Längenänderung Δl der mittleren Faser gleich der Hälfte von $+ 3,5$ oder gleich $+ 1,7$ einzuschätzen.

Wir wollen, um in dieser Sache ganz klar zu sehen, noch die folgende Ueberlegung anstellen. Durch die Versuche soll geprüft werden, ob die recht erhebliche Abweichung der Nulllinie von der Querschnittsmitte, die man auf Grund bestimmter Annahmen, z. B. auf Grund des Potenzgesetzes, theoretisch berechnet hatte, in Wirklichkeit besteht oder nicht. Stellen wir uns daher für den Augenblick auf den Boden jener Theorie und überlegen wir uns, was für Formänderungen der Messstrecken nach ihr zu erwarten wären, wenn der Balken durch zwei entgegengesetzte gleiche Kräfte der Quere nach zusammengedrückt wird. Man sieht sofort, dass auch nach dieser Theorie, da hier keine Biegung vorkommt, die beobachteten Längenänderungen nur auf lokale Formänderungen durch den Querdruck zurückgeführt werden können. Von Seiten der Anhänger jener Theorie kann daher gegen die vorher vorgenommene Deutung der Beobachtungsziffern kein Einwand erhoben werden.

Subtrahirt man aber den von örtlichen Einflüssen in der Nähe der Lastangriffsstelle abhängigen Antheil $+ 1,7$ von der bei dem Biegungsversuche beobachteten Gesamtänderung $\Delta l = + 1,9$ der mittleren Messstrecke, so bleibt $+ 0,2$ als Einfluss des Biegemoments, d. h. die Abweichung der Nulllinie von der Mitte liegt noch innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Abschätzung des Einflusses des Querdrucks auf die übrigen Fasern beim Biegungsversuche. Nur darüber kann kaum ein Zweifel bestehen, dass sich diese Wirkung nicht bis auf die der Lastangriffsstelle gegenüber liegende äusserste Faser erstrecken kann. Daher darf die beim Druckversuche gefundene Dehnung $\Delta l = 0,9$ bei den Fasern 1 und 7 unmittelbar der Wirkung der zunächst liegenden Last P zugeschrieben werden, und es ist anzunehmen, dass die lokale Wirkung der Last P bei der Biegung auf die nächst liegende Faser 7 ebenso gross ist. An der beim Biegungsversuche gefundenen Längenänderung $\Delta l = - 47,9$ ist daher eine Verbesserung im Betrage $0,9$ vorzunehmen, um jenen Werth zu erhalten, der der Wirkung des Biegemoments allein zuzuschreiben ist. Wir setzen daher als verbesserten Werth $\Delta l = - 48,8$ für diese Faser.

Bei den anderen Fasern wird es — immer mit Rücksicht darauf, dass es sich nur um geringfügige Verbesserungen handelt, bei denen eine ungefähre Abschätzung vollkommen ausreicht — zulässig erscheinen, von der Voraussetzung auszugehen, dass sich auf der von der Last abgewendeten Balkenhälfte die lokalen Wirkungen der Biegungslast von der Mitte aus nach der Kante hin in demselben Verhältnisse verminderten, wie der Querdruck zwischen den Fasern. Dieses Verhältniss lässt sich aber auf Grund einer einfachen Betrachtung leicht ermitteln. Man denke sich nämlich etwa durch die Faserschicht 2 und zwei sich an ihren Enden rechtwinklig anschliessende Ebenen ein Körperstück abgegrenzt, das von 2 über 1 hinaus zu der der Biegungslast gegenüber liegenden freien Schmalseite des Balkens reicht. Aus dem Gleichgewichte der an den drei Schnittflächen übertragenen Spannungen gegen Verschieben in der Richtung der Biegungslast folgt, dass der in der Faserschicht 2 übertragene Querdruck ebenso gross sein muss, als die Summe der in den beiden anderen Schnittflächen übertragenen Scheerkräfte. Das Gesetz, nach dem sich die Scheerkräfte über die Querschnittsfläche vertheilen, kann aus bekannten Betrachtungen (vgl. meine „Festigkeitslehre“ § 20) entnommen und auch für den vorliegenden Fall als hinreichend genau gültig angesehen werden. Führt man die sich aus dieser Bemerkung ergebende einfache Rechnung durch, so findet man, dass der in der Faserschicht 2 übertragene Querdruck gleich $0,06 P$, der in 3 übertragene gleich $0,26 P$ und der in 4 (also in der Mitte) übertragene gleich $0,5 P$ zu setzen ist, wenn unter P wiederum die Biegungslast verstanden wird.

Berücksichtigt man ferner, dass der bei dem Druckversuche nach Abb. 6 beobachtete Werth von $\Delta l = + 2,1$

in den Fasern 2 und 6 durch das Zusammenwirken der von beiden Lasten P verursachten örtlichen Formänderungen zu Stande kommt, so erhält man auch einen Anhalt für die Abschätzung der auf der Lastseite liegenden lokalen Einflüsse bei der Biegung, für die die vorher für die andere Seite eingeführte Annahme nicht mehr zulässig ist. Man erhält so für die Verbesserungswerte, die bei den beim Biegungsversuche beobachte-

ten Dehnungen Δl zu berücksichtigen sind, folgende Zahlen:

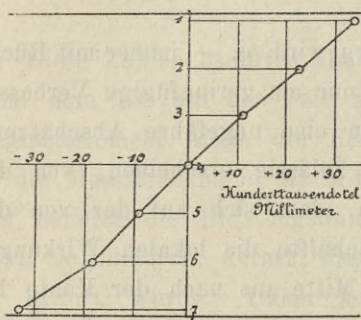
| | | | | | | | |
|------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Faser Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Lokaler Einfluss | 0 | 0,2 | 0,9 | 1,7 | 2,1 | 1,9 | 0,9 |

Nach Vornahme der Berichtigung findet man daher für die auf Rechnung des Biegemoments zu setzenden Faserdehnungen bei der Biegung die nachstehenden Werthe:

Biegungsversuch; berichtigte Werthe für die Faserdehnungen.

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Faser Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Abstand von der Mitte in mm | +58,0 | +38,7 | +19,3 | 0 | -19,3 | -38,7 | -58,0 |
| Dehnung Δl | +49,0 | +33,3 | +16,2 | +0,2 | -13,9 | -27,4 | -48,8 |
| Specifische Dehnung ϵ | $+33,3 \cdot 10^{-5}$ | $+22,6 \cdot 10^{-5}$ | $+11,0 \cdot 10^{-5}$ | $+0,1 \cdot 10^{-5}$ | $-9,5 \cdot 10^{-5}$ | $-18,6 \cdot 10^{-5}$ | $-33,2 \cdot 10^{-5}$ |

Abb. 7.



Diese Werthe sind in Abb. 7 zur Auftragung eines Dehnungs-Diagramms verwertet. Die Balkenhöhe ist in senkrechter Richtung, die Dehnungen sind in horizontaler Richtung aufgetragen.

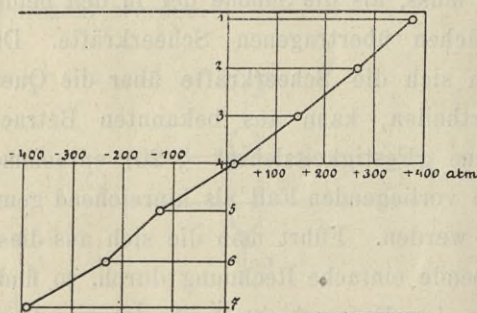
Wir wollen jetzt sehen, wie gross die Spannungen sind, die diesen Dehnungen entsprechen, wenn man unter der Voraussetzung, dass die Dehnung nur von der Spannung in der betreffenden Faser selbst und nicht vom Spannungsgefäll abhängt, das aus den Zug- und Druckversuchen in Abschnitt A ermittelte und durch Abb. 4 dargestellte Dehnungsgesetz zu Grunde liegt. Die Umrechnung ist leicht vorzunehmen; man findet die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten Werthe.

Spannungsverteilung.

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| Faser Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Abstand von der Mitte in mm | +58,0 | +38,7 | +19,3 | 0 | -19,3 | -38,7 | -58,0 |
| Specifische Spannung σ in atm. | +371,3 | +265,9 | +143,8 | +1,4 | -129,6 | -233,8 | -395,8 |

An der um 2 mm von der Faserschicht 1 abstehenden Kante auf der Zugseite ist daher die Spannung gleich +382,2 atm. und an der Kante auf der Druckseite gleich -412,6 atm. zu setzen. Auch diese Spannungswerte sind ebenso wie vorher die Dehnungswerte schaubildlich in Abb. 8 aufgetragen.

Abb. 8.



Für die Summe aller Zugspannungen findet man hiernach 9820 kg und für die Summe aller Druckspannungen 9320 kg. Beide Zahlen sollten, wenn keine Beobachtungsfehler vorgekommen und alle bei der Berechnung zu Grunde gelegten Annahmen genau zutreffend wären, einander gleich sein. Sie unterscheiden sich aber in Wirklichkeit um 500 kg,

d. h. um rund 5 v. H. Setzen wir diesen Unterschied vorläufig auf Rechnung von Beobachtungsfehlern und sonstigen Ungenauigkeiten und nehmen den Mittelwerth aus beiden Zahlen als wahrscheinlichen Werth einer der Kräfte des Kräftepaars, das aus den Resultirenden der Zug- und Druckspannungen gebildet werden muss, so erhält man, da der Hebelarm des Kräftepaars genau genug gleich $\frac{2}{3}$ der Querschnittshöhe oder gleich 8 cm gesetzt werden kann, für das Moment des Kräftepaars den Werth

76 560 cmkg.

Dieses Moment sollte dem durchschnittlichen Werthe des Biegemoments innerhalb der Messstrecken gleich sein. Da der Auflagerdruck 2000 kg betrug und das ihm nächst gelegene Ende der Messstrecke um 41,5, die Mitte um 45 cm von ihm abstand, erhält man für den Mittelwerth des Moments der äusseren Kräfte

86 500 cmkg

also einen erheblich, nämlich um 9940 cmkg grösseren Werth. Da die Zahl von 86500 unbedingt feststeht, kann der Fehler nur in dem berechneten Werthe des Moments der inneren Spannungen gesucht werden, das um 11,5 v. H. des richtigen Werths zu klein ausgefallen ist.

Durch Beobachtungsfehler allein lässt sich ein so erheblicher Unterschied nicht erklären. Auch bei der wegen des Querdrucks zwischen den Fasern an den Beobachtungsziffern angebrachten Verbesserung kann, obgleich sie von ziemlich willkürlichen Annahmen ausging, durch die dabei vorgekommenen Fehler kein ansehnlicher Theil dieses Unterschiedes verursacht worden sein, da es sich hierbei überhaupt nur um geringe Beträge handelte. Hiernach bleibt nur übrig, dass zum Mindesten der Haupttheil des Unterschiedes zwischen den vorher berechneten statischen Momenten darauf beruhen muss, dass in der Umrechnung der Dehnungen auf die Spannungen ein Fehler liegt.

Worin dieser Fehler besteht, lässt sich auf Grund des hier vorgebrachten Materials freilich nicht entscheiden. Zunächst wäre es schon möglich, dass die Veränderlichkeit der elastischen Eigenschaften des Gusseisens, namentlich deren Abhängigkeit von der ganzen Vorgeschichte des Materials, die bei allen solchen Messungen am Gusseisen als unvermeidliche Fehlerquelle mit hineinspielt, den Unterschied erklären könnte. Ich glaube dies freilich nicht. Es ist zwar nicht wohl möglich, den wahrschein-

lichen Werth des dadurch etwa bedingten Fehlers genauer zu beziffern; nach meinen Erfahrungen und dem durch sie geleiteten Gefühle halte ich ihn aber unter Erwägung aller Umstände, die bei diesen Versuchen mitsprachen, nicht für gross genug, um jenen Unterschied mit ihm, unter alleiniger Zuziehung der schon vorher angeführten Fehler, erklären zu können. Indessen sage ich dies nicht, um eine bestimmte Behauptung aufzustellen, sondern nur, weil ich nicht verschweigen will, wie ich im Augenblicke über die Sache denke.

Dass eine andere mögliche Ursache für den beim Umrechnen der Dehnungen auf die Spannungen begangenen Fehler darin bestehen könnte, dass die Dehnungen beim Gusseisen nicht nur von der Spannung selbst, sondern auch vom Spannungsgefäll abhängen, wie dies schon von Barlow vor einem halben Jahrhundert, wenn auch in weniger bestimmter Form, behauptet worden war, habe ich schon vorher erwähnt. Ich halte es für sehr wünschenswerth, diese Frage möglichst zuverlässig und bestimmt zu entscheiden, da von ihrer Beantwortung die Theorie der Biegefestigkeit des Gusseisens vollständig abhängt. Jedenfalls werde ich in dieser Absicht noch weitere Versuche anstellen. Zu einigen davon habe ich schon einen Plan aufgestellt, von dem ich mir gute Aufschlüsse verspreche. Vielleicht ist es mir daher möglich, späterhin über die Lösung der Frage zu berichten; einstweilen enthalte ich mich aber jeder Vermuthung darüber, wie sie zu beantworten sei.

§ 3.

Druckfestigkeitsversuche an Würfeln.

Diese Versuche schliessen sich an die im vorigen Hefte mitgetheilten Druckfestigkeitsversuche mit Steinen bei geschmierten Druckflächen an. Da sich das Gusseisen in vielen Hinsichten ähnlich verhält wie Stein, lag es nämlich nahe, zu prüfen, ob auch beim Gusseisen durch Schmieren der Druckflächen eine so beträchtliche Herabminderung der Bruchlast beim Druckversuche herbeigeführt werden könne, wie sie dort gefunden worden war. In der That zeigte sich nun zwar, dass auch die Druckfestigkeit des Gusseisens durch Schmieren der Druckflächen vermindert werden kann, aber doch längst nicht in dem gleichen Masse wie bei den steinartigen Massen. Dies mag vielleicht zum Theile daran liegen, dass das Gusseisen immerhin viel bildsamer, also weniger spröde ist als Stein (vgl. hierzu die Ausführungen in § 1).

Aber auch noch andere Umstände kommen hierbei in Betracht. Die Druckfestigkeit des Gusseisens ist nämlich an sich schon viel höher als selbst die des härtesten

Basalts oder Granits. Daher ist es viel schwieriger, eine Schmiere ausfindig zu machen, die auch bei den hohen Lasten, die dabei in's Spiel kommen, noch nicht völlig aus den Druckflächen herausgepresst wird. In der That ist mir dies auch keineswegs nach Wunsch gelungen. Während die Bruchlasten auf mehr als 25 t hinaufstiegen, fing bei einer Schmierung mit Stearin oder Wachs, die sich bei den Steinwürfeln gut bewährt hatte, das Austreten der Schmiere an den Rändern schon bei einer Last von 2 t an und wenn auch nach Beendigung des Versuchs noch geringe Ueberreste des Schmiermittels auf den Druckflächen zu erkennen waren, so ist es doch sehr fraglich, ob diese ausreichend waren, eine zusammenhängende trennende Schicht zwischen Druckplatte und Würfel zu bilden oder ob nicht vielmehr an vielen einzelnen Stellen eine unmittelbare Berührung zwischen Würfel und Druckplatte zu Stande gekommen war.

Ferner waren die Gusseisenwürfel viel kleiner (21 mm

Kantenlänge) als die früher untersuchten Steinwürfel und schon hierdurch war das seitliche Ausfliessen des Schmiermittels wesentlich erleichtert. Ausserdem ist aber auch noch wohl zu beachten, dass der Elasticitätsmodul des Gusseisens viel grösser ist als bei den Steinen, und zwar so, dass er schon mit dem Elasticitätsmodul der Stahlplatten, zwischen denen die Würfel gedrückt wurden, vergleichbar wird, namentlich wenn man berücksichtigt, dass die Poisson'sche Verhältnissziffer $\frac{1}{m}$ für Gusseisen viel kleiner ist als für Stahl. Die Stahlplatten, die denselben Druck auszuhalten haben wie die Gusseisenwürfel, erfahren nämlich durch die Belastung ebenfalls eine Formänderung, die eine Querdehnung in sich schliesst. Es ist nun klar, dass eine Schmierung überhaupt ganz wirkungslos und gleichgültig für den Erfolg werden müsste, wenn sich die Stahlplatten in der Druckfläche schon bei dem Versuche mit ungeschmierten Druckflächen um genau ebensoviel der Quere nach dehnten als die Gusseisenwürfel. Nun ist zwar der Elasticitätsmodul des Stahls bei den hier in Frage kommenden Lasten mindestens doppelt so hoch zu veranschlagen als der des Gusseisens. Dafür ist aber die Verhältnissziffer $\frac{1}{m}$ bei Gusseisen viel niedriger (vgl. hierzu § 2) als bei Stahl. Wäre sie nur halb so gross als bei Stahl, was freilich nicht ganz zutrifft, so käme die Querdehnung der Stahlplatten der der Gusseisenwürfel schon ziemlich nahe. Ganz würde sie ihr auch unter diesen Umständen nicht gleich werden wegen des Einflusses der über die Druckflächen hinausragenden Theile der Stahlplatte, die sich einer solchen Querdehnung widersetzen.

Immerhin glaube ich in diesen Verhältnissen den Hauptgrund dafür erblicken zu dürfen, dass die Schmierung der Druckflächen beim Druckversuche mit Gusseisen die Bruchlast in weit geringerem Masse herabsetzt, als bei den Steinen. Unter der Voraussetzung, dass diese Deutung richtig ist, würde daraus folgen, dass man beim Gusseisen mit einem gewöhnlichen Druckversuche mit ungeschmierten Druckflächen der wahren Druckfestigkeit schon viel näher kommt, als bei Steinen.

Die Würfel hatten 21 mm Kantenlänge und waren alle aus demselben Gusseisenstück entnommen, das einem grösseren Wasserleitungsrohre entstammte, aber einem anderen als jenem, das die Ringe geliefert hatte, über deren Prüfung in § 1 berichtet worden ist. Alle Würfel waren auf den Druckflächen fein abgeschlichtet, zwei von jenen, die mit Wachsschmierung geprüft wurden, hatten gut auspolierte und blank geschliffene Druckflächen. Da dies aber keinen Unterschied in den Festigkeitsziffern

machte, wurde bei allen übrigen Würfeln von dieser zeitraubenden Zurichtung abgesehen.

Zwei Würfel, die mit ungeschmierten Druckflächen in der gewöhnlichen Weise zerdrückt wurden, ergaben Bruchlasten von

27,3 t und 26,8 t,

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

6130 atm.

Hierzu mag noch bemerkt werden, dass schon aus einigen Vorversuchen, die ähnliche Ziffern geliefert hatten, bekannt war, dass die Druckfestigkeit vom einen Würfel zum andern nur wenig schwankte, so dass eine grössere Zahl von Versuchen unter den gleichen Bedingungen entbehrlich erschien.

Für zwei mit Stearin geschmierte Würfel erhielt man Bruchlasten von

25,95 t und 25,6 t,

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

5840 atm.

und endlich für fünf mit Wachs geschmierte Würfel, von denen die beiden letzten polierte und blank geschliffene Druckflächen hatten,

25,3 ; 25,3 ; 25,3 ; 25,8 ; 25,45 t,

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

5770 atm.

Hiernach ist in der That ein geringer Einfluss der Schmierung der Druckflächen erkennbar, wenn er auch längst nicht an jenen heranreicht, der sich bei den Versuchen mit Steinen herausgestellt hatte.

Da die Vermuthung nicht abzuweisen war, der geringe Einfluss der Schmierung rühre davon her, dass diese bei höheren Lasten durch seitliche Verdrängung der Schmierschicht unwirksam werde, und da sich ein härteres Schmiermittel von im Uebrigen ähnlichen Eigenschaften wie Stearin oder Wachs nicht auffinden liess, schritt ich zu einem Ersatze der Schmierschicht durch Beilagen aus weichen Metallen. Diese Versuchsanordnung ist freilich auch früher schon angewendet worden; es schien aber nützlich, sie hier von Neuem mit Würfeln, die vollständig den vorher geprüften glichen, zur Durchführung zu bringen.

Als Beilageplatten wurden verwendet solche aus Blei, Zink, Zinn, solche aus Legirungen von Blei und Zinn, von denen sich die aus 1 Blei : 3 Zinn am härtesten und wirksamsten erwies und solche aus Kupfer. Die Beilageplatten hatten gewöhnlich eine Dicke von 1 mm und quadratische Seitenflächen von 21 mm, so dass sie gerade

mit dem Probewürfel abschnitten. Nur die Plättchen aus Kupfer waren etwas dünner, nämlich 0,75 mm dick.

Ich beginne zunächst mit der Wiedergabe der mit Beilageplatten aus Blei und Zinn und deren Legirungen durchgeführten Versuche, weil diese am zahlreichsten sind.

Mit Bleiplatten wurden zwei Versuche ausgeführt. Das Fliessen der Beilagen trat bereits bei 2,7 t ein und die Bruchlasten betragen

24,0 t und 24,1 t,

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

5450 atm.

Die Versuche mit Bleibeilagen schliessen sich daher, wie man sieht, ganz eng an die Versuche mit Stearin- und Wachsschmierung an. Die etwas verminderte Festigkeit hängt wohl damit zusammen, dass das Fliessen erst etwas später (bei 2,7 t gegenüber 2,0 t) eintrat. Uebrigens war auch das Blei nach Beendigung des Druckversuchs fast vollständig aus der Druckfuge verdrängt.

Bei den Zinnplatten trat das Fliessen in zwei Versuchen bei Lasten von 4,8 und 5,2 t, im Mittel also bei 5 t ein. Hier und bei den folgenden Versuchen erfolgte die Zerstörung des Würfels nicht plötzlich, wie bei gewöhnlichen Druckversuchen mit ungeschmierten Druckflächen, sondern es entstand zuerst ein Riss, der in der Mitte einer Seitenfläche, parallel zur Druckrichtung verlaufend, sichtbar wurde, worauf die Last noch erheblich gesteigert werden konnte, bis die vollständige Zerkümmerung eintrat. Die ersten Risse wurden im vorliegenden Falle bei

18,0 t und 19,5 t

beobachtet, während die grösste erreichte Bruchlast

23,2 t und 23,5 t

betrug, wonach sich die in gewöhnlicher Weise durch Division mit der Querschnittsfläche berechnete Druckfestigkeit im Mittel auf

5290 atm.

stellt.

Die Legirungen aus Blei und Zinn sind härter als jeder der beiden Bestandtheile, was im Hinblick auf viele andere Erfahrungen mit Metallegirungen kaum überraschen kann.

Bei zwei mit Platten aus 1 Blei : 1 Zinn versehenen Würfeln trat das Fliessen der Beilagen bei

6,0 t und 6,8 t

ein. Die ersten Risse wurden beobachtet bei

20,5 t und 18,5 t

und die Bruchlast betrug

23,4 t und 22,0 t

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

5140 atm.

Dabei erwähne ich noch, dass sich die zuerst angegebenen Ziffern jedesmal auf denselben Würfel beziehen; auch in der Folge gehören die an gleichen Stellen angegebenen Zahlen zusammen.

Platten aus 1 Blei : 2 Zinn begannen zu fließen bei

9,1 t ; 9,2 t ; 8,0 t ; 7,8 t.

Hier sind nämlich 4 Versuche der gleichen Art an- gestellt worden. Die ersten Risse entstanden bei

16,0 t ; 16,0 t ; 17,0 t ; 17,0 t

und die Bruchlasten stellten sich auf

22,05 t ; 18,9 t ; 22,3 t ; 22,5 t,

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

4860 atm.

Platten aus 1 Blei : 3 Zinn begannen zu fließen bei

10,5 t ; 10,5 t ; 8,8 t ; 9,0 t.

Die ersten Risse entstanden in den Würfeln bei

16,4 t ; 15,8 t ; 15,8 t ; 16,5 t

und die Bruchlasten betragen

21,1 t ; 19,05 t ; 18,8 t ; 21,7 t

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

4570 atm.

Platten aus 1 Blei : 4 Zinn endlich begannen zu fließen bei

9,8 t und 9,5 t.

Die ersten Risse wurden beobachtet bei

18,8 t und 16,0 t

und die Bruchlasten stellten sich auf

21,3 t und 20,25 t

entsprechend einer Druckfestigkeit von im Mittel

4720 atm.

Bei weiterer Verstärkung des Zinngehaltes der Platten würde sich die Bruchlast voraussichtlich weiter gehoben haben, um für reines Zinn wieder den schon vorher angegebenen Werth von 5290 atm. zu erreichen.

Bei allen vorher gehenden Versuchen lag der Beginn des Fliessens der Beilagen erheblich unter der Bruchlast und dementsprechend war bei Beendigung des Versuchs

ein grosser Theil der Beilagen seitlich verdrängt. Bei den jetzt noch kommenden Versuchen mit Zink- und mit Kupferbeilagen trat dagegen das Fliessen erst bei Annäherung an die Bruchlast ein und der grössere Theil des Beilagematerials blieb noch bis zur Beendigung des Versuchs in der Druckfuge zurück.

Eine Zinkplatte begann zu fliessen bei 17,5 t; der erste Riss trat im Würfel bei 21,0 t und der Bruch bei 22,8 t ein. Bei einem zweiten Versuche ist nur die Bruchlast beobachtet worden; sie stellte sich auf 21,0 t. Die Druckfestigkeit ist daher unter diesen Versuchsbedingungen im Mittel gleich

4960 atm.

zu setzen.

Eine Kupferplatte von, wie bereits erwähnt, nur 0,75 mm Dicke begann zu fliessen bei 18,0 t; der erste Riss trat bei 22,5 t und der Bruch bei 23,8 t ein. Bei zwei weiteren Versuchen, bei denen auf das Fliessen und das Eintreten der Risse nicht geachtet worden ist, waren die Bruchlasten gleich 24,8 t und 23,8 t. Die Druckfestigkeit stellt sich daher im Mittel auf

5460 atm.

Was nun die Schlussfolgerungen betrifft, die aus diesen Versuchen gezogen werden können, so glaube ich, dass die wahre Druckfestigkeit des Gusseisens (in dem Sinne, wie ich diese Bezeichnung schon im 27. Heft gebraucht und näher erklärt habe) höher ist, als die bei den Versuchen mit den Metallbeilagen erhaltenen Werthe. Wie ich nämlich schon bei einer früheren Gelegenheit auseinandergesetzt habe, tritt beim Fliessen einer Beilageschicht eine Reibung an dem Probewürfel ein, die von innen nach aussen, also entgegengesetzt gerichtet ist, wie beim Druckversuche ohne Beilagen und mit ungeschmierten Druckflächen und die daher im Gegensatze zu dieser auf eine Verminderung der Druckfestigkeit gegen-

über ihrem wahren und normalen Werthe hinwirkt. Dazu kommt die durch das Fliessen der Beilageschicht herbeigeführte Ungleichförmigkeit der Druckvertheilung, indem der Druck in der Mitte grösser wird, als an den Rändern, an denen die Beilageschicht entweichen kann.

Etwas niedriger als bei einem gewöhnlichen Druckversuche mit ungeschmierten Druckflächen wird zwar die wahre Druckfestigkeit auch beim Gusseisen sein. Für das Wahrscheinlichste halte ich es, dass sie zwischen den Werthen liegt, die bei Wachsschmierung und bei Bleibeilagen gefunden wurden. Dass die Bleibeilagen schon einen etwas zu niedrigen Werth liefern dürften, schliesse ich besonders daraus, dass die Kupferbeilagen ungefähr denselben Werth ergeben haben. Beim Kupfer, das nach Beendigung des Versuchs noch zum grössten Theile in der Druckfuge geblieben und bis zuletzt im Fliessen begriffen war, kann man aber kaum im Zweifel sein, dass es die Druckfestigkeit zu niedrig liefert.

Zugleich zeigen übrigens die hier mitgetheilten Versuchsergebnisse, dass der Einfluss der vorher angeführten Umstände, die bei Verwendung einer Schmierschicht oder einer ähnlichen Beilageschicht auf eine Herabminderung der Bruchlast hinwirken, immerhin in mässigen Grenzen bleibt. Wenn man nun bedenkt, wie stark bei Steinen die Bruchlast durch eine Schmierschicht herabgesetzt wird und beachtet, dass die besonderen Wirkungen der Schmierschicht in beiden Fällen ungefähr dieselben sind, muss man schliessen, dass es nicht diese Wirkungen sein können, denen jene Herabminderung der Druckfestigkeit bei den Steinen in erster Linie zugeschrieben werden könnte, sondern dass bei den Steinen im Gegensatze zum Gusseisen die wahre Druckfestigkeit thatsächlich viel niedriger ist, als die durch den gewöhnlichen Druckversuch ermittelte. Wie sich der Unterschied im Verhalten beider Materialien erklären lässt, habe ich schon im Eingange des Paragraphen erörtert.

§ 4.

Bleibende Dehnungen des Gusseisens beim Zugversuche.

Die Zähigkeit eines dehnbaren Metalls wird gewöhnlich nach der bleibenden Dehnung beim Zugversuche beurtheilt. Bringt man auch bei einem Gusseisenstabe vor dem Zugversuche in bestimmten Abständen Marken an, um die Vergrösserung der Abstände nach dem Bruche des Stabes an den unverseht gebliebenen Bruchstücken zu ermitteln, so findet man mit den gewöhnlich angewendeten Hilfsmitteln überhaupt keine Abstandsänderung, d. h. die bleibende Dehnung ist innerhalb der bei anderen Metallen als ausreichend zu betrachtenden Genauigkeitsgrenze gleich Null zu setzen.

Dass die bleibende Dehnung nach dem Bruche sehr klein sein muss, lässt sich auch schon nach dem Ergebnisse der Feinmessungen mit Spiegelgeräthen erwarten, denn wenn man den Versuch damit auch bis kurz vor Eintritt des Bruches durchführt, findet man doch immer nur verhältnissmässig kleine Dehnungen. Nun könnte es freilich sein, dass erst bei Erreichung des Bruches etwas grössere Dehnungen zu Stande kämen, die man mit einer Spiegelmessung nicht feststellen kann. Am nächsten liegt diese Möglichkeit in der unmittelbaren Nachbarschaft der Bruchstelle selbst. Nach dem Bruche vermag man jedoch

die Bruchstücke nicht mehr so zusammenzufügen, dass sie genau aufeinanderpassen. Daher ist die Messung einer Strecke, die von einer Marke des einen Bruchstücks über die Bruchfläche hinaus zu einer Marke des anderen Bruchstücks reicht, mit einer Unsicherheit behaftet, die gross genug ist, um die eingetretene Bruchdehnung zu verdecken. Man kann nur sagen, dass die in dieser Art mit den gewöhnlichen Hilfsmitteln ermittelte Bruchdehnung gleich Null zu setzen ist.

Nun schien es mir doch von Nutzen zu sein, die bleibende Dehnung an den Bruchstücken einmal durch einen unmittelbaren Versuch festzustellen. Mit der Durchführung dieser Versuche, die sich ziemlich mühsam gestalteten, beauftragte ich Herrn Ingenieur Jul. Schenk, z. Zt. Assistent für technische Mechanik an unserer Hochschule. Ich werde dessen Bericht im Wortlaute folgen lassen. Vorher bemerke ich noch, dass die hier bestimmten bleibenden Dehnungen erheblich kleiner sind, als die von mir bei den Versuchen mit den Ringen erhaltenen. Vielleicht kommt dies daher, dass bei den Zugversuchen die Belastung stetig gesteigert wurde, bis der Bruch eintrat, während bei den Biegeversuchen die mehrfache Wieder-

holung der Belastung mit dazwischen liegenden Ruhepausen augenscheinlich auf eine Vergrösserung der bleibenden Formänderung hingewirkt hatte.

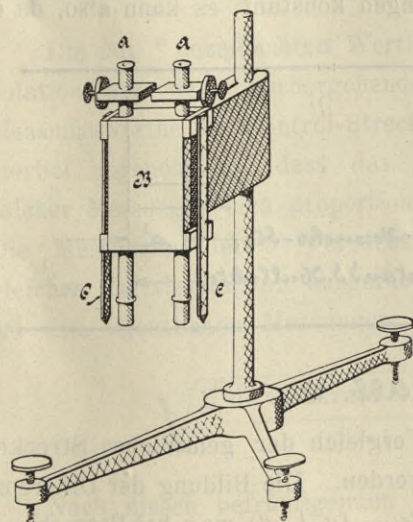
Aus der Zusammenstellung am Schlusse des Berichts geht hervor, dass die bleibende Dehnung bei demselben Gusseisen um so grösser ausfiel, je höher die Bruchbelastung war. Wenn man bedenkt, dass der Bruch in der Regel an einer Stelle eintritt, die durch kleine Gussfehler oder dergleichen etwas geschwächt ist, erklärt sich dies leicht. Denn wenn solche Fehler im einen Falle etwas mehr hervortreten als sonst, tritt der Bruch an der geschwächten Stelle schon ein, ehe noch in den übrigen Theilen des Stabes jene bleibende Formänderung erreicht wurde, deren er an sich fähig gewesen wäre.

Die grösste von Herrn Schenk beobachtete Bruchdehnung von $36,5 \cdot 10^{-5}$ macht in Procenten der ursprünglichen Länge der Messstrecke 0,0365 aus, wie hier noch zum Vergleiche mit der bei den dehnbaren Metallen üblichen Ausdruckweise dieser Eigenschaft bemerkt werden möge. Sie beträgt demnach nur etwa ein Tausendstel der bei weichen Flusseisenstäben oder bei Kupferstäben beobachteten Bruchdehnungen.

Bericht des Herrn Schenk.

Der gewöhnlich bei Messungen von kleinen Dehnungen angewandte Bauschinger'sche Spiegelapparat versagt in diesem Falle und man musste sich nach einem anderen Mittel umsehen, um allenfallsige merkliche Dehnungen des Gusseisens kurz vor dem Bruche feststellen zu können.

Das neugewählte Messverfahren beruht auf dem Vergleiche irgend einer am Versuchsstabe aufgezeichneten Strecke mit einer festen Länge vor und nach dem Zerreißversuche. Der Unterschied der Vergleichsresultate ist dann die gesuchte Dehnung.



In der praktischen Ausführung wurde die unveränderliche Länge und die Vorrichtung zum Vergleiche und zur Messung in einem Instrumente zusammengefasst, das durch die Abbildung 9 zur Anschauung gebracht ist. *A* und *A* sind zwei einander parallele Schraubenmikroskope; dieselben sind durch das Stück *B* unver-

schieblich mit einander verbunden. *B* ist an der lotrechten Stange eines Dreifusses festgeklemmt, der mittelst dreier Stellschrauben auf Glasplatten ruht. Die Grundstrecke, so soll die feste Länge von nun ab heissen, wird in dem Apparate durch den Abstand der Nullpunkte der beiden Schraubenmikroskope dargestellt. Der Vergleich geschieht durch Aufeinanderlegen der Grund- und Versuchsstrecke, indem die Stellschrauben und die Verschieblichkeit auf den Glasplatten es ermöglichen, die Versuchsstrecke in die Bildebene des Objectives bez. in die Lage der Grundstrecke zu bringen. Die Messung der Längenunterschiede erfolgt mittelst der Mikrometerschrauben der Mikroskope.

Die Justirung des Instrumentes besteht, von der der Mikroskope selbst abgesehen, zunächst in der einmaligen Parallelstellung der beiden Messdoppelfäden. Der Umstand, dass das Einstellen eines Mikroskopes bei jeder Wiederholung eine etwas andere Lage des Objectives zum Objekte ergibt, macht die beiden Stangen *C C* nötig; die einmalige Justirung derselben erfolgt, bei scharf eingestelltem Mikroskope, durch Aufsetzen der Stangen auf das Objekt und Festklemmen der ersteren am Instrumente. Bei jeder Messung haben die Spitzen der Stangen das Objekt gerade zu berühren.

Das Verbindungsstück *B* ist aus Ahornholz gefertigt und erfüllt die Forderung, die Mikroskope unverschieblich

mit einander zu verbinden, nicht. Aus diesem Grunde ist noch eine Correctur folgender Art nötig:

Man ermittelt die Zu- oder Abnahme der Grundstrecke während der Messungen durch Vergleich mit einer auf einem vor Längenänderungen geschützten Stabe aufgetragenen Strecke, der Control-Strecke. Die gefundene Längendifferenz ist dann, je nach dem Vorzeichen, bei der Messung der Versuchsstrecken in Rechnung zu ziehen. Natürlich spielt hierbei die Art, wie sich das Holz ändert, und die Zeit eine Rolle; der Kürze halber sei auf den Messungsbericht verwiesen, woraus mit Hülfe der beigeschriebenen Erläuterungen der Correcturgang leicht zu entnehmen ist.

Es muss hier eingeflochten werden, dass durch die Verwendung von Holz der ganze Messapparat in erster Linie einen provisorischen Charakter erhält und dass dadurch auch in die Messung Unsicherheit getragen wird. Die Verwendbarkeit des Instrumentes wird hierdurch nicht beeinflusst, denn es hätte vielleicht die Anwendung von Metall, bestimmt aber die Anbringung einer ständigen praktischen Control-Messvorrichtung dem Uebelstande abgeholfen.

Zum Schlusse ist noch die Herstellung der aus zwei Marken gebildeten Strecken auf dem Versuchsstabe zu erwähnen. Es mag wohl überflüssig erscheinen, darüber zu berichten, doch veranlasst mich der Umstand, dass der Messende die Strecken selbst aufzutragen hat, meine Erfahrungen auf Grund vieler Versuche mitzutheilen. Ich fand zunächst, dass dunkle Striche auf der blanken Metallfläche nicht nur schwer herstellbar sind, sondern dass auch das durch die Fläche reflektirte Licht das Auge schwächt. Deshalb ging ich daran, helle Striche auf dunklem Grunde zu zeichnen. Dies gelang durch Ritzen einer mit dünner Tuschschicht überzogenen, polirten Fläche mit einer sehr feinen Stahlspitze. Die somit erhaltenen Striche konnten nach einiger Uebung vollkommen mit jener ausserordentlichen Feinheit und Schärfe, wie sie das Mikroskop erfordert, hergestellt werden. An Stelle der Tuschschicht kann selbstverständlich auch irgend ein anderer dünner Ueberzug treten, wenn er nur die Oberfläche matt hält, das Eindringen der Stahlspitze ohne deren wesentliche Ab-

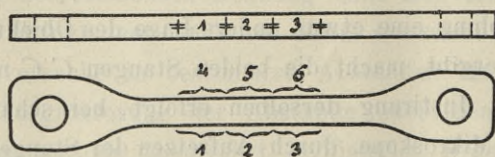


Abb. 10.

nützung gestattet, sich glatt durchreissen lässt und unverwischbar ist. Die Marken hatten die Form \equiv und es ist wichtig, dass bei ihrem Auftragen besonders die

vertikalen Striche zu einander parallel sind. Die Grösse der Versuchsstrecken ist so zu bemessen, dass die Marken bequem in die Messfelder der Mikroskope fallen. Die Verteilung der Strecken auf einem Stabe war wie Abbildung 10 zeigt.

Nach diesen Erläuterungen über den Apparat und die Vorbereitungen kann zum Berichte über die eigentliche Messungsarbeit geschritten werden. Abbildung 11 gibt das beim Blicke in die Mikroskope erhaltene Bild wieder.

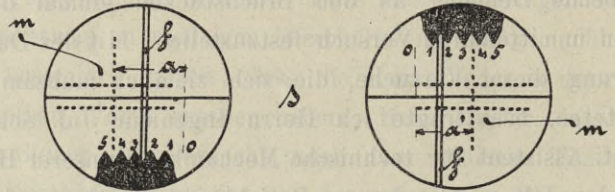


Abb. 11.

s ist der Versuchsstab, was zu demselben gehört, ist der Deutlichkeit halber punktirt. m und m die Marken einer Versuchsstrecke. Die beiden augenfälligen Kreise stellen das Gesichtsfeld der Mikroskope dar. Die Verzahnungen mit den Ziffern von 0 bis 5 repräsentiren die Länge eines halben Millimeters bezw. 5 Umdrehungen der Mikrometerschrauben. 0 und 0 sind die Nullpunkte der Mikroskope. f und f sind die verschieblichen Mess-Doppelfäden; die Fäden senkrecht hierzu dienen zur Bildung eines Fadenkreuzes mit ersteren. a und a' wären in diesem Falle z. B. die Streckenunterschiede; ihre Grössen werden durch die Anzahl der Umdrehungen gemessen, die die Schrauben bei der Bewegung der Doppelfäden von ihren Nullpunkten bis zu den Marken machen. $a + a'$ ist dann ein Mass für diese Strecke auf dem Stabe, die wahre Grösse derselben ist:

Abstand der Nullpunkte — $(a + a')$, das erste Glied ist aber für alle Messungen konstant, es kann also, da es

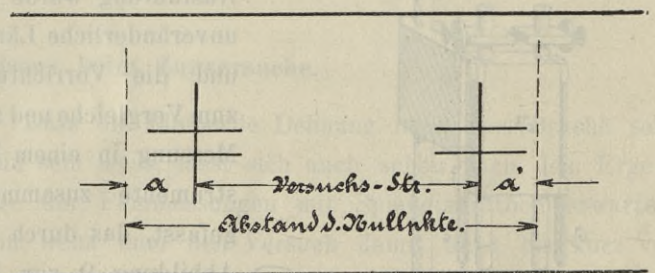


Abb. 12.

sich ja nur um einen Vergleich der gemessenen Strecken handelt, weggelassen werden. Die Bildung der Differenz: Abstand der Nullpunkte — $(a + a')$ mag bei Betrachtung der Abbildung 11 unerklärlich erscheinen, es sei jedoch

daran erinnert, dass Mikroskope verkehrte Bilder liefern und folglich der thatsächliche Messvorgang so ist, wie ihn Figur 12 darstellt.

Um die Genauigkeit der Messung und der Correctur zu prüfen, wurden 18 verschiedene Strecken zweimal gemessen, wobei zwischen der 1. und 2. Messung ein Zeitraum von circa 16 Stunden lag. Die Resultate sind im

I. Messung.

Hier wurden auch die Ablesungen mit aufgenommen, um die Genauigkeit der Einstellung darzulegen.

Folgenden aufgeführt; für die ersten 6 Strecken sind ausser den Differenzen der gefundenen Streckenmasse, die ja bei fehlerloser Messung gleich Null sein müssten, auch die Messungswerte selbst angegeben, um gleich hier den Gang der Correctur ersichtlich machen zu können. Die Masse sind in Millimetern angegeben.

II. Messung.

Vergleich der I. mit der II. Messung.

| Strecke Nr. | Ablesung Mikr. links | Ablesung Mikr. rechts | Mass der Versuchsstr. | Mass der Controlstr. |
|-------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| C. St. | 0,1925 0,1924 | 0,2026 0,2023 | — | 0,3949 |
| 1 | 0,1857 0,1840 | 0,2858 0,2858 | 0,4707 | 0,3931* |
| 2 | 0,2298 0,2285 | 0,2742 0,2756 | 0,5041 | 0,3913* |
| 3 | 0,2180 0,2175 | 0,3705 0,3719 | 0,5889 | 0,3895* |
| C. St. | 0,2141 0,2139 | 0,1742 0,1733 | — | 0,3877 |
| 4 | 0,1978 0,1979 | 0,2140 0,2130 | 0,4114 | 0,3848* |
| 5 | 0,2512 0,2510 | 0,2362 0,2350 | 0,4867 | 0,3819* |
| 6 | 0,1458 0,1458 | 0,4054 0,4041 | 0,5506 | 0,3790* |
| C. St. | 0,2197 0,2170 | 0,1570 0,1589 | — | 0,3763 |

| Mass der Versuchs-Strecke | Mass der Control-Strecke |
|---------------------------|--------------------------|
| — | 0,4065 |
| 0,4843 | 0,4049* |
| 0,5148 | 0,4033* |
| 0,6019 | 0,4017* |
| — | 0,4003 |
| 0,4248 | 0,3982* |
| 0,5007 | 0,3961* |
| 0,5635 | 0,3940* |
| — | 0,3921 |

| Differenz der Versuchs-Strecken | Differenz der Control-Strecken (Correctur) | Corrigirte Differenz der Versuchs-Strecken |
|---------------------------------|--|--|
| — | — | — |
| — 0,0136 | — 0,0118 | — 0,0018 |
| — 0,0107 | — 0,0120 | + 0,0017 |
| — 0,0130 | — 0,0122 | — 0,0008 |
| — | — | — |
| — 0,0134 | — 0,0134 | — 0,0000 |
| — 0,0140 | — 0,0142 | + 0,0002 |
| — 0,0129 | — 0,0150 | + 0,0021 |
| — | — | — |

| Strecke Nr. | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Corrigirte Diff. der Versuchs-Strecken | — 0,0039 | — 0,0011 | — 0,0016 | — 0,0004 | + 0,0036 | — 0,0006 | + 0,0007 | — 0,0018 | — 0,0040 | — 0,0015 | — 0,0002 | + 0,0019 |

Die mit * bezeichneten Werthe wurden durch Interpolation aus dem vorhergehenden und nachfolgenden Messungswerthe der Control-Strecke gefunden. Es wurde hierbei angenommen, dass das Holz innerhalb zweier solcher Messungen sich proportional mit der Zeit ändere. Die Messungen der 3 Versuchsstrecken wurden nach gleichen Zeitabschnitten ausgeführt; dies konnte später bei den eigentlichen Messungen, wegen Schwierigkeiten

mit der Einstellung der Bruchstücke nicht immer eingehalten werden.

Das + Vorzeichen deutet eine Abnahme des Abstandes der Nullpunkte beziehungsweise eine Zunahme (Dehnung) der Versuchsstrecke an.

Nach der Methode der kleinsten Quadrate ergibt sich aus den ermittelten Messungsfehlern ein mittlerer Fehler für eine Messung zu:

$$\sqrt{\frac{\Sigma \text{ d. Quadrate d. Fehler}}{18-1}} = \sqrt{\frac{0,000067}{17}} = \pm 0,00199 \text{ gleich rund } \pm 0,002 \text{ mm}$$

Nach diesen befriedigenden Vorversuchen wurde an die Bestimmung der Dehnungen bei Beanspruchung bis zum Bruche gegangen. Es waren 8 Stäbe mit je 6 Ver-

suchsstrecken zu messen. Die Versuchsstrecken hatten eine Länge von $l = 60$ mm.

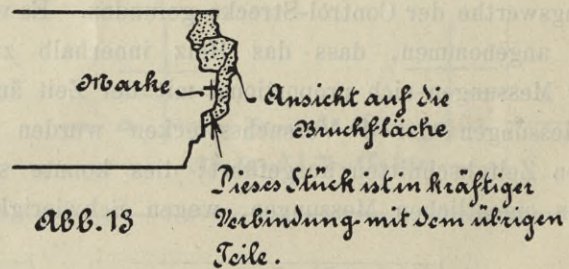
Zusammenstellung der gefundenen Dehnungswerte.

| Strecke Nr. | $\Delta l =$ Dehnung pro 60 mm in $\frac{1}{100}$ mm | $\frac{\Delta l}{l} \cdot 10^{+5}$ | Bemerkungen | Strecke Nr. | $\Delta l =$ Dehnung pro 60 mm in $\frac{1}{100}$ mm | $\frac{\Delta l}{l} \cdot 10^{+5}$ | Bemerkungen |
|-------------|--|------------------------------------|--------------------------------|-------------|--|------------------------------------|--------------------------------|
| Stab I. 1 | — | — | Bruchspannung | II. 1 | 1,37 | 22,9 | Bruchspannung |
| 2 | 1,01 | 16,8 | 1062 atm. | 2 | 1,63 | 27,2 | 1130 atm. |
| 3 | — | — | Mittelwerth der | 3 | — | — | Mittelwerth der |
| 4 | 1,08 | 18,0 | $\Delta l: \frac{0,0290}{3} =$ | 4 | 1,58 | 26,4 | $\Delta l: \frac{0,0667}{4} =$ |
| 5 | 0,81 | 13,5 | $= 0,0097$ mm | 5 | 2,09 | 34,9 | $= 0,0168$ mm |
| 6 | — | — | | 6 | — | — | |
| III. 1 | 0,19 | 3,2 | Bruchspannung | IV. 1 | 1,53 | 25,5 | Bruchspannung |
| 2 | 0,68 | 11,3 | 1260 atm. | 2 | 1,12 | 18,7 | 1110 atm. |
| 3 | 0,23 | 3,8 | Mittelwerth der | 3 | — | — | Mittelwerth der |
| 4 | 3,89 | 64,9 | $\Delta l: \frac{0,1316}{6} =$ | 4 | 1,01 | 16,8 | $\Delta l: \frac{0,0521}{4} =$ |
| 5 | 4,48 | 74,8 | $= 0,0219$ mm | 5 | 1,55 | 25,8 | $= 0,0130$ mm |
| 6 | 3,69 | 61,5 | | 6 | — | — | |
| V. 1 | 1,26 | 21,0 | Bruchspannung | VI. 1 | 1,51 | 25,2 | Bruchspannung |
| 2 | 0,82 | 13,6 | 972 atm. | 2 | 1,60 | 26,7 | 1048 atm. |
| 3 | 0,84 | 14,0 | Mittelwerth der | 3 | — | — | Mittelwerth der |
| 4 | 0,45 | 7,5 | $\Delta l: \frac{0,0475}{6} =$ | 4 | 0,47 | 7,8 | $\Delta l: \frac{0,0620}{4} =$ |
| 5 | 0,45 | 7,5 | $= 0,0079$ mm | 5 | — | — | $= 0,0155$ mm* |
| 6 | 0,93 | 15,5 | | 6 | 2,62* | 43,7 | |
| VII. 1 | 1,18 | 19,7 | Bruchspannung | VIII. 1 | 1,95 | 32,5 | Bruchspannung |
| 2 | 0,50 | 8,4 | 1030 atm. | 2 | — | — | 1136 atm. |
| 3 | — | — | Mittelwerth der | 3 | 1,72 | 28,7 | Mittelwerth der |
| 4 | 0,50 | 8,4 | $\Delta l: \frac{0,0292}{4} =$ | 4 | 1,37 | 22,9 | $\Delta l: \frac{0,0620}{4} =$ |
| 5 | 0,74 | 12,3 | $= 0,0073$ mm | 5 | — | — | $= 0,0155$ mm |
| 6 | — | — | | 6 | 1,16 | 19,4 | |

Sämmtliche Dehnungen haben + Vorzeichen.

Zusammenstellung der mittleren Dehnungswerte nach der Grösse der Bruchspannungen.

| Bruchspann. atm. | Stab Nr. | Mittlere Dehng. in $\frac{1}{100}$ mm | Mittlere Dehnung $\cdot 10^{+5}$ Länge einer Str. |
|------------------|----------|---------------------------------------|---|
| 1260 | III | 2,19 | 36,5 |
| 1136 | VIII | 1,55 | 25,9 |
| 1130 | II | 1,68 | 28,0 |
| 1110 | IV | 1,30 | 21,7 |
| 1062 | I | 0,97 | 16,2 |
| 1048 | VI | 1,55* | 25,9* |
| 1030 | VII | 0,73 | 12,2 |
| 972 | V | 0,79 | 13,2 |



*) Eine Marke dieser Strecke befindet sich nicht ganz 1 mm von der Bruchstelle entfernt, es dürfte dies die Ursache der verhältnissmässig hohen Dehnung sein. Abbildung 13 stellt den Abklatsch der Bruchstelle mit der Marke dar.

§ 5.

Gusseisenstäbe mit Drahteinlagen.

Bei den nach der Monier-Bauweise ausgeführten Cement-Eisenconstructions werden die elastischen Eigenschaften, wie besonders aus den Versuchen von Considère hervorgeht, durch die Drahteinlagen sehr stark beeinflusst. Es lag daher nahe, zu versuchen, wie eine Einlage aus Schweisseisen- oder Flusseisendraht in Gusseisen wirkt. Ich liess daher eine Anzahl Rundstäbe von der gewöhnlichen Form aus derselben Pfanne giessen, von denen die Hälfte eine der Länge nach in der Mitte des Querschnitts verlaufende Einlage in Gestalt eines Eisendrahts von 5,0 mm Stärke erhielt. Die Stäbe wurden von der Guss-haut befreit und auf 20 mm Durchmesser abgedreht und sollten vergleichenden Zugversuchen mit Spiegel-Feinmessungen unterworfen werden, um den Unterschied im elastischen Verhalten und in der Festigkeit zwischen den Stäben mit und ohne Einlage festzustellen.

Leider liessen sich die Versuche nicht nach Wunsch durchführen, wegen der Schwierigkeit, bei Verwendung der Einlagen einen gleichmässigen blasenfreien Guss zu erzielen. Nachdem es einer Giesserei nicht gelungen war, fehlerfreie Probestücke herzustellen, wendete ich mich noch an eine andere Giesserei, aber gleichfalls ohne Erfolg. Ich sah mich daher genöthigt, die Versuche aufzugeben.

Bei allen Probestäben mit Einlagen, bis auf einen, traten grössere Gussblasen schon beim Abdrehen hervor, so dass sie von vornherein verworfen werden mussten. Nur einer war nach dem Abdrehen äusserlich ziemlich einwandfrei; nach dem Bruch zeigten sich aber in der Bruchfläche ebenfalls zwei grössere Hohlräume, so dass auch mit dem Ergebnisse dieses Versuches, wenigstens so weit dabei die Festigkeit in Frage kommt, nicht viel anzufangen ist.

Auf das elastische Verhalten, wenigstens bei den niedrigeren Lasten, dürften indessen die Gussfehler von geringerem Einflusse geblieben sein. Da, so viel mir bekannt ist, Versuche von dieser Art bisher noch nicht veröffentlicht wurden, will ich daher nicht unterlassen, das Wenige, was ich fand, an dieser Stelle mitzutheilen.

Die Versuche wurden in der gewöhnlichen Weise mit dem Bauschinger'schen Spiegel-Apparate durchgeführt; andere Lasten als die in den nachstehenden Tabellen angegebenen hatten die Stäbe vorher nicht aufzunehmen gehabt. Für den Stab ohne Einlage und den mit Einlage wurden die Versuche in genau übereinstimmender Weise durchgeführt.

a) Gusseisenstab ohne Drahteinlage von 20,1 mm Durchmesser
Messlänge = 150 mm

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|
| Last in t | 0,5 | 0 | 1,0 | 0 | 1,5 | 0 | 2,0 | 0 | 2,5 | 0 | 3,0 | 0 | 3,0 |
| Verlängerung Δl in $\frac{1}{10000}$ mm | 21,7 | 0,0 | 47,1 | 1,8 | 75,2 | 4,9 | 106,6 | 8,9 | 142,2 | 14,9 | 182,6 | 22,1 | 183,5 |

(Fortsetzung der Tabelle.)

| | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Last in t | 0 | 3,0 | 0 | 3,0 | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 0 |
| Verlängerung Δl in $\frac{1}{1000}$ mm | 24,0 | 184,6 | 24,6 | 185,0 | 25,2 | 47,7 | 72,3 | 98,6 | 126,6 | 154,9 | 184,8 | 25,8 |

Hierbei ist die Längenänderung Δl stets auf die ursprüngliche Länge der Messstrecke bezogen. Setzt man die rein elastische Dehnung der Messstrecke für eine Belastung von 3 t, entsprechend einer specifischen Spannung von 946 atm., im Mittel gleich $160 \cdot 10^{-3}$ mm, so berechnet sich der Elasticitätsmodul zwischen den Spannungen 0 und 946 atm. zu

$$887000 \text{ atm.};$$

er war also verhältnissmässig sehr niedrig. Indessen kommen bei den Versuchen von Bauschinger mit Gusseisen nicht selten ähnlich niedrige oder auch noch niedri-

gere Werthe für den Elasticitätsmodul bei der gleichen Belastungshöhe vor.

Nachdem die in der Tabelle wiedergegebene Versuchsreihe beendet war, wurde das Spiegelgeräth abgenommen und der Stab von Neuem belastet, bis er zerbrach. Der Bruch erfolgte innerhalb der Messstrecke. Die Bruchfläche war gesund bis auf ein kleines Spritzkugelchen in der Nähe des Umfangs. Die Bruchlast betrug 5,82 t, entsprechend einer Zugfestigkeit von 1830 atm.

Für den Stab mit Drahteinlage erhielt man die folgenden Ziffern:

b) Gusseisenstab mit Drahteinlage von 20,0 mm Durchmesser

Messlänge = 150 mm

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|
| Last in t | 0,5 | 0 | 1,0 | 0 | 1,5 | 0 | 2,0 | 0 | 2,5 | 0 | 3,0 | 0 | 3,0 |
| Verlängerung Δl in $\frac{1}{1000}$ mm | 22,1 | 1,4 | 46,4 | 2,6 | 73,0 | 4,8 | 101,9 | 7,9 | 132,8 | 11,2 | 172,0 | 19,9 | 172,6 |

(Fortsetzung der Tabelle.)

| | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Last in t | 0 | 3,0 | 0 | 3,0 | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 0 |
| Verlängerung Δl in $\frac{1}{1000}$ mm | 20,9 | 173,1 | 21,4 | 173,3 | 22,1 | 43,9 | 67,8 | 92,8 | 118,7 | 145,3 | 173,2 | 22,1 |

Wie man sieht, war, abgesehen von der ersten Last, bei der vielleicht ein Versuchsfehler mitgespielt hat, die Dehnung geringer als bei dem Draht ohne Einlage, ob schon der Durchmesser um 0,1 mm kleiner war. Dies war nicht anders zu erwarten. Berechnet man den Elasticitätsmodul für den zusammengesetzten Stab so, als wenn er aus einheitlichem Stoffe bestanden hätte, so erhält man für den Belastungszuwachs von 0 auf 3 t oder 955 atm.

947 000 atm.

Der Unterschied gegenüber dem vorigen Werthe von 887 000 atm. ist übrigens grösser als man von einer Einlage, die nur $\frac{1}{16}$ der Querschnittsfläche ausmachte, hätte erwarten sollen. Da es sich hier nur um zwei einzelne Zahlen handelt, könnten aber auch Zufälligkeiten mitgespielt haben, so dass auf den Vergleich nicht viel Werth zu legen ist.

Die Bruchbelastung stellte sich auf 5,0 t, war also geringer als bei dem Stab ohne Drahteinlage. Da sich aber in der Bruchfläche zwei grössere Hohlräume zeigten, lässt sich daraus kein Schluss auf den Einfluss der Einlage ziehen.

Meine Hauptabsicht bei diesen Versuchen ging eigentlich darauf hinaus, die Bruchdehnungen des Stabes mit Einlage und des Stabes ohne Einlage mit einander zu vergleichen, da es nicht ausgeschlossen erschien, dass die Einlage, ähnlich wie bei den Cement-Eisen-Constructionen, eine erhebliche Vergrösserung der Bruchdehnung herbeiführen könnte. Durch den grossen Gussfehler und den dadurch herbeigeführten vorzeitigen Bruch des Stabes wurde aber diese Absicht vereitelt. Mit den gewöhnlichen Hilfsmitteln (genauere Messungen sollten erst bei den späteren Versuchen folgen) liess sich auch an den Bruchstücken des Stabes mit Einlage keine messbare Bruchdehnung erkennen.

II.

Ueber die Abhängigkeit der Härteziffer von der Grösse der Druckfläche und dem Krümmungshalbmesser.

Im 25. Hefte dieser „Mittheilungen“ ist über die von Herrn Ingenieur Schwerd in meinem Laboratorium ausgeführten Härteversuche ausführlich berichtet. Das dabei angewandte Prüfungsverfahren stimmte im Wesentlichen mit der schon früher von Herrn Professor Auerbach in Jena angegebenen Untersuchungsmethode überein und hat sich seitdem für die praktische Anwendung bei den laufenden Prüfungsarbeiten des Laboratoriums stets gut bewährt. Wenn man cylindrische Probestücke aus Metallen von dem als Normalradius für diese Versuche aufgestellten Krümmungshalbmesser von 20 mm kreuzweise aufeinander drückt und die aufgewendete Druckkraft durch den Inhalt der Druckfläche dividirt, erhält man zwar bei den kleineren Lasten und Druckflächen zuerst etwas kleinere Zahlen, bei Druckflächen von 2 bis 4 mm unterscheiden

sich diese Zahlen oder „Härteziffern“ aber nicht mehr viel von einander, so dass ihre Unterschiede noch ziemlich in die Grenzen der Beobachtungsfehler fallen und der aus ihnen abgeleitete Mittelwerth als Mass für die Härte verwendet werden kann.

So lange man mit cylindrischen Probekörpern vom Normalradius arbeiten kann, liegt daher kein Grund vor, von dem durch Herrn Schwerd beschriebenen Prüfungsverfahren abzuweichen. Dagegen reichen die bisher durchgeführten Untersuchungen noch nicht aus, einen zuverlässigen Vergleich zwischen den mit Probekörpern von anderen Krümmungsverhältnissen erhaltenen Härteziffern und den mit „Normalkörpern“ (wie die Cylinder von 20 mm Halbmesser kurz heissen mögen) erhaltenen zu ermöglichen. Einige Versuche, die in dieser Absicht angestellt wurden,

lagen zwar schon früher vor. Eine eingehendere Versuchsreihe, die ich in jüngster Zeit durch meinen Assistenten, Herrn Ingenieur J. Schenk durchführen liess, zeigte indessen, dass die Verhältnisse doch verwickelter liegen, als es nach den wenig zahlreichen und — soweit dabei die Arbeiten in meinem Laboratorium in Frage kommen — nur mehr beiläufig ausgeführten früheren Versuchen schien.

In einem Vortrage, den Herr Schwerd bei dem Material-Prüfungs-Congress in Stockholm gehalten hat und der in der Zeitschrift „Baumaterialienkunde“ II. Jahrgang 1897/98, S. 327 abgedruckt ist, wird nämlich auch kurz über einige Versuche berichtet, die in der Absicht unternommen wurden, den Einfluss des Krümmungshalbmessers — unter Festhaltung der cylindrischen Gestalt der Probekörper — auf die Härteziffer festzustellen. Herr Schwerd fand, wie schon früher Herr Auerbach, dass die aus dem Versuch ermittelte Härteziffer wächst, wenn der Krümmungshalbmesser abnimmt und zwar ungefähr im umgekehrten Verhältniss der dritten Wurzeln aus den Krümmungshalbmessern.

Ein ganz vereinzelter Versuch, den ich selbst im Dezember 1897 mit Kugeln von verschiedenen Halbmessern anstellte und den ich gelegentlich eines Aufsatzes über die Härte von Gussstahlkugeln in der „Baumaterialienkunde“, II, 1897/98, S. 177, freilich ohne Mittheilung genauerer Angaben erwähnte, schien dieses Ergebnis zu bestätigen. Ich werde darauf nachher zurückkommen.

Späterhin hat Herr Professor Auerbach seine Härteversuche, die sich anfänglich nur auf verschiedene Minerale, Glas u. s. f. erstreckt hatten, auch auf Metalle ausgedehnt, worüber er in Drudes Annalen der Physik, Bd. 3, 1900, S. 108 berichtet hat. Er fand dabei wiederum eine Abhängigkeit der Härteziffer vom Krümmungshalbmesser bestätigt, indem er (S. 111) sagt: „schliesslich muss, wie sich auch hier zeigt, noch mit der Kubikwurzel aus dem Linsenradius ρ multipliziert werden, um für verschiedene ρ annähernd gleiche Zahlen zu erhalten“.

Neuerdings endlich hat Herr Ingenieur A. Schwinning Versuche über die zulässige Belastung von Kugeln und Kugellagern in der Zeitschrift des Ver. D. Ing. 1901, S. 332, veröffentlicht, bei denen er im Gegensatz zu den Ergebnissen der Herren Schwerd und Auerbach und auch zu meinen früheren Angaben zu dem Schlusse gelangte, dass ein wesentlicher Einfluss der Krümmung auf die Härteziffer nicht vorzuliegen scheine. Herr Schwinning schreibt nämlich in seiner Abhandlung (S. 334):

„Ob auch für Metalle die Krümmung der Oberfläche von Einfluss ist, darüber fehlen zur Zeit eingehende Untersuchungen. Föppl, der das Auerbach'sche Härteprüfungsverfahren für die Untersuchung undurchsichtiger Körper umgestaltet hat und als Versuchskörper im Allgemeinen Cylinder benützt, hat darüber einige Versuche angestellt.*) Er rechnet darnach für Stahlkugeln die Pressung p_{max} (d. h. die Härteziffer) nach der Auerbach'schen Formel um, doch ist dies nach unseren Versuchen, die sowohl mit Cylindern als mit Kugeln angestellt wurden, nicht zulässig“.

Späterhin heisst es:

„Für aus der gleichen Stange geschnittene und gleichzeitig ausgeglühte Messing-Cylinder folgte für die Cylinder-Durchmesser

$$\begin{array}{cccc} D = & 20 & 15 & 10 & 5 \text{ mm} \\ p_{max} = & 46,6 & 50,1 & 47,7 & 48,0 \text{ kg/qmm} \end{array}$$

Eine zweite Versuchsreihe mit Cylindern aus sehr reinem Kupfer liefert für

$$\begin{array}{cccc} D = & 15,1 & 8,9 & 5,0 & 3,1 \text{ mm} \\ p_{max} = & 29,5 & 28,7 & 28,9 & (28,7) \text{ kg/qmm} \end{array}$$

Ein solcher Widerspruch zwischen den Ergebnissen der Versuche von Schwinning einerseits, dem man als Mitarbeiter der „Centralstelle für wissenschaftlich-technische Untersuchungen in Neubabelsberg“, die über das Verhalten von Gussstahlkugeln sehr eingehende Versuche vornehmen liess, von vornherein ein nicht geringes Mass von Vertrauen zu schenken geneigt sein musste und den Versuchen von Auerbach, Schwerd und mir andererseits, musste sehr überraschen. Durch gewöhnliche Versuchsfehler konnte er offenbar nicht wohl erklärt werden. Der Grund musste vielmehr tiefer liegen. Da Herr Schwinning weitere Angaben, als die vorher wiedergegebenen über die Ergebnisse seiner Versuche mit cylindrischen Probekörpern nicht gemacht hat und die über die kugelförmigen Probekörper noch dürftiger sind, liess sich aus seiner Abhandlung über den Grund der widersprechenden Ergebnisse nichts entnehmen.

Ich entschloss mich daher, die Versuchsreihe mit den Messingcylindern genau so, wie sie Herr Schwinning angestellt hatte, wiederholen zu lassen, um dem Grunde des Widerspruchs auf die Spur zu kommen. Das ist mir, wie es scheint, auch gelungen. Der Grund liegt, wie ich schon jetzt bemerken will, offenbar darin, dass die Härteziffer bei den kleinen Cylinderhalbmessern, um die es sich hier handelt, nicht nur vom Krümmungshalbmesser, sondern

*) Die Auerbach'schen Versuche mit Metallen waren Herrn Schwinning offenbar nicht bekannt; auch die vorher angeführten Versuche von Schwerd sind nicht erwähnt.

auch vom Durchmesser der Druckfläche sehr merklich abhängt. Von einem Werthe p_{max} , der als Mass der Härte verwendet werden könnte, kann daher bei diesen kleinen Cylinderhalbmessern überhaupt nicht die Rede sein. Nicht nur anfänglich, sondern auch noch bei den grösseren Druckflächen, nimmt die Härteziffer bei wachsender Druckfläche stetig zu. Das Ergebniss des Versuchs hängt daher sehr wesentlich davon ab, bis zu welchen Druckflächengrössen man aufsteigt und wie man das Mittel aus den einzelnen Versuchszahlen nimmt. Ich selbst habe mich, wie man nachher sehen wird, bei dem einzigen Versuche, den ich früher mit verschiedenen gekrümmten Oberflächen angestellt hatte, einer gewissen Willkür bei der Bildung des Mittelwerthes schuldig gemacht, weil ich von der Voraussetzung ausging, dass sich die Härteziffer mit wachsender Grösse der Druckfläche einem constanten Werth p_{max} näherte und die beobachteten Unterschiede daher als Versuchsfehler

betrachtete. Auch Herr Schwinning ist von derselben Voraussetzung ausgegangen und ich kann nicht bezweifeln, dass auch aus seinen Versuchsziffern, wenn sie vollständig vorlägen, eine entsprechende Willkür bei der Bildung seiner Mittelwerthe nachgewiesen werden könnte. Damit dürften die abweichenden Ergebnisse hinreichend zu erklären sein.

Im Uebrigen zeigt sich auch hier, dass ein Widerspruch in wissenschaftlichen Dingen den Fortschritt begünstigt. Denn ich denke, dass die Ergebnisse der von Herrn Schenk ausgeführten Versuche einen recht schätzenswerten Beitrag zur Frage der Härteprüfung bilden.

Ich führe zunächst die Ergebnisse des vorher schon erwähnten, von mir selbst im December 1897 angestellten Versuches an und lasse dann die im September und October 1901 von Herrn Schenk durchgeführte grössere Versuchsreihe folgen, die den Hauptgegenstand dieser Mittheilung bildet.

A. Aelterer Versuch mit Kupferkugeln.

Aus einer grösseren Walzkupferstange wurden zunächst zwei Cylinder vom Normaldurchmesser von 40 mm entnommen und in derselben Weise geprüft, wie es in dem Berichte von Schwerd im 25. Hefte beschrieben ist. Man erhielt die nachstehenden Ergebnisse:

| Last in kg | Druckfläch.- Durchmesser in mm | Druckfläch.- Inhalt in qmm | Härteziffer in kg/qmm | Massgebend. Mittelwerth für die Härteziffer |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|
| 100 | 1,70 | 2,27 | 44,0 | } = 50,9 |
| 200 | 2,30 | 4,15 | 48,2 | |
| 300 | 2,80 | 6,16 | 48,7 | |
| 400 | 3,15 | 7,79 | 51,3 | |
| 500 | 3,50 | 9,62 | 52,0 | |
| 600 | 3,85 | 11,64 | 51,5 | |

Zwei Kupferkugeln von 40 und 20 mm Durchmesser, die hierauf aus derselben Stange entnommen wurden, gaben an verschiedenen Stellen schlecht mit einander übereinstimmende Ergebnisse. Im Mittel schien die Härteziffer für die grössere Kugel etwa 69, für die kleinere etwa 57 kg/qmm zu betragen. Die Ergebnisse führten sofort zu dem Schlusse, dass die Walzkupferstange in den äusseren Schichten härter sein müsse als in den inneren. Die ersten Versuche wurden daher verworfen und die Probestücke wurden, in der Erwartung, sie dadurch in einen gleichmässigen Zustand überzuführen, mehrere Stunden lang ausgeglüht mit nachfolgendem langsamen Abkühlen. Hier-

durch scheint der Zweck in der That auch erreicht worden zu sein. Für die beiden vorher geprüften Cylinder erhielt man nach dem Ausglühen (bei sonst genau gleichen Versuchsbedingungen):

| Last in kg | Druckfläch.- Durchmesser in mm | Druckfläch.- Inhalt in qmm | Härteziffer in kg/qmm | Massgebend. Mittelwerth für die Härteziffer |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|
| 50 | 2,50 | 4,91 | 10,2 | } = 11,9 |
| 75 | 3,00 | 7,07 | 10,6 | |
| 100 | 3,30 | 8,55 | 11,6 | |
| 125 | 3,55 | 9,90 | 12,6 | |
| 150 | 3,85 | 11,6 | 12,9 | |
| 200 | 4,50 | 15,9 | 12,6 | |

Durch das Ausglühen war also die Härte ganz bedeutend herabgesetzt worden. Die letzte Ziffer in der vorhergehenden Zusammenstellung wurde bei der Bildung des Mittelwerthes für die Härteziffer verworfen, weil der Druckflächendurchmesser schon etwas zu gross erschien. Ich hatte nämlich früher angegeben, dass man bei den Normalkörpern mit dem Druckflächendurchmesser nicht über 4 mm hinausgehen solle, damit er immer noch als klein gegen den Cylinderdurchmesser betrachtet werden könne.

Für die gleichzeitig ausgeglühten Kugeln erhielt man jetzt an verschiedenen Stellen gut mit einander übereinstimmende Zahlen. Die Ergebnisse waren:

a) Kugeln von 40 mm Durchmesser.

| Last in kg | Druckfläch.- Durchmesser in mm | Druckfläch.- Inhalt in qmm | Härteziffer in kg/qmm | Massgebend. Mittelwerth für die Härteziffer |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|
| 50 | 2,10 | 3,46 | 14,4 | = 18,0 |
| 75 | 2,35 | 4,34 | 17,3 | |
| 100 | 2,75 | 5,94 | 16,8 | |
| 150 | 3,30 | 8,55 | 17,5 | |
| 200 | 3,70 | 10,75 | 18,6 | |
| 250 | 4,10 | 13,20 | 18,9 | |

b) Kugeln von 20 mm Durchmesser.

| Last in kg | Druckfläch.- Durchmesser in mm | Druckfläch.- Inhalt in qmm | Härteziffer in kg/qmm | Massgebend. Mittelwerth für die Härteziffer |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--|
| 50 | 1,85 | 2,69 | 18,6 | = 22,9 |
| 75 | 2,25 | 3,98 | 18,9 | |
| 100 | 2,45 | 4,71 | 21,2 | |
| 125 | 2,65 | 5,51 | 22,7 | |
| 150 | 2,85 | 6,38 | 23,5 | |
| 200 | 3,25 | 8,30 | 24,1 | |

Hierbei ist besonders zu beachten, dass jetzt die kleinere Kugel in Uebereinstimmung mit den Schwerd'schen und Auerbach'schen Angaben die grössere Härteziffer lieferte, während es vor dem Ausglühen — offenbar aus dem schon zuvor erwähnten Grunde der ungleichmässigen Härte an verschiedenen Stellen — umgekehrt war.

Andere Versuche als die soeben mitgetheilten hatte ich in früheren Jahren nicht vorgenommen. Dass sie mich in der Annahme von der Zuverlässigkeit der Schwerd'schen und Auerbach'schen Ergebnisse bestärken mussten, liegt auf der Hand: denn in der That liefert die Division von 22,9 durch $\sqrt[3]{2}$ den Werth 18,2, in sehr guter Uebereinstimmung mit dem für 40 mm Durchmesser durch den Versuch erhaltenen, von 18,0.

Die Versuchszahlen sind auch ohne Zweifel richtig, abgesehen davon, dass die Decimalstellen bei den Härteziffern in Folge der Versuchsfehler beim Ausmessen der Druckflächen ganz unsicher sind, wie auch schon aus dem Vergleiche der verschiedenen Werthe mit einander hervorgeht. Auf das durch Mittelbildung gewonnene Härtemass kann aber diese Fehlerquelle nicht von sehr erheblichem Einflusse gewesen sein; auf mehr als etwa drei Einheiten der Decimalstelle ist er kaum zu veranschlagen.

Wie ich aber vorher schon sagte, macht sich dagegen im Lichte der nachher zu besprechenden neueren Versuche eine Willkür bei der Art bemerklich, wie die Mittelwerthe gewonnen wurden. Man sieht nämlich auch hier schon, dass die Härteziffer bei wachsenden Lasten und Druckflächengrössen, wenn man auch die kleineren Druckflächen

bei der Bildung des Mittelwerthes ausschliesst, nicht so nahezu constant gefunden wurde, wie man nach den früheren Erfahrungen mit den Normalkörpern hätte erwarten sollen. Vielmehr zeigt die Härteziffer namentlich bei den kleineren Kugeln auch bei den höheren Laststufen noch eine deutlich erkennbare weitere Zunahme mit wachsenden Lasten, wenn sie auch durch die Unsicherheit der einzelnen Versuchsziffern etwas verdeckt wird. Bei der vorgenommenen Deutung der Versuchszahlen, wie sie sich in der Bildung des Mittelwerthes ausspricht, wurden die Abweichungen zwischen den einzelnen Zahlen ausschliesslich auf Versuchsfehler geschoben. In Wirklichkeit sind diese aber nicht so gross; vielmehr ist das aus den Tabellen ersichtliche Wachsthum der Härteziffer mit steigenden Lasten auch thatsächlich vorhanden.

Wenn man dies weiss, kann man die vorgenommene Art der Mittelwerthsbildung natürlich nicht gut heissen und damit fällt auch der früher gezogene Schluss, dass die Härteziffern im umgekehrten Verhältnisse der Kubikwurzeln der Kugeldurchmesser zu einander stehen. Unter diesen Umständen bleibt vielmehr zunächst noch ganz zweifelhaft, wie bei den kleinen Krümmungshalbmessern das Mass für die Härte aus den Versuchszahlen zu bilden ist. Da die früher dafür gegebene Festsetzung hier versagt, muss irgend eine neue Vorschrift an ihre Stelle treten, um zu eindeutig bestimmten Werthen zu gelangen. Geschieht dies nicht, sondern tritt an die Stelle einer deutlich ausgesprochenen Vorschrift für die Ableitung des Härtemasses aus den Versuchswerten eine nach Gutdünken gebildete Abschätzung, so sind so erhebliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Experimentatoren, wie wir sie vorher kennen lernten, nicht zu verwundern.

Eine mögliche und nahe liegende Vorschrift wäre z. B. diese, beim Vergleiche der für Körper von verschiedenen Krümmungshalbmessern erhaltenen Versuchswerte immer nur solche einander gegenüber zu stellen, die sich auf Druckflächen beziehen, deren Durchmesser sich wie die Krümmungshalbmesser der Probekörper zu einander verhalten. Nach dieser Vorschrift wären z. B. bei den beiden Kugelpaaren die Druckflächen von 3,70 mm Durchmesser bei den grösseren und von 1,85 mm bei den kleineren Kugeln in Vergleich mit einander zu bringen. Dann würde man aber in der That, in Uebereinstimmung mit der Schwinning'schen Angabe, für beide Kugeldurchmesser dieselbe Härteziffer von 18,6 kg/qmm erhalten. Freilich ist zugleich deutlich genug zu erkennen, dass es sich dann, zumal bei den kleineren Kugeln, keineswegs um einen Werth p_{max} handelte, der dabei in Rechnung gezogen würde.

Immerhin liegt schon auf Grund des bisher hier vorgebrachten sehr dürftigen Versuchsmaterials die Vermuthung nahe genug, dass die Erklärung für die abweichenden Versuchsergebnisse hauptsächlich darin zu erblicken sei, dass ich mich selbst nicht an die soeben besprochene Vorschrift für die Verwerthung der Versuchsziffern gehalten habe, während sie Herr Schwinning möglicher Weise zu Grunde gelegt haben könnte. Zugleich ist klar, dass diese Vorschrift auf jeden Fall den Vorzug vor jeder anderen verdienen würde, wenn sich zeigen sollte, dass man stets zu denselben Härteziffern gelangte, wenn man nur Druckflächen mit einander vergliche, die sich wie die Krümmungshalbmesser zu einander verhalten. Man würde dann in der That zu einem vom Krümmungshalbmesser ganz unabhängigen Härtemasse gelangen können. Indessen wird diese Vermuthung, wie man noch sehen wird, durch die genaueren und eingehenderen Versuche des Herrn Schenk keineswegs bestätigt. Die angeführte genaue Uebereinstimmung der Härteziffer von 18,6 kg/qmm bei den beiden Kugelpaaren für die Druckflächendurchmesser von 3,70 und 1,85 mm ist daher nur als zufällig zu betrachten und durch die ziemlich erhebliche Unsicherheit der einzelnen Versuchszahlen zu erklären.

Der Hauptzweck bei den zuvor beschriebenen Versuchen bestand übrigens darin, die Härteziffern für Probekörper von cylindrischer Gestalt einerseits und von kugelförmiger Gestalt andererseits bei gleichen Durchmessern und unter sonst gleichen Umständen mit einander zu vergleichen. Wenn man von der Voraussetzung ausging, dass das Krümmungsmass der Oberflächen von Einfluss auf die Härteziffer sei, musste man natürlich erwarten, dass die bei gleichem Durchmesser stärker gekrümmte Kugeloberfläche zu einer höheren Härteziffer führen werde als eine cylindrische Gestalt der Probekörper. Dies hat sich, wie aus den mitgetheilten Ergebnissen hervorgeht, auch bestätigt. Die Härteziffer wurde bei gleichem Durchmesser für die kugelförmigen Probekörper im Verhältnisse 18,0 : 11,9 oder rund 3 : 2 grösser gefunden als für die cylindrischen.

Uebrigens fand auch Herr Schwinning, dass für das zuvor angeführte Kupfer die Härte bei kugelförmigen Körpern 39,5 kg/qmm betrug, während er sie bei cylindrischen Körpern zu etwa 29 kg/qmm gefunden hatte. Schon dieser Umstand hätte ihn, wie mir scheint, zu einiger Vorsicht bei seinem Ausspruche veranlassen sollen, dass die Krümmung der Oberflächen ohne Einfluss zu sein scheine. Denn in der That besteht doch der einzige Unterschied zwischen beiden Fällen nur in den verschiedenen Krümmungsverhältnissen der in Berührung mit einander kommenden Oberflächentheile. Freilich will ich

damit keineswegs sagen, dass es als ausgeschlossen zu betrachten sei, dass der Uebergang vom Cylinder zur Kugel einen grossen, dagegen der Uebergang von einem Cylinder zu einem anderen von kleinerem Halbmesser nur einen kleinen, vielleicht selbst gar keinen Einfluss auf das Resultat ausübe. Auffällig und zu einer genaueren Nachprüfung einladend müsste aber ein solcher Befund immerhin erscheinen.

Noch ein anderer Umstand mag hier erwähnt werden. Bei dem von mir untersuchten sorgfältig ausgeglühten Walkkupfer wurde die Härteziffer bei Verwendung von Normalkörpern zu nur 11,9 kg/qmm gefunden, während Herr Schwinning sie bei sehr reinem Kupfer — unabhängig vom Cylinderdurchmesser — gleich etwa 29 kg/qmm erhalten hat. Hiernach wäre zu schliessen, dass Walkkupfer im Handel vorkäme, das im ausgeglühten Zustande viel weicher wäre als ein Kupfer, das „fast nicht mehr nachweisbare Spuren fremder Beimengungen“ enthält. Ich muss gestehen, dass ich es für verfrüht halten würde, diesen Schluss vor weiterer Nachprüfung zu billigen, da doch an und für sich die Annahme viel näher liegen würde, dass die Härte von ausgeglühtem Kupfer um so niedriger ausfallen müsse, je reiner es ist. Mir scheint daher die Vermuthung nicht unwahrscheinlich, dass der Unterschied eher auf ein verschieden wirksames Ausglühen zurückgeführt werden könnte. Wie gross der Einfluss des Ausglühens auf die Härte bei Kupfer ist, geht nämlich aus den zuvor mitgetheilten Versuchsergebnissen deutlich genug hervor. Sollte die ausgesprochene Vermuthung zutreffen, so würde sich damit freilich noch ein weiterer Erklärungsgrund für die übrigen Abweichungen ergeben.

Deshalb soll hier noch näher beschrieben werden, wie mein Werkmeister das Ausglühen vornahm. Ein aus Eisenblech gefertigter Kasten, auf den ein abnehmbarer Deckel passte, wurde mit Holzrasche gefüllt und die zuvor genau bearbeiteten Probekörper wurden in die Holzrasche eingebettet, so dass sie davon allseitig umgeben waren. Dann wurde der Kasten in eine Feldschmiede gebracht, deren Feuer nicht durch das Gebläse, sondern durch einen aus Gänsefedern zusammengebundenen Wedel oder Fächer — ein in den Mechanikerwerkstätten überall wohlbekanntes Geräth — derart angefacht wurde, dass sich ringsum eine gleichmässige Gluth entwickelte. Der Kasten war dabei etwa 10 cm hoch mit Kohlen überdeckt. Das Anfachen der Gluth wurde so lange fortgesetzt, bis der Kasten kirschroth war, worüber etwa eine halbe Stunde Zeit verstrich. Hierauf wurde das Feuer mit einem Blech überdeckt und bis zum nächsten Tage sich selbst überlassen. Einige Stunden hielt sich dabei der Kasten noch in Rothgluth; am anderen Tage hatte er sich dagegen

so weit abgekühlt, dass man ihn eben noch mit der Hand anfassen konnte. Man nahm ihn dann aus der Feldschmiede und liess ihn aussen noch vollends bis zur Zimmertemperatur abkühlen, worauf er geöffnet und die

Probekörper aus ihm entnommen wurden. Mit feinstem Schmirgelpapier wurden die Oberflächen der Probekörper alsdann von der Anlaufschichte befreit und nochmals polirt.

B. Versuche des Herrn Schenk mit Messing-Cylindern.

Um einen unmittelbaren Vergleich mit den Schwing'schen Versuchen zu ermöglichen, wurden diese in derselben Weise, namentlich also mit Cylindern von denselben Durchmessern wiederholt. Die Cylinder stammten alle aus derselben Messingstange, wurden nach der Bearbeitung in der zuvor beschriebenen Weise ausgeglüht und unter Beobachtung der üblichen, schon in dem Schwerd'schen Berichte näher beschriebenen Vorsichtsmassregeln geprüft. Die Druckflächen wurden mit Hilfe des Mikroskops ausgemessen; die Durchmesser sind auf $\frac{1}{20}$ mm genau. Von den in den Tabellen angegebenen Einheiten der Theilung des Okularmikrometers gehen nämlich 17,4 auf 1 mm. Da nun auf einen halben Theilstrich — unter Umständen auch auf viertel — abgelesen werden konnte, ausserdem auch jede der beiden Druckflächen für sich ausgemessen und aus beiden Ablesungen das Mittel genommen wurde, kann der Fehler auch unter den ungünstigsten Umständen $\frac{1}{20}$ mm nicht wohl überschreiten.

Ich lasse zunächst die Tabellen folgen, in denen die

Versuchswerte des Herrn Schenk zusammengestellt sind. Wo Lasten von derselben Grösse mehrmals hinter einander aufgeführt sind, handelt es sich um mehrere Versuche, die sich gegenseitig controliren sollen. Die Abweichungen zwischen den Durchmessern der zugehörigen Druckflächen sind daher nicht ausschliesslich auf Ausmessungsfehler zurückzuführen, sondern sie enthalten zugleich auch alle übrigen Versuchsfehler, namentlich auch den Einfluss von Ungleichmässigkeiten im Material, die eine etwas verschiedene Härte an verschiedenen Stellen bedingen können. Die Lasten sind in kg angegeben. In der folgenden Zeile stehen die Druckflächendurchmesser in Mikrometertheilen, dann kommen die Mittelwerthe der Druckflächendurchmesser in mm und die Druckflächeninhalte in qmm. Eine weitere Zeile gibt die Verhältnisszahl zwischen dem Inhalte der Druckfläche und dem Inhalte der Querschnittsfläche der zu dem Versuche verwendeten Cylinder an, und zuletzt folgt die durch Division der Last durch den Inhalt der Druckfläche ermittelte Härteziffer in kg/qmm.

a. Cylinder mit 5 mm Durchmesser.

| | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lasten | 15 | 30 | 50 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 |
| Durchmesser | 13,5 | 17,5 | 22,0 | 22,38 | 26,0 | 29,5 | 32,5 | 35,0 | 38,0 |
| der Druckfläche | 13,0 | 18,0 | 22,75 | 22,38 | 26,25 | 29,5 | 32,5 | 35,25 | 37,5 |
| Mittlerer Druckflächen-Durchmesser in mm | 0,763 | 1,015 | 1,285 | 1,285 | 1,500 | 1,690 | 1,868 | 2,019 | 2,170 |
| Druckfläche in mm ² | 0,457 | 0,812 | 1,300 | 1,300 | 1,770 | 2,240 | 2,740 | 3,190 | 3,700 |
| Druckfläche : Cylinder-Querschnittfläche | 0,0233 | 0,0413 | 0,0662 | 0,0662 | 0,0900 | 0,1140 | 0,1395 | 0,1625 | 0,1885 |
| Härte in kg/mm ² | 32,8 | 36,9 | 38,5 | 38,5 | 42,3 | 44,6 | 45,7 | 47,1 | 47,4 |

b. Cylinder mit 10 mm Durchmesser.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lasten | 50 | 75 | 100 | 100 | 125 | 150 | 150 | 175 | 175 | 200 | 200 | 225 | 225 | 225 | 250 |
| Durchmesser | 24,5 | 30,0 | 33,0 | 32,0 | 36,0 | 38,5 | 38,5 | 41,0 | 40,0 | 43,5 | 42,5 | 46,0 | 45,0 | 45,0 | 48,0 |
| der Druckfläche | 24,5 | 29,5 | 33,0 | 32,0 | 35,5 | 38,5 | 38,5 | 41,0 | 40,5 | 43,5 | 42,5 | 46,0 | 45,25 | 45,5 | 48,5 |
| Mittl. Druckfläch.-Durchm. i. mm | 1,408 | 1,710 | 1,895 | 1,840 | 2,055 | 2,210 | 2,210 | 2,355 | 2,310 | 2,500 | 2,440 | 2,645 | 2,600 | 2,600 | 2,770 |
| Druckfläche in mm ² | 1,55 | 2,30 | 2,82 | 2,66 | 3,32 | 3,84 | 3,84 | 4,35 | 4,19 | 4,91 | 4,68 | 5,49 | 5,33 | 5,31 | 6,05 |
| Druckfläche : Cyl.-Quersch.-Fl. | 0,0198 | 0,0293 | 0,0359 | 0,0339 | 0,0423 | 0,0489 | 0,0489 | 0,0554 | 0,0534 | 0,0626 | 0,0596 | 0,0700 | 0,0680 | 0,0677 | 0,0770 |
| Härte in kg/mm ² | 32,3 | 32,6 | 35,5 | 37,6 | 37,7 | 39,1 | 39,1 | 40,3 | 41,7 | 40,7 | 42,7 | 41,0 | 42,2 | 42,4 | 42,3 |

(Fortsetzung der Tabelle.)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lasten | 250 | 275 | 275 | 300 | 300 | 325 | 325 | 350 | 400 | 450 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Durchmesser | 47,0 | 49,5 | 49,5 | 51,0 | 52,5 | 53,25 | 53,0 | 54,5 | 58,0 | 62,0 | 61,75 | 64,0 | 66,5 | 69,0 |
| der Druckfläche | 47,0 | 50,0 | 49,0 | 51,0 | 52,0 | 53,5 | 53,0 | 54,5 | 57,75 | 61,5 | 61,75 | 63,75 | 66,0 | 68,5 |
| Mittl. Druckflächen-Durchm. in mm | 2,700 | 2,860 | 2,830 | 2,930 | 3,000 | 3,070 | 3,130 | 3,130 | 3,325 | 3,550 | 3,55 | 3,67 | 3,81 | 3,95 |
| Druckfläche in mm ² | 5,72 | 6,43 | 6,37 | 6,74 | 7,09 | 7,40 | 7,30 | 7,70 | 8,70 | 9,90 | 9,90 | 10,57 | 11,4 | 12,28 |
| Druckfläche : Cyl.-Querschnittfläche | 0,0730 | 0,0820 | 0,0812 | 0,0858 | 0,0903 | 0,0943 | 0,0930 | 0,0980 | 0,1100 | 0,1260 | 0,1260 | 0,1345 | 0,1455 | 0,1560 |
| Härte in kg/mm ² | 43,7 | 42,7 | 43,2 | 44,6 | 42,4 | 44,0 | 44,5 | 45,4 | 46,1 | 45,5 | 45,5 | 47,3 | 48,3 | 49,0 |

c. Cylinder mit 15 mm Durchmesser.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lasten | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 350 | 375 | 400 | 425 | 450 |
| Durchmesser | 33,5 | 38,0 | 40,5 | 43,0 | 45,0 | 47,5 | 50,5 | 49,5 | 51,0 | 53,0 | 54,5 | 58,0 | 58,5 | 59,5 | 61,0 | 62,25 | 64,5 |
| d. Druckfläche | 33,5 | 37,0 | 40,0 | 42,0 | 44,5 | 47,0 | 50,0 | 49,5 | 51,0 | 54,0 | 55,5 | 57,75 | 58,0 | 59,25 | 60,5 | 62,0 | 64,0 |
| Mittl. Druckfl.- Durchm. in mm | 1,925 | 2,155 | 2,310 | 2,440 | 2,570 | 2,715 | 2,890 | 2,845 | 2,930 | 3,075 | 3,160 | 3,320 | 3,350 | 3,410 | 3,490 | 3,570 | 3,690 |
| Druckfl. in mm ² | 2,91 | 3,64 | 4,20 | 4,68 | 5,19 | 5,80 | 6,56 | 6,37 | 6,75 | 7,42 | 7,84 | 8,67 | 8,81 | 9,14 | 9,59 | 10,00 | 10,70 |
| Druckfläche : | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cyl.-Querschn.-Fläche | 0,0165 | 0,0206 | 0,0238 | 0,0265 | 0,0294 | 0,0329 | 0,0371 | 0,0360 | 0,0382 | 0,0420 | 0,0444 | 0,0491 | 0,0499 | 0,0518 | 0,0543 | 0,0567 | 0,0607 |
| Härte i. kg/mm ² | 34,4 | 34,4 | 35,7 | 37,4 | 38,6 | 38,8 | 38,2 | 39,2 | 40,7 | 40,5 | 41,5 | 40,4 | 39,8 | 40,9 | 41,7 | 42,5 | 42,0 |

d. Cylinder mit 20 mm Durchmesser.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lasten | 150 | 175 | 200 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 300 | 350 | 400 | 450 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Durchmesser | 41,0 | 44,0 | 46,0 | 46,0 | 48,0 | 50,0 | 52,5 | 55,0 | 54,5 | 58,5 | 62,0 | 65,5 | 66,0 | 68,0 | 70,5 | 73,5 |
| der Druckfläche | 41,0 | 43,5 | 45,5 | 46,0 | 48,0 | 50,5 | 53,0 | 55,0 | 55,0 | 58,5 | 62,0 | 65,5 | 66,75 | 68,5 | 72,0 | 74,1 |
| Mittlerer Druckflächen- Durchmesser in mm | 2,355 | 2,510 | 2,630 | 2,645 | 2,760 | 2,890 | 3,030 | 3,160 | 3,145 | 3,36 | 3,56 | 3,75 | 3,82 | 3,92 | 4,06 | 4,23 |
| Druckfläche in mm ² | 4,36 | 4,95 | 5,43 | 5,50 | 5,98 | 6,56 | 7,20 | 7,85 | 7,78 | 8,87 | 9,95 | 11,02 | 11,50 | 12,1 | 12,9 | 14,1 |
| Druckfläche : Cylinder- Querschnittfläche | 0,0139 | 0,0158 | 0,0173 | 0,0175 | 0,0190 | 0,0208 | 0,0229 | 0,0250 | 0,0248 | 0,0283 | 0,0317 | 0,0351 | 0,0360 | 0,0386 | 0,0413 | 0,0450 |
| Härte in kg/mm ² | 34,4 | 35,4 | 36,8 | 36,4 | 37,6 | 38,1 | 38,1 | 38,2 | 38,5 | 39,4 | 40,3 | 40,8 | 39,2 | 41,3 | 42,6 | 42,6 |

Um diese Versuchsziffern zu verwerthen, wurden zunächst, wie schon früher in dem Schwerd'schen Berichte, die Druckflächeninhalte in qmm als Abscissen, die zugehörigen Lasten in kg als Ordinaten aufgetragen. Dies ist in Abbildung 1 auf Tafel III geschehen. Jedem in der Tabelle angeführten Versuche entspricht ein Punkt in dieser Abbildung, nämlich der Mittelpunkt eines der kleinen Kreise. Man erhielt so vier Punktreihen, die sich auf die Cylinderdurchmesser von 5, 10, 15 und 20 mm beziehen. Längs jeder dieser Punktreihen ist in der Abbildung eine Curve gezogen. Wie diese ermittelt wurde, wird nachher noch besprochen werden; einstweilen genügt die Bemerkung, dass die in der Nachbarschaft je einer dieser Curven liegenden Punkte sich auf die Versuche mit jenem Cylinderdurchmesser D beziehen, der der Curve beigezeichnet ist. Da überdies die zu den Durchmessern von 5 und 15 mm gehörigen Punkte kräftiger, die zu 10 und 20 mm gehörigen durch schwächer ausgezogene

kleine Kreise angegeben sind, wird man in jedem Falle leicht erkennen, welcher Versuchsreihe jeder einzelne Punkt zugehört. Wenn die gezogenen Curven als genau richtig ermittelt betrachtet werden könnten, wären die Abweichungen der einzelnen Punkte von den zugehörigen Curven auf die Versuchsfehler zurückzuführen.

Unter der Annahme, dass ein p_{max} bestehe, dass also die Lasten bei grösseren Druckflächen den Druckflächeninhalten proportional seien, müsste man erwarten, dass die Curven oder, genauer gesagt, die ihnen entsprechenden Punktreihen in ihrem oberen Verlaufe durch eine Gerade ersetzt werden könnten. Eine deutlich ausgesprochene Abweichung von dem geradlinigen Verlaufe ist indessen schon bei dieser Darstellungsart nicht zu verkennen.

Sehen wir aber davon einmal ab und betrachten es für eine erste Annäherung als genügend, die oberen Theile der Punktreihen als geradlinig anzusehen, so ist ganz zweifellos, dass diese Geraden nicht zusammenfallen können.

Das müssten sie aber, wenn die in dieser Weise ermittelte Härteziffer unabhängig vom Cylinderdurchmesser gefunden werden sollte. Vielmehr wird, wenn man von der Annahme eines p_{max} ausgeht, die Härte in Uebereinstimmung mit Auerbach und Schwerd um so grösser gefunden, je kleiner der Cylinderdurchmesser ist.

Zu einem ganz anderen Ergebnisse gelangt man aber, wenn man auf die Abweichungen von dem geradlinigen Verlaufe der Punktreihen Rücksicht nimmt und, um diesem Umstande Rechnung zu tragen, nur solche Versuchswerte mit einander vergleicht, die sich auf Druckflächen beziehen, deren Durchmesser sich wie die Cylinderdurchmesser zu einander verhalten.

Diesem Vergleiche dienen die Abbildungen 2 bis 5 auf Tafel III. Der Deutlichkeit wegen ist bei ihnen jede Versuchsreihe mit einem der vier Cylinderdurchmesser durch eine besondere Zeichnung wiedergegeben worden. Auch hier geben die Abscissen die Druckflächeninhalte an, aber in einem anderen Massstabe. Die Druckflächeninhalte wurden nämlich schon in der Tabelle zugleich in Bruchtheilen der zugehörigen Cylinderquerschnittsflächen ausgedrückt und diese Verhältnisszahlen sind hier als Abscissen aufgetragen. Dadurch wird erreicht, dass in den vier Abbildungen stets solche Versuchswerte unmittelbar über einander stehen, die sich auf verhältnissgleiche Druckflächeninhalte beziehen. Als Ordinaten sind die durch Division der Lasten durch die Druckflächeninhalte ermittelten Härteziffern, die ebenfalls in den Tabellen schon überall angegeben sind, aufgetragen und zwar bei allen vier Zeichnungen in dem gleichen Massstabe.

Auch in jeder dieser vier Abbildungen ist eine Curve eingetragen, von der angenommen wird, dass sie den gesetzmässigen Verlauf der durch kleine Kreise bezeichneten Versuchswerte am besten wiedergebe. Diese Curven entsprechen den schon in Abb. 1 vorkommenden, in dem Sinne nämlich, dass, wenn die Punktreihen in Abb. 1 genau mit den zugehörigen Curven zusammenfielen, auch die Punkte in den Abb. 2 bis 5 genau auf die dort eingetragenen Curven fallen müssten.

Wenn die als Funktion des Druckflächeninhaltes ausgedrückte Härteziffer von der absoluten Grösse des Cylinderdurchmessers unabhängig sein sollte, falls man die Druckfläche in Bruchtheilen der Querschnittsfläche des Cylinders ausmisst — also falls man in dem vorher besprochenen Sinne stets nur verhältnissgleiche Druckflächen mit einander vergleicht — müssten die vier Punktreihen in den Abb. 2 bis 5 — von den Versuchsfehlern abgesehen — congruent mit einander sein. Wie man sieht, trifft aber auch dies nicht genau zu. Die Härte von 40 kg/qmm wird z. B. bei 20 mm Cylinderdurchmesser schon bei einer Druck-

fläche erreicht, die etwa 0,03 der Cylinderquerschnittsfläche ausmacht, bei 15 mm Cylinderdurchmesser bei einer Druckfläche von 0,04, bei 10 mm Durchmesser von 0,055, bei 5 mm Durchmesser von 0,08 der Querschnittsfläche des Cylinders.

Dieses Ergebniss ist recht überraschend. Denn es zeigt, dass man im Gegensatze zu dem vorher besprochenen Verfahren, das sich auf die Annahme eines Werthes p_{max} stützte, bei der jetzt zu Grunde gelegten Art der Abschätzung die Härte um so grösser findet, je grösser der Cylinderdurchmesser ist. Oder genauer ausgedrückt: dass man aus denselben Versuchszahlen über den Einfluss der Krümmung auf die Härteziffer so ziemlich heraus lesen kann, was man will, so lange man sich nicht an eine scharf ausgesprochene Vorschrift hält, nach der die Härte aus den Versuchsergebnissen abzuleiten ist. Denn die freilich deutlich genug hingestellte Forderung, den Werth p_{max} als massgebend anzusehen, erweist sich bei diesen kleineren Cylinderdurchmessern als unbrauchbar, da ein solcher Maximalwerth nicht zu erreichen ist. Es bedarf nämlich kaum der Erwähnung, dass man bei einer Fortsetzung des Versuchs mit noch grösseren Druckflächen, als sie hier vorkamen, auf so starke Formänderungen käme, dass von einer annähernd cylindrischen Gestalt der Probekörper überhaupt nicht mehr geredet werden könnte. Druckversuche, bei denen die Cylinder ganz platt gedrückt würden, könnten natürlich nicht mehr als Härteversuche gelten. Bei den kleineren Cylindern sind die Versuche ohnehin schon auf verhältnissmässig so grosse Druckflächen ausgedehnt worden, wie man sie für Härteversuche nicht mehr billigen kann. Dies geschah auch nur, um zu sehen, wie sich die Verhältnisse weiterhin gestalten, wenn man den Versuch in derselben Art über die eigentlich zulässigen Grenzen weit hinaus fortsetzt.

In dieser Hinsicht erinnere ich noch daran, dass ich bei den Normalkörpern von 40 mm Cylinderdurchmesser einen Druckflächendurchmesser von etwa 4 mm als den zulässig grössten betrachtet habe. In diesem Falle ist der Druckflächeninhalt 0,01 der Cylinderquerschnittsfläche, also verhältnissmässig noch kleiner als selbst bei den kleinsten Druckflächen, die bei den hier besprochenen Versuchen vorkommen. Aber selbst durch diese weite Ausdehnung des Versuchs über die als zulässig anzusehenden Grenzen hinaus, konnte bei diesen kleinen Cylinderdurchmessern kein als constant anzusehender und hiermit brauchbarer Werth von p_{max} gefunden werden.

Auf Tafel III Abb. 6 sind die Versuchswerte noch auf eine dritte Art aufgetragen worden, nämlich in einer logarithmischen Darstellung. Dies geschah, weil sich

aus den Punktreihen der vorhergehenden Darstellungen von vornherein nicht wohl erkennen liess, wie sich der gesetzmässige Verlauf der Versuchswerthe durch eine empirische Formel gut wiedergeben liesse. Man sah nur, dass die Punktreihen durch Curven dargestellt werden müssten, hatte aber keinen Anhaltspunkt dafür, welches Gesetz für diese Curven zu Grunde zu legen sei. In solchem Falle thut man am besten, andere graphische Darstellungen zu versuchen, um womöglich auf eine zu kommen, in der sich die Punktreihen in geraden Linien anordnen. Wenn dies gelingt, weiss man, welche empirische Formel den Thatsachen am besten gerecht wird. Nun ist schon von zahlreichen früheren Anwendungen her wohl bekannt, dass die logarithmische Darstellung diesen Zweck oft sehr gut zu erreichen gestattet. Ich forderte daher Herrn Schenk auf, es einmal mit dieser zu versuchen und in der That zeigte sich, dass sich die den vier Versuchsreihen entsprechenden Punktreihen so gut in gerade Linien einordneten, wie man es nur irgend erwarten konnte. Selbst wenn man wüsste, dass die Punktreihen in Abb. 6 in Wirklichkeit durch krumme Linien von schwacher Krümmung auszugleichen wären, könnte man nach der Zeichnung, die übrigens zur Erzielung grösserer Genauigkeit auch noch in doppeltem Massstabe aufgetragen worden war, nicht sagen, nach welcher Seite hin die Curven gekrümmt anzunehmen wären.

Als Abscissen wurden die Logarithmen der in mm ausgedrückten Druckflächen-Durchmesser aufgetragen. Dazu wurde die logarithmische Theilung eines gewöhnlichen Rechenschiebers benützt. Die Ordinaten geben die ebenso aufgetragenen Logarithmen der zugehörigen Lasten in kg an, wobei jedoch, um Platz zu sparen, der untere Theil weggelassen wurde, so dass die Abscissenaxe schon mit $\log 10$ beginnt.

Hierbei sei bemerkt, dass man gleichfalls auf gerade Linien für die Punktreihen hätte kommen müssen, wenn man an Stelle der Durchmesser die Inhalte der Druckflächen, oder an Stelle der Lasten die Härteziffern logarithmisch aufgetragen hätte. Dies folgt leicht aus den Eigenschaften des Logarithmus und gerade darin, dass man nicht eine Reihe verschiedener Anordnungen durchprobiren muss, um zu erkennen, ob eine von ihnen auf eine gradlinige Darstellung führt, liegt der Vortheil der logarithmischen Wiedergabe der Versuchswerthe.

Jeder von den Versuchen in den Tabellen wird in Abb. 6 wieder durch einen Punkt vertreten. Dabei sind auch wieder, um die Zugehörigkeit der Punkte hervorzuheben, die Punkte für $D=5$ u. $D=15$ mm durch kräftiger ausgezogene Kreise, die den Cylinderdurchmessern $D=10$ und $D=20$ mm zugehörigen durch schwächer ausgezogene Kreise angegeben. Man sieht zunächst, dass die vier Graden nicht

zusammenfallen, was freilich schon mit Rücksicht auf das entsprechende Ergebniss in Abb. 1 zu erwarten war. Die vier Linien sind aber auch nicht genau parallel zu einander. Namentlich in der Zeichnung im doppelten Massstabe, die hier der Platzersparniss wegen nicht mit aufgenommen wurde, zeigte sich deutlich, dass man die vier Linien nicht parallel zu einander ziehen konnte, ohne den durch die Punkte ausgedrückten Beobachtungsthatsachen Gewalt anzuthun.

Von besonderer Wichtigkeit ist für die weitere Verwerthung die Tangente n des Neigungswinkels jeder der vier Graden gegen die Abscissenaxe. Nachdem Herr Schenk die Linien so gut, als sie sich den Punktreihen anschmiegen wollten, gezogen hatte, ergaben sich diese Tangenten

| | | | | |
|-----------|------|------|------|-------|
| für $D =$ | 5 | 10 | 15 | 20 mm |
| zu $n =$ | 2,40 | 2,40 | 2,34 | 2,30 |

Freilich ist hier die letzte Decimale nicht mehr ganz sicher und zwar scheint aus verschiedenen Bestimmungen, die nach einander vorgenommen wurden, hervorzugehen, dass der Fehler etwa bis zu zwei Einheiten der letzten Decimalen betragen kann.

Hierbei möchte ich einschalten, dass es natürlich einen einwandfreieren und zuverlässigeren Weg gibt, um die Tangente des Neigungswinkels unmittelbar aus den Versuchszahlen abzuleiten, ohne jede Dazwischenkunft von unvermeidlichen Zeichenfehlern und von Schätzungsfehlern beim Ziehen der Linien. Man braucht sich dazu nur der Methode der kleinsten Quadrate zu bedienen und der Umstand, dass es sich hier um gerade Linien bei der Ausgleichung handelt, erleichtert zudem die Rechnung, die zu diesem Zwecke anzustellen wäre, erheblich gegenüber anderen schwieriger gelagerten Fällen. Immerhin würde aber, da hier eine so grosse Zahl von einzelnen Versuchen vorkommt, die in das Ausgleichsverfahren einzubeziehen wären, die Rechnung einen sehr grossen Umfang erreichen, und nach einigem Zögern entschloss ich mich daher, lieber darauf zu verzichten. Es schien mir, dass der Vortheil, der durch eine genauere Ermittlung jener Werthe zu erreichen wäre, doch nicht so erheblich sei, um einen so grossen Arbeitsaufwand dafür zu rechtfertigen. Wer indessen von meinen Lesern anderer Ansicht sein sollte, verliert durch meine Unterlassung ohnehin nichts Wesentliches, da die Versuchszahlen hier vollständig zusammengestellt sind, so dass danach Jedermann in der Lage ist, die Ausgleichsrechnung selbst noch nachträglich vorzunehmen.

Nach dem, was wir in Abb. 6 fanden, besteht zwischen der Last P und dem zugehörigen Druckflächendurchmesser

für jedes der vier Cylinderpaare eine Beziehung von der Form

$$\log P = a + n \log d$$

wobei a und n zwei aus der Zeichnung zu entnehmende Constanten bedeuten, von denen n schon vorher erwähnt war, während a gleich dem Abschnitte ist, den die betreffende Gerade auf der Ordinatenaxe bildet. Aus dieser Gleichung folgt auch, wenn a' eine andere Constante bedeutet, deren Logarithmus gleich a ist,

$$P = a' d^n$$

An Stelle von d kann man auch den Druckflächeninhalt f einführen, indem man

$$d = \left(\frac{4f}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

setzt. Dann geht die vorige Gleichung über in

$$P = c \cdot f^{\frac{n}{2}}, \text{ worin } c = a' \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{n}{2}}$$

gesetzt ist. Wenn $n = 2$ wäre, hätte man hiernach P proportional mit f , d. h. c wäre der Werth P_{max} . Wenn nun auch n nur auf etwa 2 Einheiten der letzten Decimalstelle sicher ermittelt ist, so ist doch ganz zweifellos, dass bei allen vier Cylinderdurchmessern n erheblich grösser als 2 ist, d. h. also, dass P schneller wächst als f , ohne dass innerhalb des ganzen Versuchsbereichs das Zustreben des Verhältnisses $\frac{P}{f}$ gegen einen constanten Werth zu erkennen wäre. Vielmehr erhält man für die Härteziffer h aus der vorigen Gleichung

$$h = \frac{P}{f} = c f^{\frac{n-2}{2}}$$

Nach diesen Gleichungen für P und h als Funktionen von f sind nun auch die Curven in den Abbildungen 1 bis 5 aufgetragen worden. Bei Ermittlung der Constanten dieser empirischen Formeln wurden die Flächen in qmm, die Lasten in kg ausgedrückt. Dann lauten die Gleichungen für die vier Curven in Abb. 1, wenn man die Zahlenwerthe einsetzt:

$$\begin{array}{ll} \text{für } D = 5 \text{ mm} & P = 37,1 f^{1,20} \\ \text{,, } D = 10 \text{ ,,} & : P = 29,5 f^{1,20} \\ \text{,, } D = 15 \text{ ,,} & : P = 28,5 f^{1,17} \\ \text{,, } D = 20 \text{ ,,} & : P = 28,5 f^{1,15} \end{array}$$

Ebenso erhält man für die Härteziffern h , ausgedrückt in kg/qmm als Gleichungen der 4 Curven in den Abbildungen 2 bis 5

$$\begin{array}{ll} \text{für } D = 5 \text{ mm} & : h = 37,1 f^{0,20} \\ \text{,, } D = 10 \text{ ,,} & : h = 29,5 f^{0,20} \\ \text{,, } D = 15 \text{ ,,} & : h = 28,5 f^{0,17} \\ \text{,, } D = 20 \text{ ,,} & : h = 28,5 f^{0,15} \end{array}$$

Dabei ist vorausgesetzt, dass f in qmm ausgedrückt wird. Will man dagegen f in Bruchtheilen der Querschnittsfläche F des Cylinders ausdrücken, so setze man z. B. für $D = 5$ mm

$$\begin{aligned} h &= 37,1 f^{0,20} = 37,1 F^{0,20} \left(\frac{f}{F} \right)^{0,20} = \\ &= 37,1 \cdot (19,63)^{0,20} \left(\frac{f}{F} \right)^{0,20} = 67,3 \left(\frac{f}{F} \right)^{0,20} \end{aligned}$$

Führt man dieselbe Umrechnung auch für die anderen Cylinderdurchmesser aus, so erhält man als Gleichungen für die Curven in den Abb. 2 bis 5

$$\begin{array}{ll} \text{für } D = 5 \text{ mm} & : h = 67,3 \left(\frac{f}{F} \right)^{0,20} \\ \text{,, } D = 10 \text{ ,,} & : h = 70,6 \left(\frac{f}{F} \right)^{0,20} \\ \text{,, } D = 15 \text{ ,,} & : h = 68,7 \left(\frac{f}{F} \right)^{0,17} \\ \text{,, } D = 20 \text{ ,,} & : h = 67,5 \left(\frac{f}{F} \right)^{0,15} \end{array}$$

Die ersten Faktoren 67,3 ; 70,6 ; 68,7 ; 67,5 unterscheiden sich nicht viel von einander und es mag sein, dass sich Unterschiede von diesem Betrage noch durch die Versuchsfehler und die Schätzungsfehler bei der Verwerthung der Versuchszahlen erklären lassen. Dagegen ist eine Abnahme des Exponenten von 0,20 bei $D = 5$ mm auf 0,15 bei $D = 20$ mm, wenn sie auch dem genaueren Betrage nach noch nicht ganz bestimmt feststeht, doch im Allgemeinen als sicher festgestellt zu betrachten. Wahrscheinlich müssten sich auch für $D = 5$ und $D = 10$ mm die Exponenten noch ein wenig von einander unterscheiden ; der Unterschied wird eben nur noch in die Fehlergrenze hineinfallen, die sich bei diesen Exponenten etwa auf eine Einheit der letzten Decimalen belaufen wird. Zugleich möchte ich übrigens bemerken, dass ich bei der Durchsicht der Ergebnisse den Eindruck gewann, als wenn der Exponent 0,15 für $D = 20$ mm eher noch etwas zu gross sei und besser auf 0,14 geändert würde, wie mir besonders aus der Betrachtung von Abb. 2 hervorzugehen schien. Herrn Schenk, der alle Zeichnungen aufgetragen und die Curven dem Verlaufe der aus den Versuchen entnommenen Punktreihen möglichst genau anzupassen versucht hatte, musste indessen ein besseres Urtheil über die zutreffende Abschätzung zugetraut werden und ich habe daher an den von ihm ermittelten Werthen nichts geändert.

Es scheint hiernach, dass sich die Versuchsergebnisse hinreichend genau durch eine Formel

$$h = k \cdot \left(\frac{f}{F}\right)^m$$

wiedergeben lassen, in der die Constante k ganz oder nahezu unabhängig vom Cylinderdurchmesser ist, während der Exponent m abnimmt, wenn der Cylinderdurchmesser grösser genommen wird.

Damit stimmt auch ganz gut zusammen, dass man bei den Normalkörpern von der Veränderung der Härteziffer mit wachsender Druckfläche nicht mehr viel bemerkt; für den Cylinderdurchmesser von 40 mm wird der Exponent m — vorausgesetzt, dass die aus den Versuchen mit kleinen Cylindern abgeleitete Formel sich auch noch

bei grösseren Cylinderdurchmessern bewährt — vermuthlich so klein, dass sich die Potenz $\left(\frac{f}{F}\right)^m$ nur noch wenig von 1 unterscheidet, sobald nur f erst einige Tausendstel des Cylinderquerschnitts F ausmacht. Das Anwachsen von h mit weiter wachsendem f erfolgt dann so langsam, dass es durch die Ungenauigkeiten der einzelnen Versuchswerthe verdeckt wird, so lange man nur Druckflächen von etwa 2,5 bis zu 4 mm Durchmesser mit einander vergleicht. Hierdurch wird eben der Anschein eines Werthes p_{max} erweckt, der als Härtemass gebraucht werden kann.

Uebrigens erkennt man auch aus den Formeln für h , dass in der That bei gleichem $\frac{f}{F}$ die Härteziffer um so grösser ausfällt, je grösser der Cylinderdurchmesser ist.

C. Schlussfolgerungen.

Die praktische Brauchbarkeit des Auerbach-Schwerd'schen Härteprüfungsverfahrens wird durch die hier neu aufgedeckten Gesetzmässigkeiten nicht in Frage gestellt, so lange man mit Normalkörpern (gekreuzten Cylindern von 40 mm Durchmesser) arbeiten kann und das Härtemass aus Druckflächen von etwa 2,5 bis 4 mm Durchmesser durch Mittelbildung ableitet.

Für andere Krümmungsverhältnisse der zum Eingriffe mit einander kommenden Oberflächen versagt dagegen das Verfahren in der ihm früher gegebenen Form vollständig und die Frage bleibt einstweilen offen, wie die Normalhärte aus den Versuchsziffern in solchen Fällen abzuleiten ist. Es wäre auch verfrüht, eine Beantwortung dieser Frage aus den Schenk'schen Versuchen schon jetzt ableiten zu wollen. Zunächst erstrecken sich diese Versuche nur auf Cylinderdurchmesser von 5 bis 20 mm, sie reichen also nicht einmal bis zum Normaldurchmesser von 40 mm in stetiger Reihenfolge hinauf. Ausserdem beziehen sie sich auch nur auf ein einziges Material. Wenn auch

als wahrscheinlich zu betrachten ist, dass für andere Metalle ähnliche Gesetzmässigkeiten bestehen werden, so könnte doch namentlich die Abhängigkeit des Exponenten m oder n von der Grösse des Krümmungshalbmessers der Cylinder bei verschiedenen Stoffen sehr verschieden sein. Auch Versuche mit kugelförmigen Probekörpern von hinreichender Ausführlichkeit und Genauigkeit stehen noch aus.

Aus allen diesen Gründen muss die endgültige Entscheidung der Frage der Härteprüfung bei Krümmungsverhältnissen, die sich erheblich von jenen der Normalkörper unterscheiden, einstweilen vertagt werden, bis noch sehr eingehende weitere Experimental-Untersuchungen vorliegen. Weder die Auerbach-Schwerd'sche Zurückführungsregel, die ein umgekehrtes Verhältniss der Härteziffer mit der Kubikwurzel aus dem Krümmungshalbmesser vorschreibt, noch die Schwinning'sche Angabe von der Unabhängigkeit des Härtemasses von der Krümmung kann weiterhin als brauchbar bezeichnet werden.

III.

Druckversuche mit Wasserkissen.

Im 27. Hefte dieser Mittheilungen habe ich über Druckversuche mit Cement- und Steinwürfeln berichtet, bei denen zur Beseitigung der Reibung zwischen Probekörper und Druckplatten eine Schmierschicht angeordnet war. Schon damals (S. 21) musste aber darauf hingewiesen werden, dass bei dieser Versuchsanordnung auf eine gleichförmige Druckvertheilung über die ganze Druckfläche nicht gerechnet werden kann, weil der Druck am Rande, wo das Schmiermittel ungehindert austreten kann, zu Null wird. Jedenfalls ist daher der Druck nach der Mitte der Druckfläche hin grösser als in der Nähe des Randes; über

das genauere Vertheilungsgesetz ist dagegen nichts bekannt.

Im Centralblatte der Bauverwaltung 1900, S. 287, hat Herr Berner aus Stuttgart denselben Umstand näher besprochen und der Ansicht Ausdruck gegeben, dass die durch die Schmierung herbeigeführte Verminderung der Bruchlast in erster Linie auf die ungleichmässige Vertheilung des Druckes in der Schmierschicht zurückzuführen sei. Herr Berner nimmt dabei an, dass das Druckvertheilungsgesetz in ungefährer Uebereinstimmung mit jenem stehe, das nach den Versuchen von Beauchamp Tower

mit geschmierten Zapfen für die Pressungsänderungen des Schmieröls zwischen Zapfen und Schale eines Lagers besteht.

Diese Annahme ist indessen wenig begründet; es ist zum mindesten sehr fraglich, ob bei den harten Schmieren, die erst bei einem hohen Drucke in's Fließen kommen und bis dahin also auch selbst am Rande noch ziemlich hohe Pressungen zu übertragen vermögen, ein ähnliches Druckvertheilungsgesetz zutrifft als bei Schmieröl, das schon unter dem geringsten Drucke auszuweichen vermag. Dabei will ich noch ganz davon absehen, dass bei der Schmierschicht eines Lagers die Umdrehung des Zapfens und dessen Umlaufgeschwindigkeit einen grossen Einfluss auf die Druckvertheilung in der Schmierschicht ausüben, so dass beide Fälle, die Herr Berner in Vergleich bringt, kaum etwas mit einander gemeinsam haben.

Immerhin ist aber der Einwand wenigstens insofern berechtigt, als sich aus dem Versuche mit geschmierten Druckflächen wegen der ungleichmässigen Druckvertheilung kein sicheres Urtheil über die wahre Druckfestigkeit gewinnen lässt, so lange man nicht den Nachweis führen kann, dass das Druckgefäll nur in der Nähe der Kanten einen grösseren Werth annimmt, im Uebrigen aber nicht erheblich ist. Dafür, dass dies so sein müsse, hatte ich zwar schon früher (in Heft 27 und im Centralblatte 1900, S. 287) einige Beobachtungen, die darauf schliessen liessen, angeführt; es muss aber zugegeben werden, dass sie zu einem überzeugenden Beweise nicht ausreichten. Ich hatte daher auch schon bei jener Gelegenheit weitere Versuche zur Aufklärung der Frage in Aussicht gestellt. Gegen Ende des Jahres 1900 gelang es mir, die Versuchseinrichtung, die zuerst viele Schwierigkeiten machte, so zu verbessern, dass sie sich gut bewährte. Da sich die Bearbeitung dieses Heftes über den ursprünglich in Aussicht genommenen Zeitpunkt hinaus verzögerte, hat sich leider auch der Bericht über diese Versuche etwas verspätet.

Eine einwandfreie gleichmässige Druckvertheilung lässt sich nur mit Hülfe einer Flüssigkeit erzielen. Die Flüssigkeit (am einfachsten Wasser) muss natürlich in einem gegen Druck widerstandsfähigen Gefässe eingeschlossen sein, das auf irgend eine Art so eingerichtet ist, dass die Druckfläche des Würfels, der dem Versuche unterworfen werden soll, einen Bestandtheil der Gefässwand ausmacht oder an die Stelle eines solchen tritt. Dieser Forderung war nicht leicht zu genügen und viele Vorversuche verliefen zuerst erfolglos wegen Brüchen des Apparats, schwieriger Dichtung u. s. f. Zuletzt hat sich aber eine Einrichtung gefunden, mit der man ganz zufrieden sein konnte.

Auf Tafel IV ist sie dargestellt. Ein gusseiserner Kasten *A* in Abb. 2, der als „Wasserkissen“ bezeichnet ist, trägt einen Deckel *B*, in dem sich eine quadratische

Oeffnung von oben 75 mm, unten 73 mm Seitenlänge befindet. Das durch diese Oeffnung gebildete „Fenster“ wird durch eine „Fensterscheibe“ *C* in Gestalt einer 4 mm starken Platte aus Gummi oder Kautschuk geschlossen. Die Kautschukplatte kann, wenn sie nicht anderweitig gestützt wird, nur einem sehr geringen Ueberdrucke im Gefässe widerstehen; sie baucht sich, wenn das Wasserkissen vollgepumpt wird, sofort aus. Wenn daher ein Cementwürfel durch das Fenster eingeführt wird, so dass er auf der Kautschukplatte aufsitzt, wird der Wasserdruk durch die Platte hindurch fast genau so auf den Würfel übertragen, als wenn die Platte gar nicht dazwischen wäre.

Der Cementwürfel hat 71 mm Kantenlänge. Wo er auf der Gummiplatte von 73 mm Kantenlänge aufsitzt, hat er daher ringsum einen Spielraum von 1 mm. Nach oben hin erweitert sich der Spielraum auf 2 mm. Auf dem ringsum laufenden Streifen von 1 mm Breite ist die Gummiplatte nicht unterstützt; sie muss daher den auf ihr lastenden Wasserdruck seitlich, theils nach dem gusseisernen Deckel, theils nach dem Probewürfel hin übertragen und drängt sich dabei in den Spielraum vor, so dass sie wulstartig in ihn hineinragt. Das ist natürlich ein unerwünschter, aber bei der getroffenen Anordnung nicht vermeidlicher Nebenumstand. Indessen ist die Platte so dick im Vergleiche zur Breite des nicht unterstützten Streifens (4 mm gegenüber 1 mm), dass jene Unregelmässigkeiten als gering angesehen werden können.

Anfänglich glaubte ich, mit der bis dahin beschriebenen Einrichtung auskommen zu können. Das war aber nicht möglich, da die Dichtung zwischen der Gummiplatte und dem Deckel — auch bei Anwendung eines grösseren Modells mit doppelten Schraubenreihen — zu viel Schwierigkeiten machte. Zur Dichtung wurde daher der in Abb. 1 dargestellte Gummiball mit daran hängendem Schlauch verwendet. Der Gummiball wurde in den Hohlraum des Wasserkastens gelegt, wobei er über die Oeffnung weit vorstand, hierauf zusammengedrückt und mit der Gummiplatte *C* überdeckt. Unter dem hohen Wasserdrukke, dem er späterhin ausgesetzt wurde, dehnte er sich nach allen Seiten hin aus, so dass er den ganzen rechteckigen Innenraum ausfüllte, so wie er in Abb. 2 gezeichnet und mit dem Buchstaben *D* versehen ist.

Anfänglich platzte öfters ein Ball und zwar, wie sich leicht feststellen liess, gewöhnlich durch einen feinen Riss an einer jener Stellen, die sich in die Ecken des Hohlraumes einschmiegen mussten, den der Ball auszufüllen hatte. Um dem abzuhelpen, wurden dann späterhin diese Ecken bei der Zusammenstellung des Apparats mit etwas weichem Modellirwachs ausgestrichen, so dass der Ball vor zu grossen Zerrungen an diesen Stellen geschützt blieb.

Besser wäre natürlich die Verwendung eines dem auszufüllenden Hohlraume angepassten rechteckigen Gummihohlkörpers an Stelle des Balls gewesen. Der Ball war aber billiger zu beschaffen und entsprach seinem Zwecke auch ganz gut.

Der Schlauch des Balls wurde durch ein Messingrohr gezogen, das nach aussen führte und an das sich das zur Pumpe führende Rohr ansetzte. Aus den Zeichnungen ist dies deutlich genug ersichtlich.

Zwei in der beschriebenen Weise ausgerüstete Wasserkissen wurden an Stelle der Druckplatten in die Amsler'sche Prüfungsmaschine des Laboratoriums, die zur Ausführung von Druckproben mit Cementwürfeln benützt wird, eingesetzt, wie aus Abb. 3 zu ersehen ist. In dieser Zeichnung ist der zwischen die Wasserkissen eingeschobene Cementwürfel, soweit er sichtbar ist, durch eine Schraffur hervorgehoben. Die beiden Kupferrohre von 7 mm äusserem Durchmesser und 2 mm Wandstärke, die von dem Wasserkissen ausgehen, haben eine Länge von 3 m, so dass sie sehr leicht nachgeben und stark federn und vereinigen sich beim Anschlusse an eine gewöhnliche Druckpumpe, mit der man Pressungen von einigen hundert atm. herstellen kann.

Natürlich muss man verlangen, dass die Gummiplatte, auf der der Würfel ruht, während der ganzen Ausführung des Versuchs in ihrer Ebene bleibt, ohne merklich in das Wasserkissen hinein, noch nach aussen gezerrt zu werden. Diesem Zwecke dient ein kleiner, in der Abb. 3 mit *Z* bezeichnete Zeiger, der sich mit Hilfe einer Stellschraube *S* gegen die obere Druckplatte lehnt, während er an der unteren drehbar gelagert ist. Aus dem Ausschlage des Zeigers auf der zugehörigen Theilung erkennt man, ob sich die beiden Wasserkissen genähert oder entfernt haben. Hält man die Entfernung konstant, so müssen auch die beiden Gummiplatten in der ursprünglichen Lage bleiben.

Dreht man bei der Ausführung des Versuchs für kurze Zeit an der Kurbel der Prüfungsmaschine, so dass die Quecksilbersäule des Manometers in die Höhe geht und eine erhöhte Belastung des Würfels anzeigt, so bemerkt man zugleich eine solche Bewegung des Zeigers *Z*, wie sie einer Annäherung der Druckplatten oder Kissen entspricht. Der erhöhte Druck treibt die Gummiplatten etwas in die Wasserkissen zurück und gestattet so eine Annäherung der beiden Kissen. Dies muss vermieden werden und zwar dadurch, dass mit dem Drehen an der Kurbel der Maschine auch die Pumpe in Gang gesetzt wird, um den Wasserkissen stets so viel Wasser von Neuem zuzuführen, als etwa durch Undichtheiten verloren geht oder als nöthig ist, um den unter dem grösseren Drucke etwas vergrösserten Innenraum auszufüllen. Der Mann an der Pumpe und der an der Maschinenkurbel

müssen stets so zusammenarbeiten, dass der Zeiger *Z* seinen früheren Stand behält, wobei aber auf einen halben oder ganzen Theilstrich nicht viel ankommt. Bei Verabredung passender Zurufe lässt sich dies nach einiger Schulung leicht erreichen.

Im Uebrigen spielt sich der Druckversuch mit den Wasserkissen in ganz ähnlicher Weise ab, wie ein gewöhnlicher Druckversuch mit Cementwürfeln in der Amsler'schen Presse. Die erreichte Bruchlast wird, wie sonst auch, durch den Stand der Quecksilbersäule des Manometers angegeben. Man könnte natürlich die Drucklast auch an dem Zeigermanometer der Pumpe ablesen. Da dies aber weniger genau ist, wurde darauf nur gelegentlich manchmal geachtet, um zu erkennen, ob beide Manometer gut zusammenstimmen, im Uebrigen aber die Angabe des Manometers der Prüfungsmaschine stets als massgebend betrachtet.

Während des Versuchs muss man den Würfel sorgfältig im Auge behalten. Sobald man bemerkt, dass der Bruch beginnt, was sich, wie schon bei gewöhnlichen Druckversuchen leicht an Rissebildungen, Herabrieseln von Sandkörnern u. s. f. erkennen lässt, muss man den Bedienungsmannschaften an der Pumpe und an der Maschinenkurbel Halt gebieten. Wenn man sich dabei auch nur um eine Sekunde verspätet, ist der Gummiball sammt Gummiplatte an einem oder auch an beiden Wasserkissen verloren. Der hohe Wasserdruck zerreisst sie sofort, sobald der Würfel an einer Stelle keinen Widerstand mehr leisten kann und der Gummidichtung einen Weg nach aussen frei macht. Anfänglich kostete jeder Versuch eine vollständig neue Armirung zum mindesten eines Kissens; zuletzt konnten aber, als man besser aufpassen gelernt hatte, ganze Versuchsreihen hintereinander durchgeführt werden, ohne einen Ball oder eine Platte zu zerstören.

Eine Reihe von Einzelversuchen, die vorausgingen, ehe der Apparat gut arbeitete, lasse ich hier weg. Ich bemerke nur, dass sie im Allgemeinen mit dem, was die die hier mitzutheilenden Hauptreihen lieferten, ganz gut übereinstimmten. Uebrigens wurden für die Hauptversuche Würfel aus Cement von niedriger Druckfestigkeit verwendet, weil man nur dann, wenn die Last nicht über 4 bis 5 Tonnen hinausging, mit einiger Sicherheit darauf rechnen konnte, einen Bruch des Gummizubehörs zu verhüten. Mit natürlichen Steinen konnten daher überhaupt keine Druckversuche mit den Wasserkissen vorgenommen werden; der höchste Druck, der mit dieser Einrichtung bei den Vorversuchen mit einem älteren Cementwürfel von hoher Druckfestigkeit einmal erreicht wurde, betrug 9,3 t. Sofort nach dem Bruch des Würfels erfolgte aber auch in diesem Falle der Bruch der Gummitheile.

Ich lasse nun die Versuchsergebnisse folgen.

A. Zehn Würfel aus einem Cement „L“ im Mischungsverhältniss 1 : 3, an der Luft erhärtet, 4 Wochen alt.

Vier Würfel wurden auf gewöhnliche Weise in der Amsler'schen Presse zwischen stählernen Druckplatten zerdrückt; die Bruchlasten waren

7,2 ; 7,5 ; 7,7 ; 7,6 t

im Mittel 7,5 t.

Die sechs anderen Würfel wurden zwischen den Wasserkissen zerdrückt mit den folgenden Bruchlasten:

5,1 ; 5,7 ; 5,05 ; 5,25 ; 5,0 ; 6,1 t

im Mittel 5,4 t.

Im letzten Falle stellt sich daher die Bruchlast auf 0,72 der in gewöhnlicher Art ermittelten.

B. Zehn Würfel aus demselben Cement im Mischungsverhältniss 1 : 4, 4 Wochen lang an der Luft erhärtet.

Vier Würfel auf gewöhnliche Art zerdrückt, ergaben die Bruchlasten

4,8 ; 5,1 ; 4,5 ; 4,7 t

im Mittel 4,8 t.

Die sechs anderen, zwischen den Wasserkissen zerdrückt, ergaben die Bruchlasten

2,7 ; 2,85 ; 3,75 ; 4,0 ; 3,0 ; 2,9 t

im Mittel 3,2 t.

Das Verhältniss der Bruchlasten stellt sich hier auf 0,67.

C. Vierzig Würfel aus einem anderen Cemente „K“, im Mischungsverhältnisse 1 : 4, 4 Wochen an der Luft erhärtet.

Zehn Würfel, auf gewöhnliche Art zerdrückt, ergaben die Bruchlasten

5,2 ; 5,15 ; 5,0 ; 4,5 ; 4,9 ; 5,25 ; 4,9 ; 4,35 ; 4,95 ; 4,25 t

im Mittel 4,84 t.

Zehn Würfel, zwischen den Wasserkissen zerdrückt, ergaben die Bruchlasten

3,5 ; 3,4 ; 3,3 ; 2,9 ; 3,2 ; 2,9 ; 2,85 ; 3,2 ; 3,0 ; 3,5 t

im Mittel 3,17 t.

Das Verhältniss der Bruchlasten für diese beiden Fälle stellt sich hier auf 0,655.

Ferner wurden zehn der Würfel zwischen den Wasserkissen zerdrückt, nachdem man die Druckflächen vorher mit einer circa $\frac{1}{4}$ mm dicken Schmierschicht aus 3 Talg : 1 Stearin versehen hatte. Die Bruchlasten betragen

3,55 ; 3,05 ; 3,45 ; 3,25 ; 3,20 ; 2,95 ; 3,50 ; 3,20 ; 3,40 ; 3,00 t

im Mittel 3,25 t.

Die Bruchlasten unterscheiden sich daher in diesem Falle nicht merklich von dem vorhergehenden.

Endlich wurden 10 ungeschmierte Würfel mit Beilagen von 0,08 mm dicken Messingplättchen an den Druckflächen zwischen den Wasserkissen zerdrückt; die Bruchlasten betragen

4,1 ; 3,95 ; 4,2 ; 4,0 ; 4,6 ; 3,55 ; 3,6 ; 4,8 ; 4,1 ; 4,8 t

im Mittel 4,17 t.

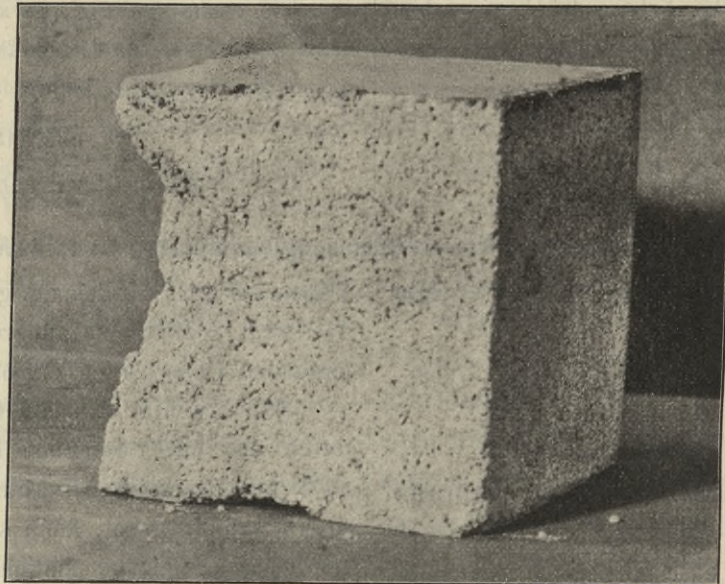
Die Bruchlasten waren daher in diesem Falle beträchtlich höher, als in den beiden vorhergehenden. Der Grund für diese Erscheinung ist mir nicht ganz klar geworden. Denn dass er in der durch die Metallzwischenlage bewirkten Verhütung einer Sprengwirkung zu erblicken sei, ist nach den im vorigen Hefte dieser „Mittheilungen“ beschriebenen

Versuchen mit Plättchen der gleichen Art kaum anzunehmen. Vielleicht kommt eine andere Erklärung, die sich aus der folgenden Ueberlegung ergibt, der Wahrheit näher.

Man beachte, dass die Gummiplatte an den Rändern durch den mit Schrauben befestigten Deckel an einem seitlichen Ausweichen verhindert ist. Wenn der Wasserdruk auf ihr lastet, kann sie sich daher der Quere nach nur wenig ausdehnen, nämlich nur so viel, als den elastischen Formänderungen des gusseisernen Kastens entspricht. Könnte sie sich der Quere nach gar nicht ausdehnen, so wäre auch der Würfel durch die Reibung an der Gummiplatte verhindert, seine Querdehnung frei auszuführen. Wahrscheinlich wird der Würfel, um zu zerbrechen, eine etwas grössere Querdehnung ausführen müssen, als sie die Gummiplatte erfährt. Er müsste dann über die Gummiplatte ein wenig gleiten und dieses Gleiten würde über die sorgfältig geglättete Würfeloberfläche hin vermuthlich weniger Reibungswiderstand finden, als bei Zwischenschaltung eines Messingplättchens. Nach diesem Erklärungsversuche würde daher das Messingplättchen so zu sagen wie ein negatives Schmiermittel wirken. Für die Erklärung spricht der nachher noch zu erwähnende Umstand, dass die Brucherscheinungen ihren Anfang gewöhnlich in der Mitte einer Kante nehmen und sich von da aus erst nach den Druckflächen hin fortsetzen. Dagegen spricht freilich der Umstand, dass durch eine Schmierung der Druckflächen die Bruchlasten keine merkliche Aenderung erfuhren. Es könnte indessen sein, dass die sehr dünne Schmierschicht bei der Bruchlast noch nicht zum Fliessen gekommen war oder dass das Fliessen durch Absperren am Rande verhindert wurde. Zu sehen war auch in der That nach Beendigung des Versuchs von einem Fliessen des Schmiermittels nichts.

Zweifelhaft bleibt es aber jedenfalls, ob die hier versuchte Erklärung richtig ist. Man sieht daher, dass mau

auch bei dieser Versuchseinrichtung nicht zu einer nach allen Seiten hin einwandfreien einfachen Druckbeanspruchung gelangen kann. Wenn auch die Normalbelastung des Würfels hier ohne Zweifel hinreichend gleichförmig über die Druckfläche vertheilt war, so kommen doch durch die unvermeidliche Zwischenschiebung der Gummitheile u. s. f. wieder tangential Lasten an den Druckflächen ins Spiel, die sich nicht ganz vermeiden lassen und die das Resultat merklich beeinflussen können. Auch die Wirkung am Rande mag nicht ohne merklichen Einfluss sein. Wenn sich nämlich die Gummipatte in dem schmalen Spielraume von 1 mm Breite ein wenig herausdrängt, so wird auch dadurch ein Widerstand gegen die unbehinderte Querdehnung des Würfels geschaffen. Ich glaube daher, dass alle mit dem Wasserkissen erhaltenen Festigkeitszahlen gegenüber dem wahren Werthe der Druckfestigkeit noch etwas zu hoch sind.



Im Uebrigen theilt diese Versuchseinrichtung den Mangel, dass sie nicht frei von Fehlerquellen ist, mit allen anderen. Um bei einer so verwickelten Erscheinung, wie sie bei jedem Druckfestigkeitsversuche vorliegt, alle Umstände genau zu erkennen und daraus den wahren Werth der Druckfestigkeit abzuleiten, bleibt nichts übrig, als sehr verschiedene Versuchseinrichtungen der Reihe

nach durchzuprobieren und die einzelnen Ergebnisse mit einander zu vergleichen. In dieser Hinsicht kann aber wohl kein Zweifel darüber bestehen, dass auch die hier mitgetheilten Versuchsergebnisse sehr deutlich dafür sprechen, dass die wahre Druckfestigkeit erheblich niedriger ist, als der durch einen gewöhnlichen Druckversuch mit ungeschmierten Druckplatten erhaltene Werth.

Schliesslich mache ich noch auf die bildliche Wiedergabe der bei den Druckversuchen mit Wasserkissen in der Regel erhaltenen Bruchform aufmerksam. Gewöhnlich blähte sich in der Mitte einer Kante das Material ein wenig auf. Dann wurde schnell die Pumpe abgestellt. Der Bruch setzte sich aber in der Zwischenzeit noch etwas weiter fort. Erstreckte er sich währenddessen bis ganz zu einer Druckfläche hin, so platzte die Gummipatte. Uebrigens sind auch die Theile in der Nähe der Druckflächen bei dem hier wiedergegebenen Würfel

schon von Rissen durchzogen, so dass man sie leicht abbröckeln könnte; auch sonst ziehen sich noch manche feinen Risse durch die Würfel in unregelmässiger Vertheilung hin. Zuweilen trat dieselbe Brucherscheinung auch an zwei Kanten gleichzeitig auf oder sie erstreckte sich, wenn die Kanten benachbart waren, in ähnlicher Art über die ganze zwischen ihnen liegende Würfelseite.

Nachtrag.

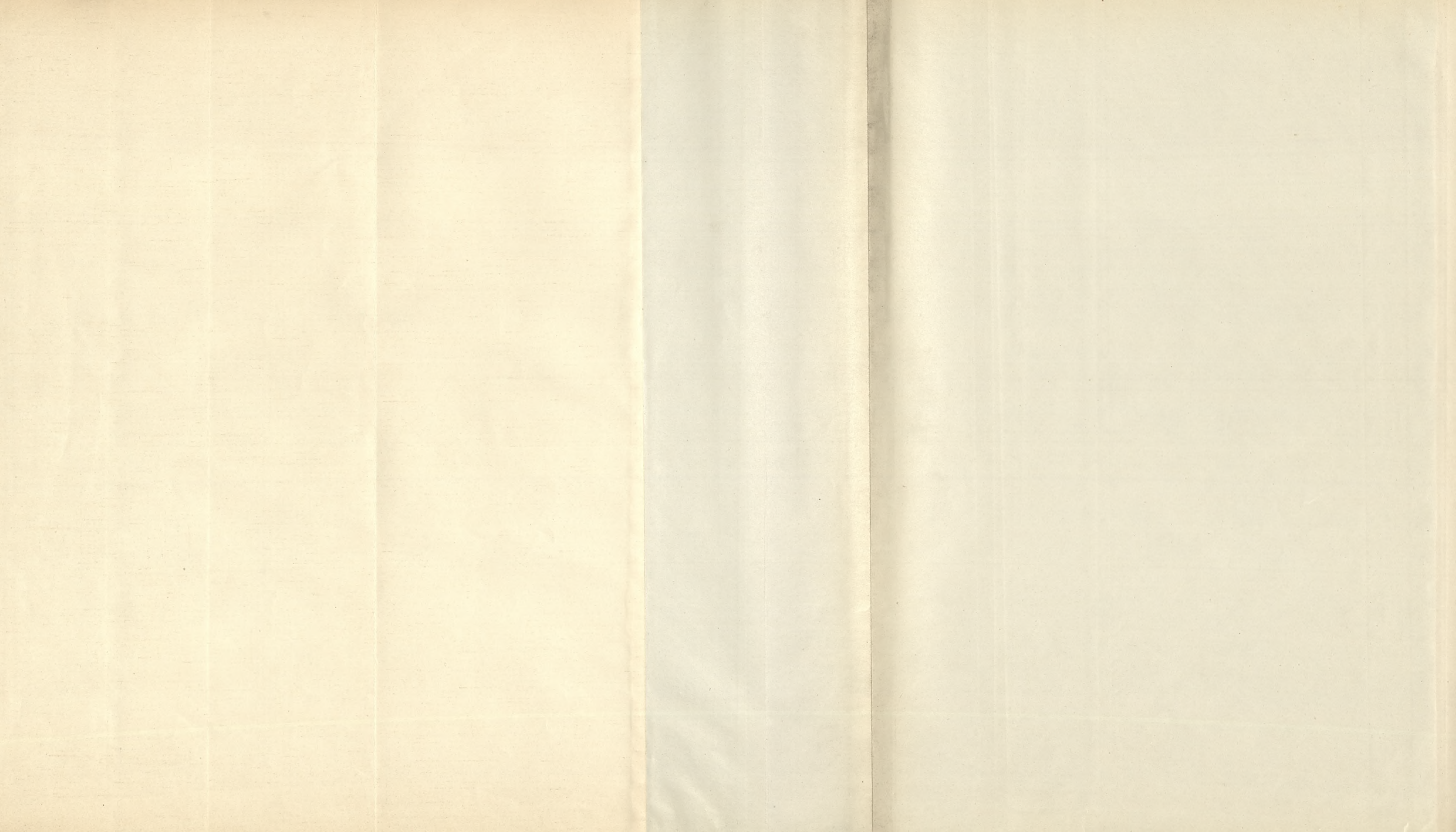
Während des Druckes stellte ich noch eine weitere Versuchsreihe mit 20 Würfeln aus 1 Cement „B“: 4 Sand, im Alter von 16 Tagen an, um den Einfluss der Messingbeilagen im Wasserkissen nochmals zu prüfen. Dabei gaben 10 Würfel ohne Beilagen zwischen den Wasserkissen die Bruchlasten

2,10 ; 1,95 ; 2,00 ; 1,80 ; 2,00 ; 2,00 ; 2,00 ; 2,30 ; 00 ; 1,90 t
oder im Mittel **2,005 t**

und die zehn Würfel mit Messingplättchen im Wasserkissen die Bruchlasten

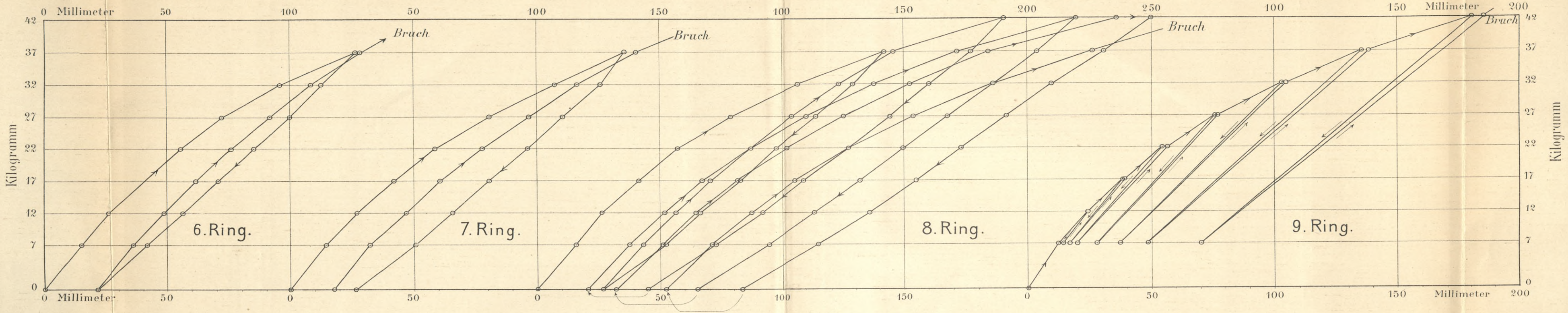
2,05 ; 2,42 ; 2,11 ; 2,12 ; 2,35 ; 2,40 ; 2,43 ; 2,50 ; 2,35 ; 2,50 t
oder im Mittel **2,323 t**.

Bei den ohne Beilagen zerdrückten Würfeln bemerkte man mit dem Vergrößerungsglase eine Reihe unregelmässig über die ganze Druckfläche vertheilter feiner Haarrisse; bei den mit Messingplättchen belegten Würfeln dagegen nur ganz vereinzelte feine Risse, die sich von den Kanten aus rechtswinklig dazu bis auf 1 bis 1½ cm in die Druckflächen hinein erstreckten. Dieser Befund spricht dafür, dass die Druckflächen durch Reibung an den Messingplättchen zusammengehalten werden und gibt eine hinreichende Erklärung für den Unterschied der in beiden Fällen beobachteten Bruchlasten.

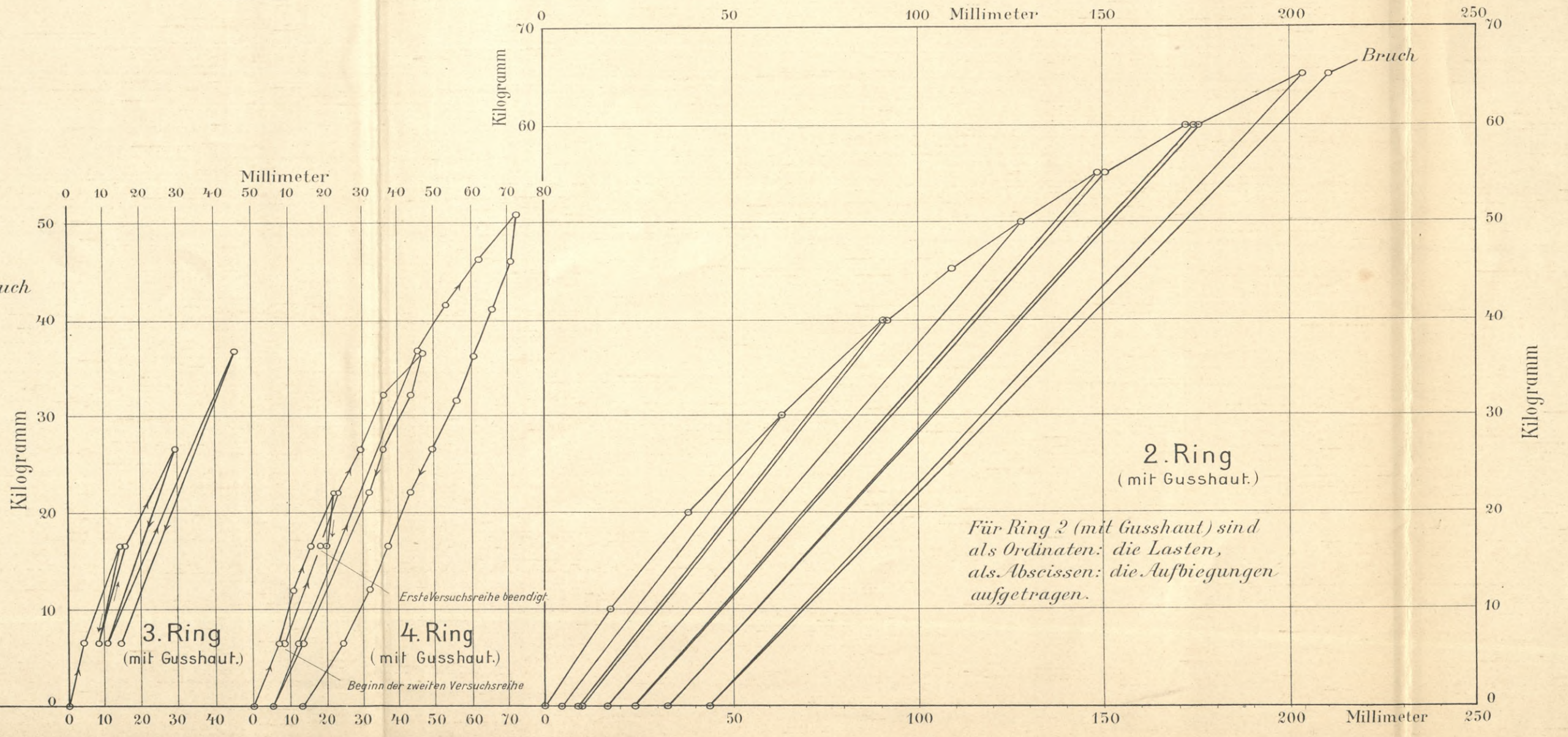
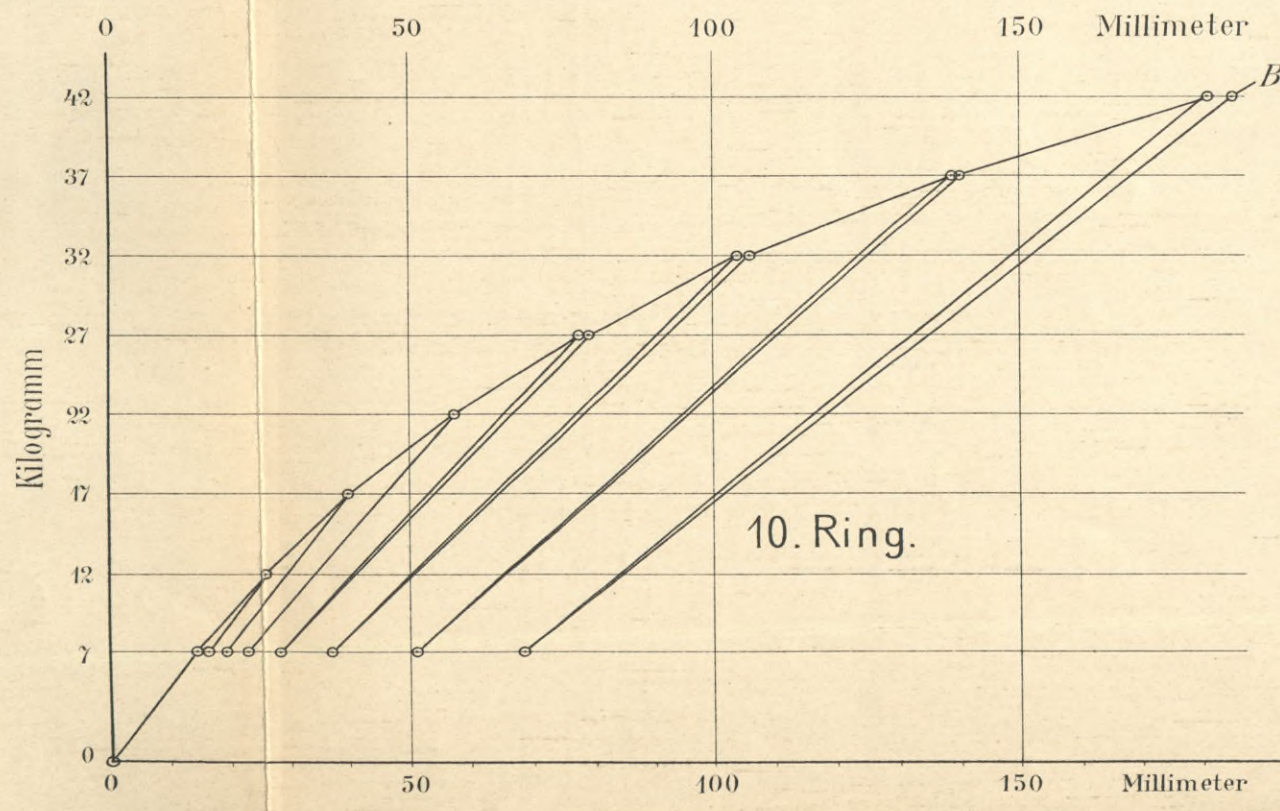


Biegung von Gusseisenringen.

Graphische Darstellung der Versuchsziffern.



Für die Ringe 3, 4, 6, 7, 8, 9 u. 10 sind
als Ordinaten: die Lasten,
als Abscissen: die Durchmesseränderungen
aufgetragen.



Für Ring 2 (mit Gusshaut) sind
als Ordinaten: die Lasten,
als Abscissen: die Aufbiegungen
aufgetragen.

Härteversuche mit Messing-Cylindern.

In den Abb. 2-5 geben die Ordinaten die Härteziffern, die Abscissen die Druckflächeninhalte in Bruchtheilen der Cylinderquerschnittsfläche an.

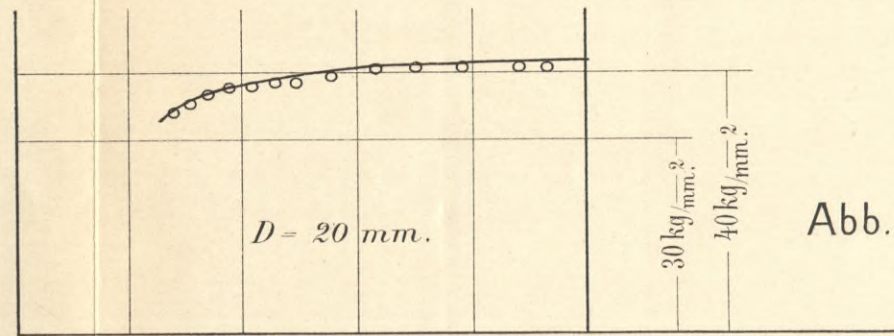


Abb. 2.

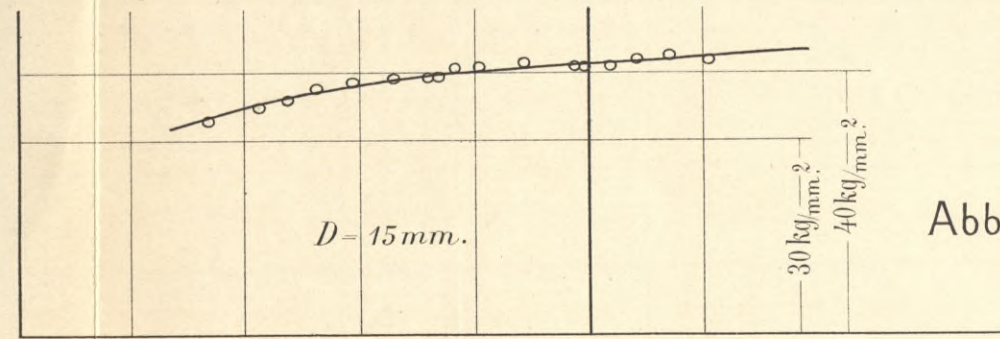


Abb. 3.

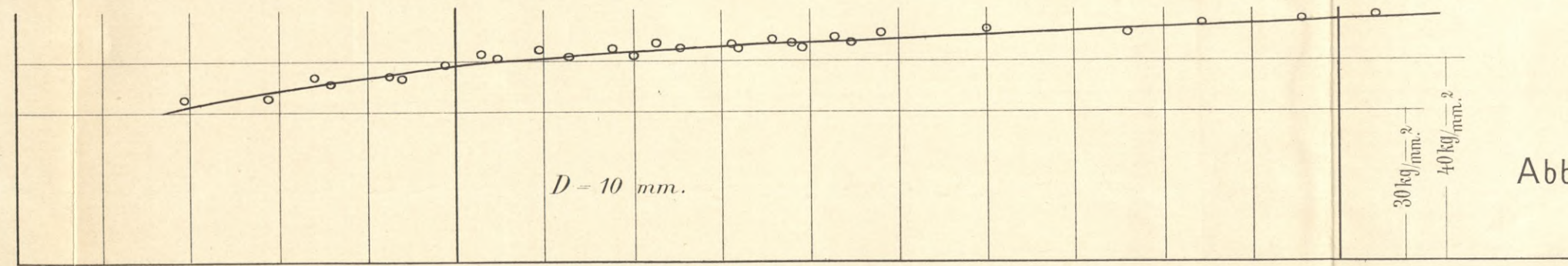


Abb. 4.

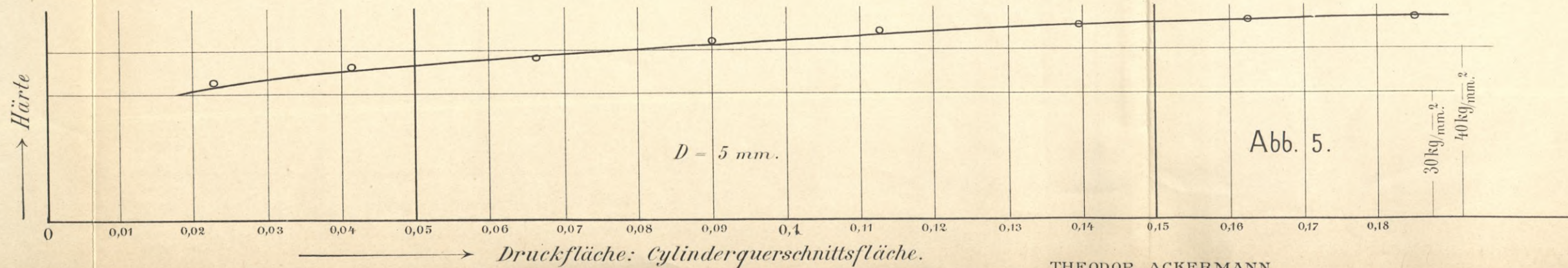


Abb. 5.

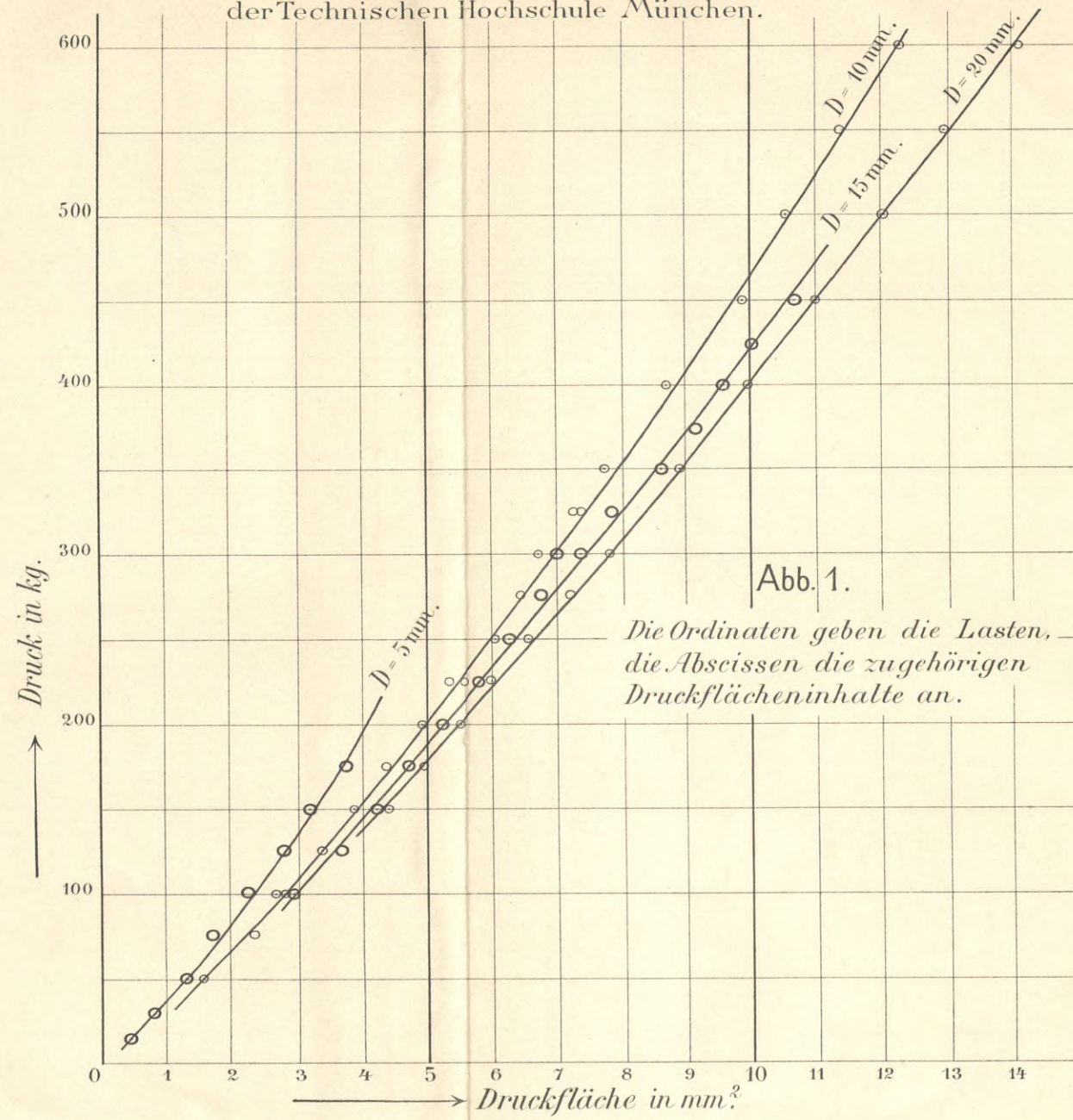


Abb. 1.

Die Ordinaten geben die Lasten, die Abscissen die zugehörigen Druckflächeninhalte an.

Logarithmische Darstellung.
Die Ordinaten geben die Logarithmen der Druckflächendurchmesser, die Abscissen die Logarithmen der zugehörigen Lasten an.

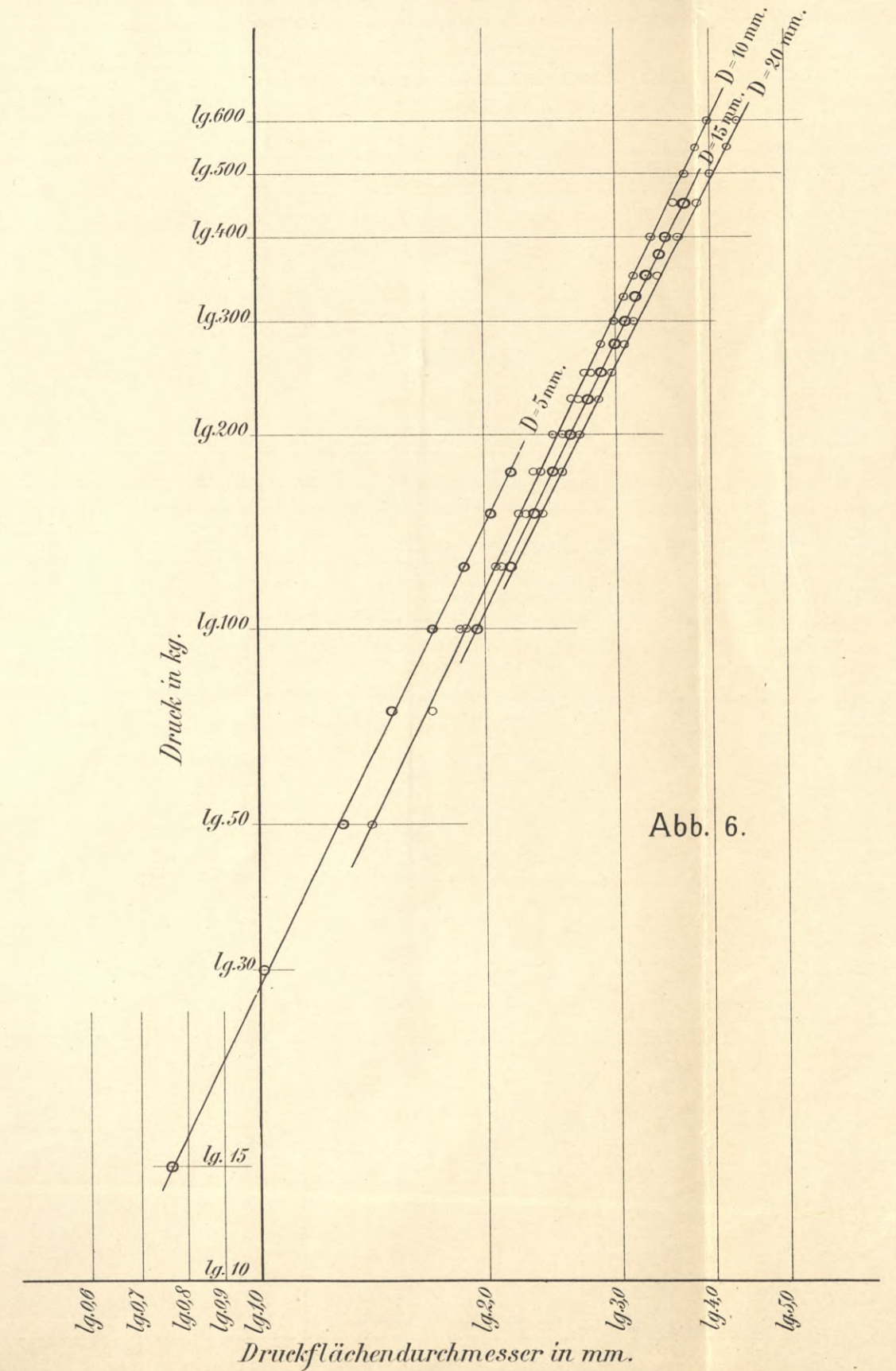
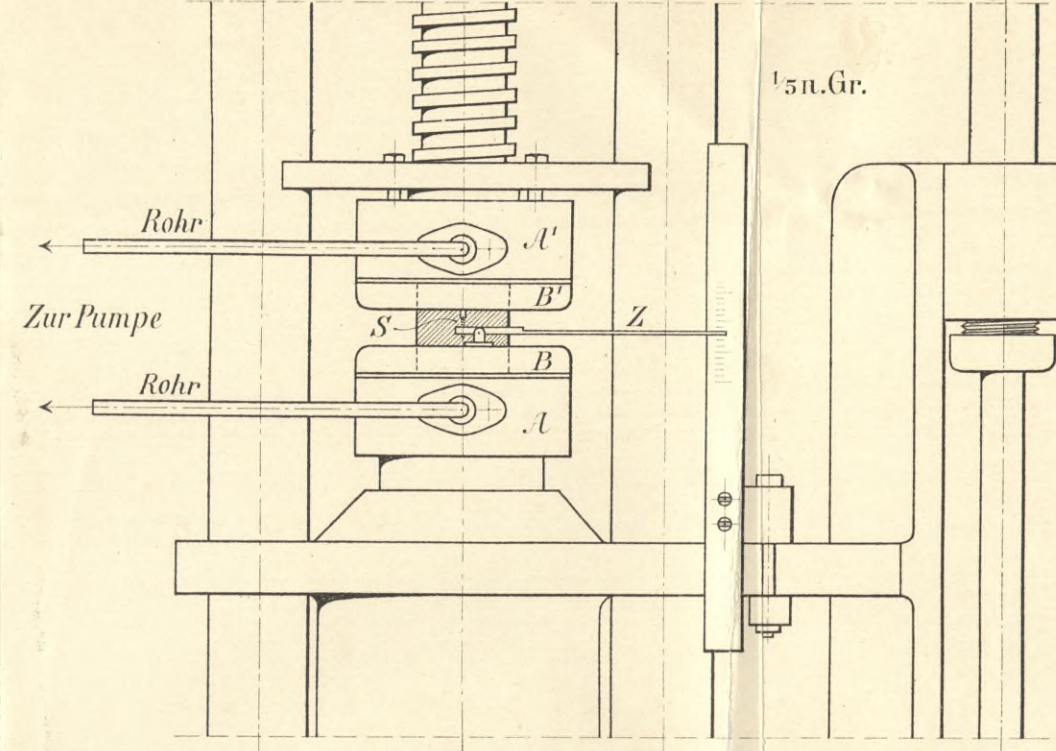


Abb. 6.

S. 61

Abb.3. Apparat in die Amslersche Prüfungsmaschine eingebaut.



Druckversuche mit Wasserkissen.

Abb.1. Gummiball mit Schlauch.

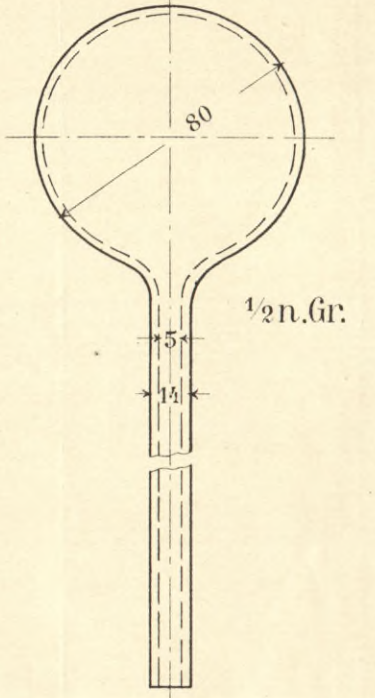
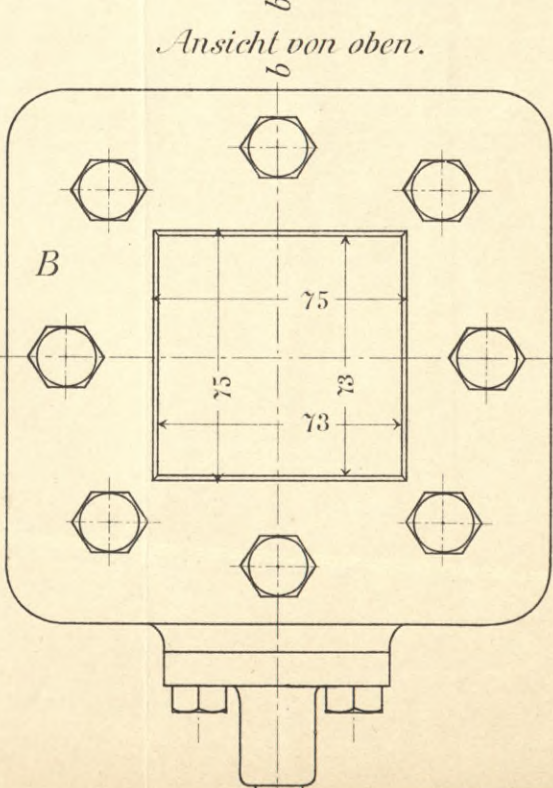
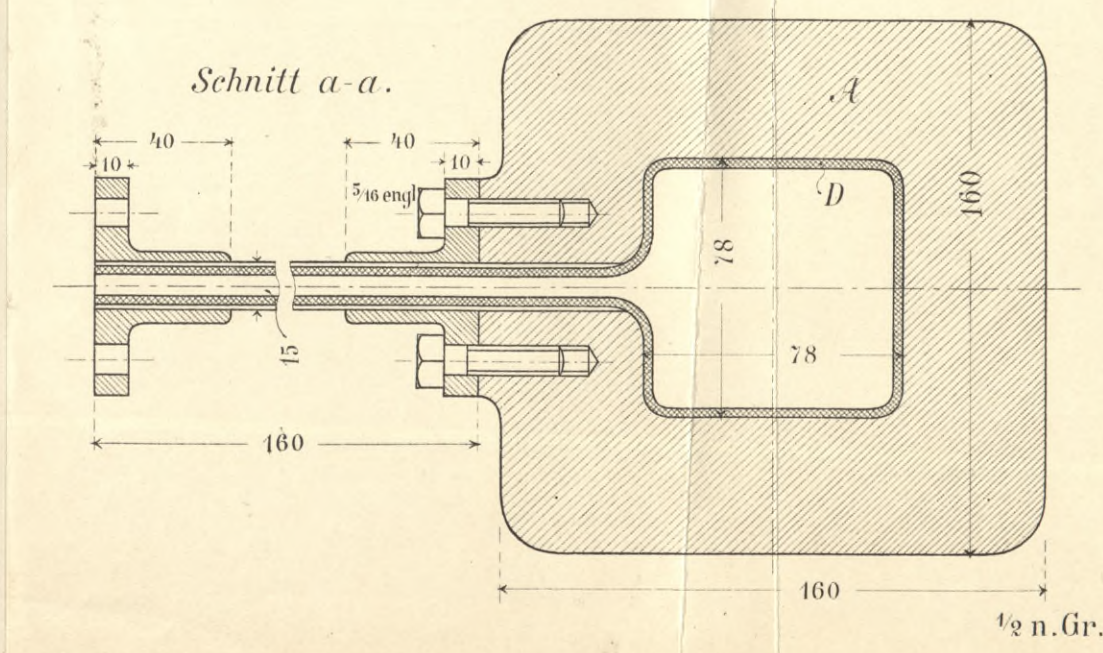
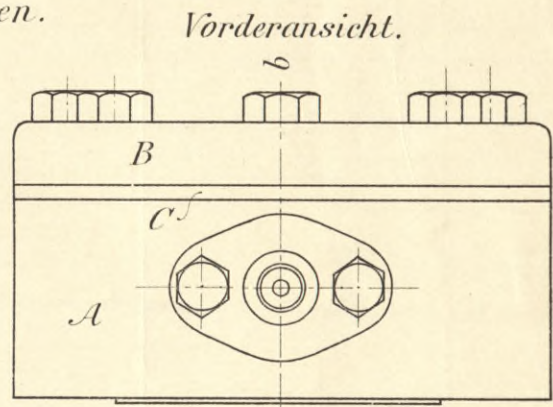
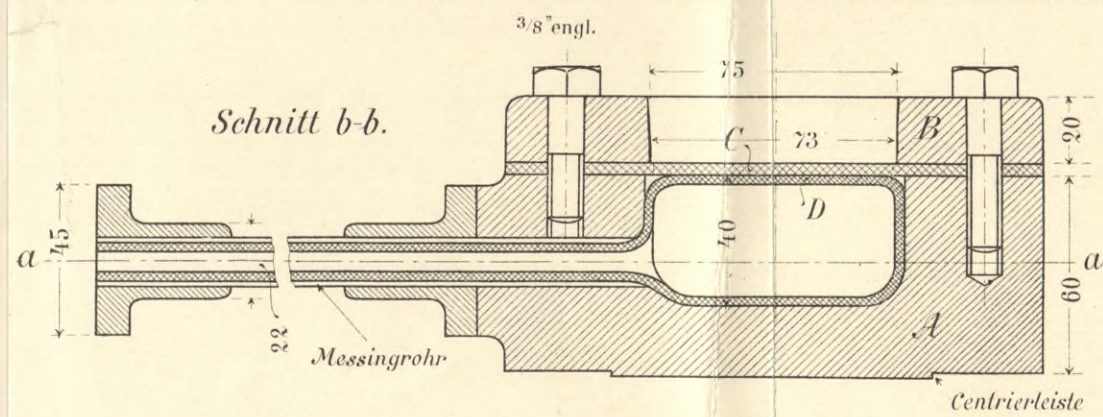


Abb.2. Unteres Wasserkissen.





Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315048

1895

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315049

1896

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315050

1897

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315051

1898

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315052

1900

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315053

1902

Biblioteka PK

J.X.47

/ 1894/1902

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300713

1894