

# Versuche

über die

# Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

**C. Bach,**

Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der K. Technischen Hochschule zu Stuttgart.

---

## Heft 2.

Die Berechnung flacher, durch Anker oder Stehbolzen unterstützter Kesselwandungen, und die Ergebnisse der neuesten hierauf bezüglichen Versuche.

Die auf der kaiserlichen Werft in Danzig von 1887 bis 1892 ausgeführten Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Flammrohren.

Mit 56 in den Text gedruckten Abbildungen und 2 Tafeln.



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH  
1894.

# Versuche

über die

## Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

**C. Bach,**

Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der K. Technischen Hochschule zu Stuttgart.

---

### Heft 2.

Die Berechnung flacher, durch Anker oder Stehbolzen unterstützter Kesselwandungen, und die Ergebnisse der neuesten hierauf bezüglichen Versuche.

Die auf der kaiserlichen Werft in Danzig von 1887 bis 1892 ausgeführten Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Flammrohren.

---

Mit 56 in den Text gedruckten Abbildungen und 2 Tafeln.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1894

**Sonderabdruck**

aus der

**Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1894.**

**Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>.**

ISBN 978-3-662-32464-6      ISBN 978-3-662-33291-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-33291-7

# Die Berechnung flacher, durch Anker oder Stehbolzen unterstützter Kesselwandungen und die Ergebnisse der neuesten hierauf bezüglichen Versuche.

## 1) Angaben der Hamburger Normen 1891.

Diese den Vorschriften vom Bureau Veritas (Klassifikation und Bau von Schiffen) entnommenen Bestimmungen setzen für ebene Kesselwandungen Folgendes fest:

$$s = e \sqrt{\frac{p c}{K_z}} + c_1 \dots \dots \dots (1)$$

oder

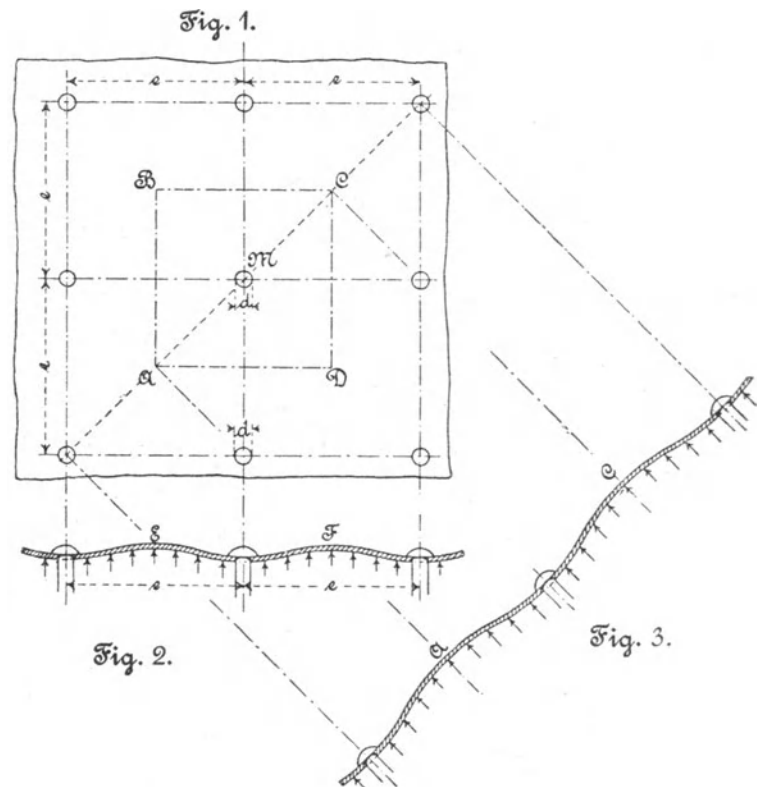
$$p = \left(\frac{s - c_1}{e}\right)^2 \frac{K_z}{c} \dots \dots \dots (2).$$

Hierin bedeutet:

- $p$  den größten Betriebsüberdruck in kg/qcm,
- $e$  den Abstand der Anker- oder Stehbolzenachsen von einander (die Teilung) in cm,
- $s$  die Blechstärke in cm,
- $K_z$  die Zugfestigkeit des Materials der Wandung in kg/qcm,
- $c$  eine Konstante, welche zu wählen ist:
  - 1,47, wenn die Anker oder Stehbolzen in die Platten eingeschraubt und vernietet sind,
  - 1,146, wenn sie in die Platten eingeschraubt und außen mit Muttern versehen sind,
  - 1,085, wenn sie in die Platten eingeschraubt und innen sowie außen mit Muttern und Unterlegscheiben versehen sind, deren Durchmesser wenigstens  $0,4 e$  beträgt; die Stärke der Unterlegscheiben muss hierbei mindestens  $\frac{2}{3} s$  sein und ist noch zu erhöhen, falls der Durchmesser der Scheiben mehr als das 1,5fache des über die Ecken gemessenen Durchmessers der Muttern beträgt,
  - 0,962, wenn die Anker oder Stehbolzen zu beiden Seiten der Platte mit Muttern und Unterlegscheiben versehen sind, die äußere Unterlegscheibe mit der Platte vernietet ist und eine Stärke von wenigstens  $\frac{3}{4} s$  sowie einen Durchmesser von wenigstens  $0,6 e$  besitzt,
- $c_1$  eine Zuschlaggröße, die zu wählen ist:
  - 0,15 cm, wenn die Platte an der einen Seite mit den Heizgasen, an der anderen Seite mit dem Wasser in Berührung steht,
  - 0,30 cm, wenn die Platte an der einen Seite mit den Verbrennungsprodukten und an der anderen Seite mit Dampf in Berührung kommt, ohne dass die Platten durch Flammbleche geschützt sind,
  - 0, wenn die Platten von den Heizgasen nicht berührt werden, z. B. Domböden, freiliegende Stirnplatten usw.

## 2) Rechnung des Verfassers.

Verfasser pflegt bei Bildung quadratischer Felder durch die Unterstützung der Anker oder Stehbolzen, wie in Fig. 1 angenommen ist, in folgender Weise zu rechnen.



a) Befestigung der Anker (Bolzen) nach Fig. 4.

$$k_b = \frac{1}{4} \frac{1}{1 - 0,7 \frac{d}{e}} \left(\frac{e}{s}\right)^2 p \dots \dots \dots (3)$$

oder

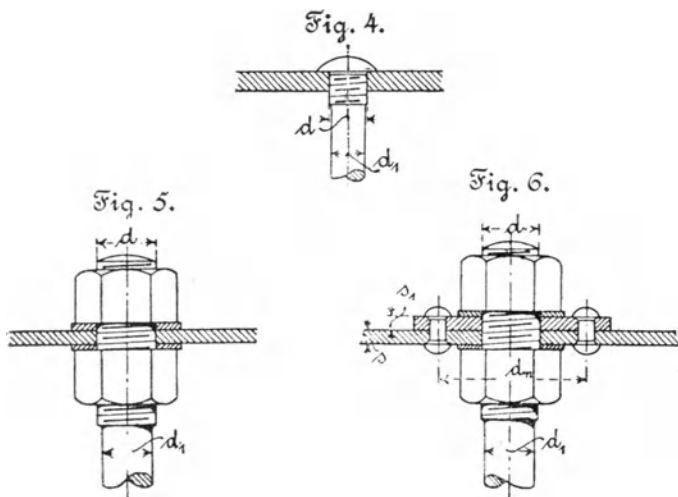
$$p = 4 \left(1 - 0,7 \frac{d}{e}\right) \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \dots \dots \dots (4).$$

b) Befestigung der Anker nach Fig. 5.

$$k_b = \frac{1}{4} \frac{1 - 1,8 \frac{d}{e}}{1 - 0,7 \frac{d}{e}} \left(\frac{e}{s}\right)^2 p \dots \dots \dots (5)$$

oder

$$p = 4 \frac{1 - 0,7 \frac{d}{e}}{1 - 1,8 \frac{d}{e}} \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \dots \dots \dots (6).$$



c) Befestigung der Anker nach Fig. 6.

$$k_b = 1/4 \left(1 - 0,9 \frac{d_n}{e}\right) \left(\frac{e}{s}\right)^2 p \quad \dots (7)$$

oder

$$p = 4 \frac{1}{1 - 0,9 \frac{d_n}{e}} \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \quad \dots (8)$$

Hierin haben  $p$ ,  $e$ ,  $s$ ,  $d$  und  $d_n$  die oben unter Ziffer 1) angegebenen, bzw. aus den Fig. 1 bis 6 ersichtlichen Bedeutungen, außerdem bezeichnet

$k_b$  die eintretende, bzw. zulässige Biegeanstrengung des Plattenmaterials.

Zu den Wandstärken  $s$ , welche die Gl. (3) bis (8) liefern, ist je nach den Einflüssen, die auf Abnutzung der Platte hinwirken, noch eine GröÙe, eintretendenfalls den Angaben für  $c_1$  unter Ziff. 1) entsprechend, hinzuzufügen.

Die Gl. (3) bis (8) können rasch auf folgendem Wege abgeleitet werden.

Der Anker  $M$ , Fig. 1, erscheint belastet durch das gepresste Feld  $ABCD$  von der GröÙe  $e^2 - \frac{\pi}{4} d^2$ , somit durch die Kraft  $(e^2 - \frac{\pi}{4} d^2) p$ <sup>1)</sup>. Ist  $d_1$  der kleinste Durchmesser des Ankers (Bolzens) (vergl. Fig. 4 bis 6), so beträgt des letzteren Zuganspruchnahme

$$\sigma_z = \frac{(e^2 - \frac{\pi}{4} d^2) p}{\frac{\pi}{4} d_1^2} = \infty \frac{e^2 p}{\frac{\pi}{4} d_1^2} \quad \dots (9)$$

da  $\frac{\pi}{4} d^2$  verhältnismäßig klein gegenüber  $e^2$  zu sein pflegt.

Das zum Anker  $M$  gehörige Feld  $ABCD$  denken wir uns herausgeschnitten, durch  $p$  belastet und vom Anker in der Mitte gehalten. Für die Bruchlinie nach der Diagonale ( $AC$  oder  $BD$ ) ergibt sich alsdann das biegende Moment, herrührend von der Flüssigkeitspressung,

$$1/2 e^2 p \cdot 1/3 e \sqrt{1/2} = \frac{\sqrt{2}}{12} e^3 p.$$

Infolge des in Wirklichkeit vorhandenen Zusammenhanges des Feldes mit der ganzen Platte erscheint dasselbe am Umfang  $ABCD$  wie eingespannt, derart, dass die Biegelinie daselbst einen oberen Kulminationspunkt besitzt, wie Fig. 2 und 3 erkennen lassen. Hierdurch wird das Moment in bezug auf den in betracht gezogenen Bruchquerschnitt  $AC$  oder  $BD$  vermindert. Demgemäß ist das oben ermittelte Moment mit einer Zahl  $\mu < 1$  zu multiplizieren, und zu setzen

$$\frac{\sqrt{2}}{12} e^3 p \mu = 1/6 k_b (e \sqrt{2} - d) s^2 \quad \dots (10).$$

<sup>1)</sup> Die Anker der Randfelder, d. h. derjenigen Felder, welche an einem Teile ihres Umfanges durch Niete oder Schrauben in kurzen Abständen gestützt werden, sind bei dem gleichen Werte von  $e$  den Verhältnissen entsprechend geringer belastet.

Hierin wird alsdann der GröÙe  $\mu$  ganz allgemein der Charakter eines aus Versuchen abzuleitenden Berichtigungskoeffizienten beizulegen sein, bestimmt, auch sonstige Abweichungen der Wirklichkeit von den Voraussetzungen der Rechnung zu berücksichtigen<sup>1)</sup>. Auf grund des mir bis jetzt vorliegenden Versuchsmaterials setze ich  $\mu = 1/2$ , womit Gl. (10) übergeht in

$$\frac{\sqrt{2}}{8} e^3 p = 1/2 k_b (e \sqrt{2} - d) s^2,$$

$$e^2 p = 4 \left(1 - 0,7 \frac{d}{e}\right) k_b s^2,$$

woraus sich die Gl. (3) und (4) unmittelbar ergeben.

Bei der Befestigung der Anker nach Fig. 5 (beiderseits Müttern und schwache Unterlegscheiben) vermindert sich das Moment des Flüssigkeitsdruckes des halben Feldes  $ABC$ , Fig. 1, in bezug auf die Bruchlinie  $AC$  dadurch in erheblichem Maße, dass die halbe Ankerkraft  $0,5 e^2 p$  nach Maßgabe der Auflagerfläche der Mutter dem Momente der Flüssigkeitspressung in bezug auf den Bruchquerschnitt entgegenwirkt<sup>2)</sup>. Wird mit Näherung angenommen, dass diese Kraft im Schwerpunkte des Halbkreises vom Durchmesser  $2d$ , also im Abstände  $\frac{4d}{3\pi} = 0,42 d$  angreift, so tritt an die Stelle der Gl. (10)

$$1/2 e^2 p (1/3 e \sqrt{1/2} - 0,42 d) \mu = 1/6 k_b (e \sqrt{2} - d) s^2, \quad \dots (11),$$

woraus mit  $\mu = 1/2$  zunächst

$$e^2 p \left(1 - 1,8 \frac{d}{e}\right) = 4 \left(1 - 0,7 \frac{d}{e}\right) k_b s^2$$

sich ergibt, welche Beziehung sodann unmittelbar die Gl. (5) und (6) liefert.

Wird der Anker nach Fig. 6 befestigt (die Platte ist außen durch eine aufgenietete Scheibe, deren Stärke der Plattendicke nahezu gleichkommt, verstärkt, sonst aber wie im Falle der Fig. 5 beiderseits mit Müttern und Unterlegscheiben versehen), so findet außer der im vorigen Falle, Fig. 5, besprochenen Verminderung des biegenden Moments, die hier gleich  $0,5 e^2 p \frac{2d_n}{3\pi} = 0,5 e^2 p 0,21 d_n$  gesetzt werden soll, noch eine Verstärkung des Bruchquerschnittes statt. Diese werde in der Weise berücksichtigt, dass die Verminderung des Bruchquerschnittes durch das Ankerloch, d. h. um die Fläche  $ds$ , außer acht gelassen wird<sup>3)</sup>. Somit

<sup>1)</sup> Vergl. hierüber auch des Verfassers »Versuche über die Widerstandsfähigkeit ebener Platten«, Berlin 1891 S. 12, S. 98 u. f. sowie dessen »Maschinenelemente«, Stuttgart 1891/92 S. 31 u. f., S. 521 u. f.

<sup>2)</sup> Streng genommen ist allerdings auch bei der Anordnung Fig. 4 eine solche Gegenwirkung vorhanden; doch beträgt sie hier weit weniger und soll aus diesem Grunde sowie mit Rücksicht darauf, dass das Plattenmaterial infolge des Gewinneschneidens und Vernietens hinsichtlich seiner Zähigkeit leidet (vergl. Fig. 9), vernachlässigt werden. Will man sie trotzdem in Rechnung stellen, was z. B. für angezeigt erachtet werden kann, wenn es sich um Bolzenstärken  $d$  handelt, die verhältnismäßig groß gegenüber  $e$  sind, so ist derselbe Weg zu beschreiten, der zur Gl. (11) führt. Mit der Feldbelastung  $(e^2 - \frac{\pi}{4} d^2) p$  und unter der Annahme, dass der Angriffspunkt der halben Bolzenkraft im Schwerpunkte des Halbkreises vom Durchmesser  $d$  (äußerer Gewindedurchmesser), also im Abstände  $\frac{2d}{3\pi} = 0,21 d$  gelegen ist, findet sich

$$1/2 (e^2 - \frac{\pi}{4} d^2) p (1/3 e \sqrt{1/2} - 0,21 d) \mu = 1/6 k_b (e \sqrt{2} - d) s^2$$

und hieraus

$$k_b = \frac{\mu}{2} \frac{\left[1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{e}\right)^2\right] \left(1 - 0,9 \frac{d}{e}\right)}{1 - 0,7 \frac{d}{e}} \left(\frac{e}{s}\right)^2 p.$$

In diese Gleichung wäre der aus Versuchen zu bestimmende Koeffizient  $\mu$  natürlich größer einzuführen als in Gl. (10).

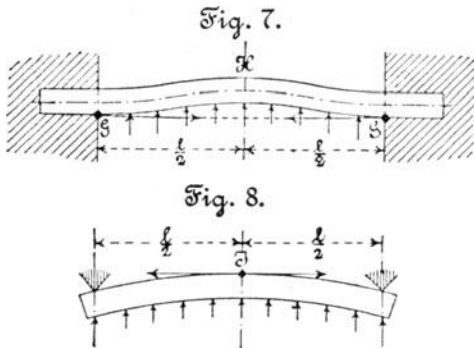
<sup>3)</sup> In Wirklichkeit wird der Einfluss dieser Verstärkung bei einer Dicke der aufgenieteten Scheibe von etwa  $3/4 s$  und darüber ein größerer sein. Er könnte durch Ermittlung der Vergrößerung,

$\frac{1}{2} e^2 p \left( \frac{1}{3} e \sqrt{\frac{1}{2}} - 0,21 d_n \right) \mu = \frac{1}{6} k_b e \sqrt{2} s^2$  . (12),  
woraus nach Einführung von  $\mu = \frac{1}{2}$

$$e^2 p \left( 1 - 0,9 \frac{d_n}{e} \right) = 4 k_b s^2$$

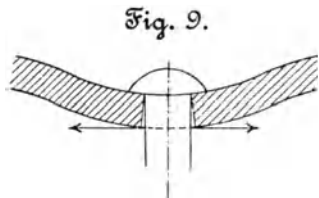
und sodann die Gl. (7) und (8) sich ergeben.

Dass die elastischen Linien zwischen den Stützstellen Wendepunkte haben, lassen die Fig. 2 und 3 deutlich erkennen. Die Sache liegt hier ähnlich wie bei einem an den Enden eingespannten, gleichmäßig über seine Länge belasteten Stab, Fig. 7. Dieser ist an der Einspannstelle am stärksten beansprucht, d. h. in den Befestigungsstellen, und nicht etwa in dem Punkte der größten Durchbiegung; es beträgt bekanntlich das biegende Moment für die Einspannungsquerschnitte bei  $GG$ , Fig. 7,  $\frac{pl^2}{12}$ , dagegen für den mittleren Querschnitt bei  $H$   $\frac{pl^2}{24}$ ; somit ist — bei symmetrischem



Qerschnitt in bezug auf die Nullachse — die Anstrengung in den ersteren Querschnitten doppelt so hoch wie bei dem letzteren Querschnitt. Da die gezogenen Fasern die empfindlicheren zu sein pflegen, so erscheint im Einspannungsquerschnitt  $G$  die unterste Faser als die gefährdetste. Bei einem frei aufliegenden Stabe, wie in Fig. 8 dargestellt, tritt das größte biegende Moment  $\frac{pl^2}{8}$  im Punkte der größten Durchbiegung bei  $J$  auf.

Dem Gesagten entsprechend sind im Falle der Fig. 1 bis 3 die Stützstellen die am stärksten beanspruchten, und nicht etwa die Stellen größter Durchbiegung ( $E, F$ , bzw.  $A, C$  in Fig. 2 und 3). Dabei erweisen sich die inneren, von der gepressten Flüssigkeit bespülten Fasern als die gefährdetsten, wie in Fig. 9 hervorgehoben ist<sup>1)</sup>. Die Betrachtung der letzteren führt auch zu der Erkenntnis, dass die Verstärkung der Platte durch Aufnietung einer Scheibe an der Ankerstelle, wie solche



in Fig. 6 angenommen, eine verhältnismäßig wirksame sein muss. (Vergl. Fußbemerkung 3, S. 2.)

welche das Trägheitsmoment des Bruchquerschnitts durch die Aufnietung der Scheibe erfährt, eine schärfere Berücksichtigung erfahren, die dann namentlich auch die Bedeutung der Scheibendicke erkennen lassen würde. Im Interesse der Einfachheit der Rechnung, sowie in anbetracht, dass eine geringere Wertung der Verstärkung im Sinne des Zweckes unserer technischen Rechnungen liegt, wurde in obiger Weise verfahren. Versuche werden hiernach allerdings ergeben müssen, dass die Widerstandsfähigkeit der Platte bei der Verbindung Fig. 6, gemessen durch Gl. (7) bzw. (8), in Wirklichkeit eine größere ist, als diejenige bei der Befestigung nach Fig. 5, berechnet aus Gl. (5) bzw. (6).

<sup>1)</sup> Auf diese Sachlage muss umso mehr aufmerksam gemacht werden, nachdem die irrtümliche Clark'sche Berechnungsweise ebener Wandungen in neuester Zeit auch in die deutsche Litteratur (Häder, Bau und Betrieb der Dampfkessel, 1893, S. 78 u. f.) übergegangen ist. Nach derselben wird die Widerstandsfähigkeit der ebenen Wand proportional der ersten Potenz von  $s$  und umgekehrt proportional der ersten Potenz von  $e$  gesetzt.

Die von mir 1889/90 über die Widerstandsfähigkeit ebener Platten durchgeführten Versuche weisen, ganz abgesehen von dem, was die Ueberlegung lehrt, deutlich die Unzulässigkeit dieser Rechnungsweise nach. Ich behalte mir vor, bei anderer Gelegenheit auf die Fehler der Clark'schen Entwicklungen zurückzukommen.

### 3) Versuchsergebnisse aus neuester Zeit.

Seit Veröffentlichung meiner Versuche über die Widerstandsfähigkeit zweier durch Stehbolzen unterstützter Wasserkammerplatten von Wasserröhrenkesseln<sup>1)</sup> sind die Ergebnisse der von der kaiserlichen Werft in Danzig ausgeführten »Versuche mit flachen, durch Anker versteiften Kesselwandungen« der Öffentlichkeit übergeben worden. Das hohe Interesse, welches nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnisse an diesen Versuchen naturgemäß allgemein genommen wird, lässt ihre eingehende Erörterung an dieser Stelle angezeigt erscheinen, und zwar soll dies in der Weise geschehen, dass zunächst über die Versuche berichtet, sodann ihre Ergebnisse besprochen und in Vergleich gestellt werden mit den unter Ziff. 1 und 2 behandelten Berechnungsweisen flacher durch Anker (Stehbolzen) unterstützter Wandungen. Dabei wird sich zeigen, dass die Versuchsergebnisse eine Richtigstellung des Wertes der beiden Ankerbefestigungen Fig. 5 und 6 zu einander, sowie Prüfung der unter Ziff. 2 besprochenen Rechnungsweise und teilweise Berichtigung des daselbst eingeführten Koeffizienten  $\mu$  ermöglichen. Mit Rücksicht hierauf und ganz abgesehen von dem, was sich von den Ergebnissen unmittelbar übertragen lässt, hat die Technik — Wissenschaft wie Ausführung — und die an der Sicherheit des Kesselbetriebes interessierte Allgemeinheit der Verwaltung der Reichsmarine dafür zu danken, dass sie diese Versuche hat anstellen und veröffentlichen lassen. Dieselben lassen übrigens erkennen, welcher Aufwand an Zeit und Geld<sup>2)</sup> erforderlich ist, um auf dem hier zur Erörterung stehenden Gebiete einen Fortschritt zu zeitigen.

#### a) Anzahl der Versuche, Versuchseinrichtungen, Durchführung der Versuche.

Die Versuche, in der Zeit von 1884 bis 1892 durchgeführt, erstrecken sich, wenn von den Bodenplatten des Versuchscylinders abgesehen wird, auf 14 verankerte Platten in Scheibenform von rund 9 bis 18 mm Stärke bei 1476 mm Dmr. des Kreises, auf dem die Mitten der Löcher für die Schrauben liegen, welche zur Befestigung der Platten mit der Flansche des Versuchscylinders dienen.

Fig. 10 bis 12 zeigen den Versuchskörper, und zwar die Anordnung für den mit IIIa bezeichneten Versuch.

Fig. 13 stellt den Körper dar, wie er sich nach Beendigung des Versuches ergab, insbesondere zeigt die Figur die Formänderung der Versuchs- und der Bodenplatte, sowie die Verlängerung der Anker. Diese Abbildung lässt auch gleichzeitig die Einrichtungen erkennen, welche zum Messen der Durchbiegungen getroffen waren.

Der Versuchscylinder, seitens der Firma Fried. Krupp in Essen aus geschmiedetem Martinstahl für Pressungen bis zu 80 kg/qcm gefertigt, ist innen sowie außen abgedreht und mit den erforderlichen Ein- und Austrittsöffnungen für Wasser und Luft versehen.

Bei jedem Versuch war der Cylinder an dem einen Ende durch die Versuchsplatte, an dem anderen Ende durch die stärkere und mit Mannloch versehene Bodenplatte abgeschlossen. Im Falle der Fig. 10 beträgt die Stärke der ersten Platte 16 mm, diejenige der letzteren 26 mm. Die Größe des Mannloches ist  $400 \times 270$  mm. Beide Platten waren mit den Flanschen des Cylinders durch 52 Stahlschrauben von 38 mm ( $1\frac{1}{2}$  engl.) Dmr. verbunden und an der Auflagefläche abgedreht. Der außen auf den Scheiben aufgelegte Ring von 104 mm Breite, gegen den die Muttern der Flanschschrauben pressen, bezweckt Sicherung der Abdichtung und Befestigung.

Die Dichtung der Scheiben gegen die Flanschen des Cylinders einerseits und den Verstärkungsring andererseits erfolgte durch Mennigkitt, bei den letzten Versuchen durch einen geschlossenen Gummiring mit eingewirkter Drahtgaze. Zum

<sup>1)</sup> Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen, Heft 1, Wasserkammerplatten von Wasserröhrenkesseln, Berlin 1893, Julius Springer, oder auch Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1893, S. 489 u. f.

<sup>2)</sup> Die Kosten dieser Versuche sind auf mindestens 60 000 M zu schätzen.

Fig. 10.

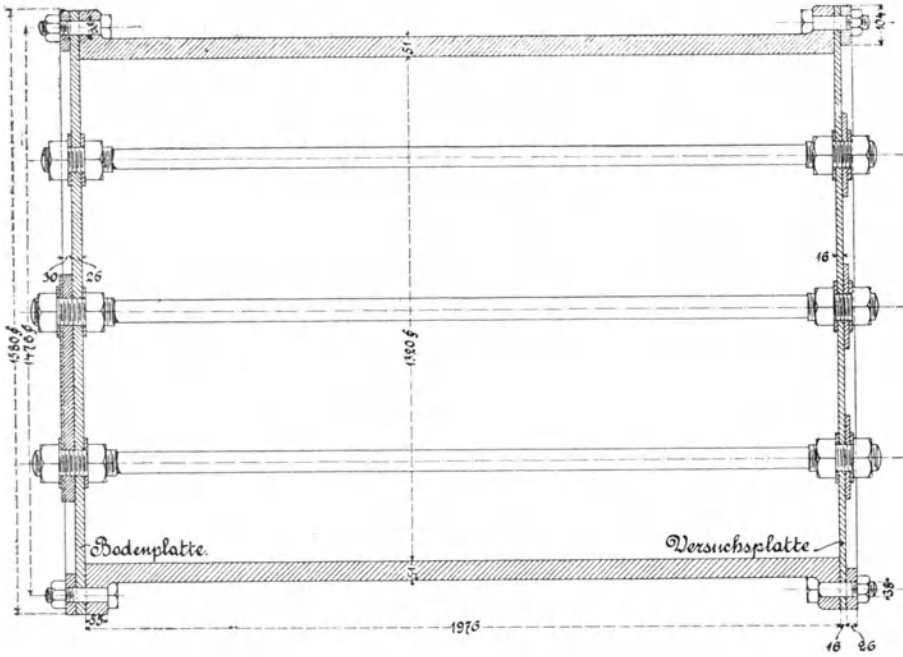


Fig. 11.

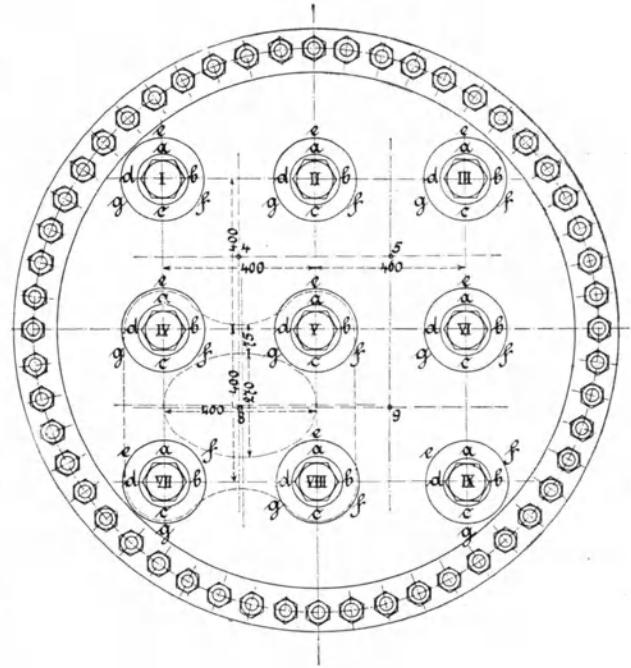


Fig. 12.

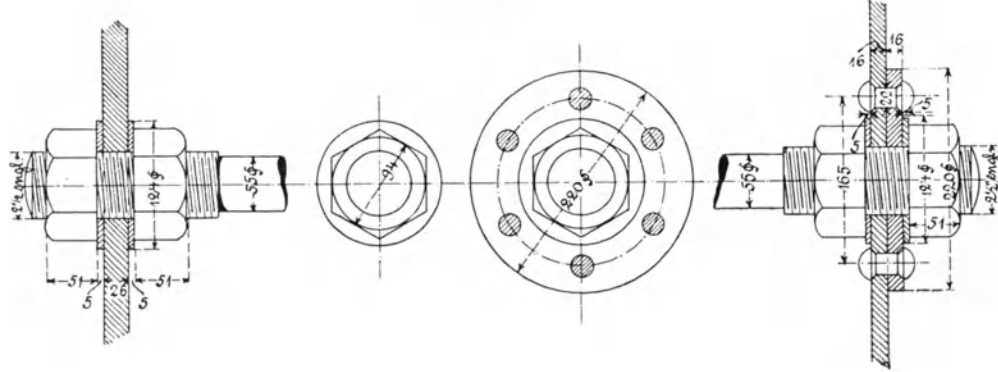
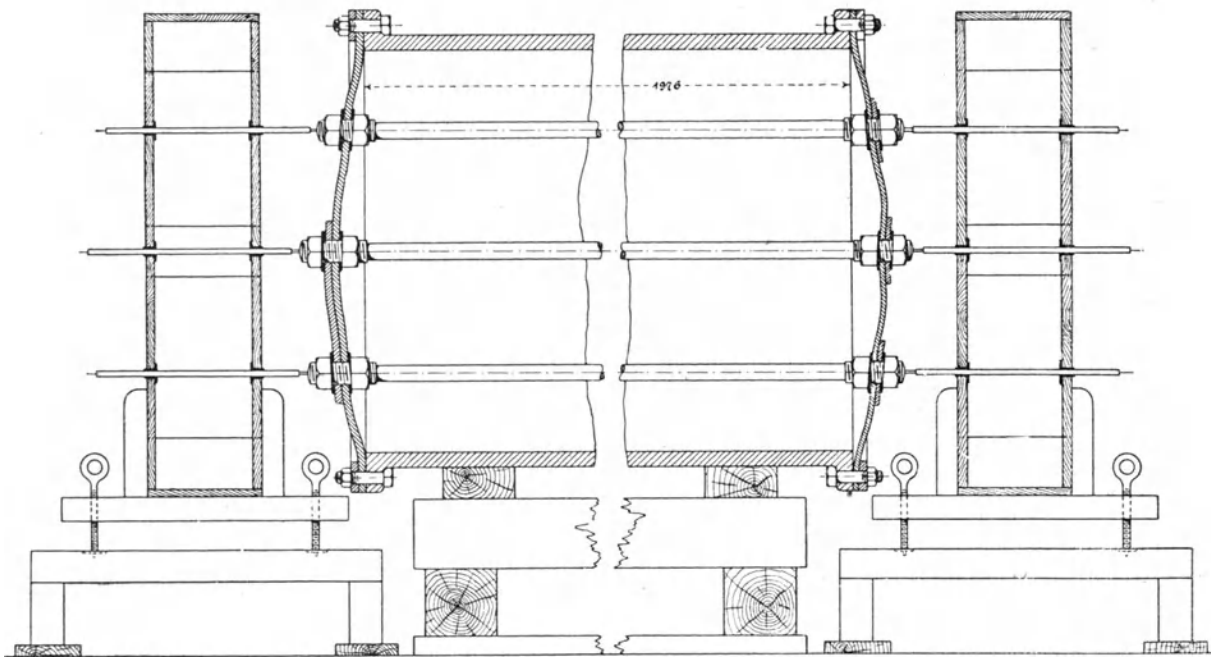


Fig. 13.



Trocknen der Mennigdichtung waren durchschnittlich 6 Tage erforderlich. Jede Flanschschraube wurde mit Hanfumwicklung und Mennigkitt gedichtet.

Die Anker waren über die ganze Länge sauber abgedreht und an jeder der beiden Platten nach Maßgabe der Fig. 5 (ohne Verstärkung der Platte) oder der Fig. 6 (mit aufgenieteter Verstärkung der Platte) durch innere und äußere Mutter nebst Unterlegscheibe befestigt. Die Dichtung der Ankerbefestigungsstelle erfolgte ebenfalls durch Mennigkitt mit Hanfumwicklung.

Die Vorrichtung zum Messen der Durchbiegungen der Versuchs- und Bodenplatte, Fig. 13, bestand aus zwei flachen, an beiden Enden des Cylinders normal zu dessen Achse vorgesetzten Holzkasten, welche behufs genauen Ausrichtens auf 4 Stellschrauben ruhten und an den flachen Wänden mit einer Anzahl vierkantiger bronzener Führungshülsen versehen waren. Letztere dienten zur Aufnahme wagrecht verschiebbarer, hölzerner Stäbe, welche an dem dem Versuchscylinder zugewendeten Ende in eiserne Spitzen ausliefen und die zu messenden Punkte der Anker und der Platte berührten. Die Stäbe wurden durch die Dehnung der Anker und durch die Durchbiegung der Platte verschoben; das Maß der jedesmaligen Verschiebungen wurde an den äußeren vorstehenden Enden der Stäbe angezeichnet.

Diese Messvorrichtung bezw. diese Ermittlung der Durchbiegungen erscheint — selbst bei großer Sorgfalt des Beobachters — nicht ganz geeignet, die Gewinnung ausreichend zuverlässiger Zahlen sicher zu stellen.

Bei sämtlichen Versuchen wurde der Druck in dem ganz mit Wasser gefüllten Cylinder stufenweise, und zwar in der Regel von 5 zu 5 kg/qcm gesteigert, bis infolge zu großer Undichtheiten und Brüche eine weitere Steigerung sich als

unmöglich erwies. Zur Beobachtung der Wasserpressung dienten zwei an den Versuchscylinder angeschlossene Manometer.

Das benutzte Pumpwerk bestand aus 6 einfach wirkenden Pumpen, derart angeordnet, dass an den Hebeln gleichzeitig bis 40 Mann angestellt werden konnten. Dies war dann erforderlich, wenn bei hoher Pressung (50 kg/qcm und darüber) aus Anlass von Undichtheiten ein großer Wasserverlust eintrat, der durch möglichst rasches Arbeiten mit allen Pumpen ausgeglichen werden sollte.

#### b) Versuchsergebnisse.

Wir greifen zunächst diejenigen Versuche heraus, bei denen alle Anker in den Ecken quadratischer Felder angeordnet waren, und beginnen mit der ersten hierher gehörigen

#### Platte IIa, Fig. 14 bis 17.

Fig. 15 lässt die Verteilung der 12 Anker, bezeichnet mit I, II, III bis XII, in Abständen von 350 mm erkennen, ebenso Lage, Form und Größe des Mannloches in der Bodenplatte. Die Mittelpunkte der Felder sind durch kleine Kreise und die Zahlen 2, 4, 5, 6, 8 hervorgehoben. Fig. 16 stellt die Verbindung der Anker mit der Bodenplatte, und Fig. 17 diejenige mit der Versuchsplatte dar, welche letztere bei 14,4 mm durchschnittlicher Blechdicke je durch Aufnieten einer 14 mm starken Scheibe an den Stützstellen verstärkt ist.

Die Bodenplatte, welche eine Stärke von 23 mm aufweist, besitzt solche Verstärkungen nicht.

Ueber die Ergebnisse enthält der veröffentlichte Bericht die folgenden Angaben.

Fig. 14.

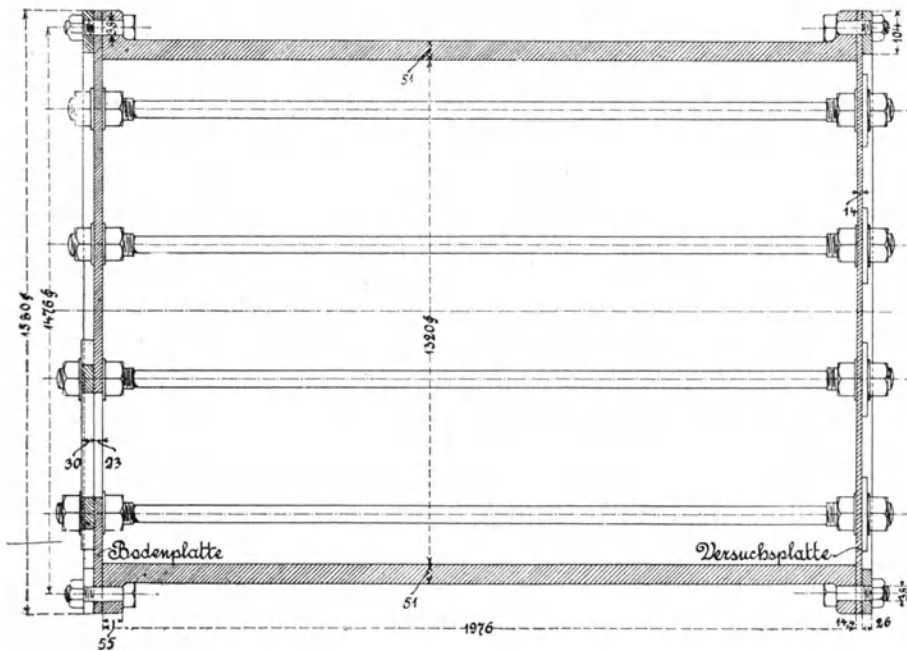


Fig. 15.

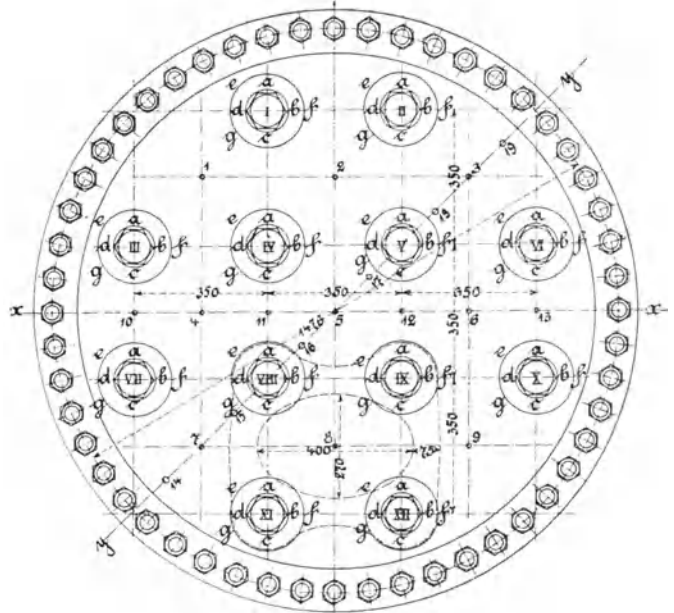


Fig. 16.

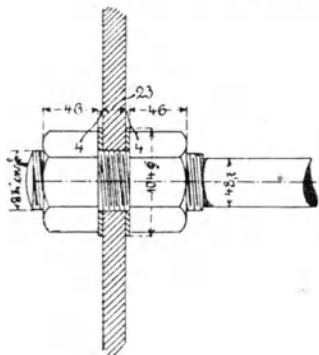
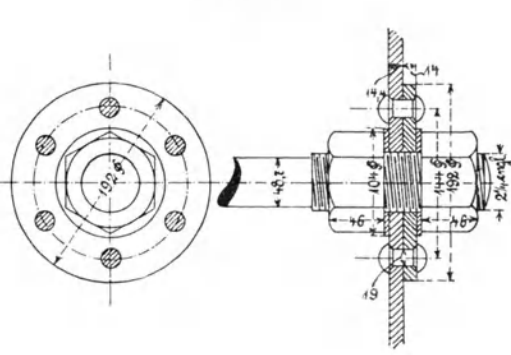


Fig. 17.





Messung der Durchbiegungen in mm { a. unter Druck.  
b. nach abgelassenem Druck.  
Versuchsplatte.

Druck kg/qcm	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
15	a	0,5	0,6	0,2	0,8	1,0	0,7	0,4	0,3	0,6	0,4	0,6	0,4	1,9	2,1	1,8	2,0	1,4	2,1	1,7	2,0	1,8	1,0	1,2	1,1	1,1	0,7	1,3	0,8	1,0	1,4	1,3
	b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	a	0,8	1,0	0,6	1,2	1,2	1,1	1,0	0,5	1,1	0,7	0,8	0,7	3,0	3,3	2,9	3,0	2,3	2,8	2,6	3,0	2,7	1,6	1,9	2,0	1,6	1,1	2,0	1,0	1,6	2,3	1,5
	b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,6	0,4	0,3	0,2	0,5	0,4	0,6	0,5	0	0,3	0,4	0	0	0,3	0	0,4	1,0	0,2
30	a	1,7	2,0	1,5	2,8	3,3	2,1	1,8	2,3	2,3	1,6	1,6	1,5	6,8	7,9	7,1	6,8	5,9	8,0	5,8	7,8	7,0	3,2	4,8	5,2	3,7	2,6	5,0	4,5	5,0	5,8	3,1
	b	0,5	1,0	0,3	1,5	2,6	0,4	0,6	1,1	1,8	0,6	0,3	0,5	3,4	4,2	3,9	3,2	3,6	4,5	2,5	4,2	4,0	1,4	3,0	3,3	1,4	1,0	2,6	2,8	3,0	3,3	1,6
40	a	2,2	3,1	2,7	16,5	18,8	2,8	2,7	17,5	19,2	3,5	2,0	2,2	18,1	23,9	20,1	22,7	31,0	25,6	16,5	26,0	21,0	8,3	25,1	26,1	9,0	6,4	18,9	25,8	26,0	20,1	8,2
	b	1,3	2,2	1,9	16,3	18,1	1,6	1,3	17,2	19,1	2,2	1,4	1,8	14,3	20,2	16,6	19,0	29,0	22,2	12,9	21,8	17,0	5,8	23,7	24,9	6,5	4,5	16,1	24,0	24,3	17,9	6,5
50	a	3,6	6,7	6,1	26,5	27,4	5,3	4,1	26,0	28,8	6,5	5,7	5,9	28,5	38,0	30,6	36,9	48,2	39,7	27,0	40,0	31,1	15,2	40,6	41,9	16,2	10,2	30,2	40,0	40,3	31,5	12,8
	b	2,0	5,9	5,0	26,0	27,2	4,7	3,7	25,9	28,7	6,0	5,0	5,4	25,6	34,5	27,4	33,3	46,6	37,0	23,8	36,5	28,2	12,7	39,2	40,3	14,3	8,5	27,8	39,6	39,7	29,2	11,6
60	a	4,2	10,7	9,1	34,1	35,8	10,0	8,2	34,0	37,8	10,1	10,9	11,6	36,0	48,4	37,9	47,5	61,1	50,6	35,4	50,9	39,5	22,0	52,4	53,8	23,6	13,8	39,7	52,9	52,5	41,0	16,1
	b	3,5	10,2	8,8	33,9	35,5	9,0	7,4	34,0	37,0	10,0	10,0	11,3	33,4	44,9	36,1	44,0	59,0	48,0	31,9	48,0	37,0	19,9	51,1	52,7	21,9	11,9	37,5	51,5	51,4	39,6	15,0
72	a	14,1	18,1	16,0	51,0	50,6	15,7	15,0	48,6	51,3	16,6	16,6	17,7	48,8	65,2	51,0	64,1	81,2	67,5	47,0	66,2	51,3	37,7	72,0	72,9	34,5	20,4	54,2	72,0	72,8	57,4	22,9
	b	13,3	16,3	14,3	49,4	49,0	14,8	14,5	46,9	50,7	15,1	15,0	16,5	45,0	61,3	47,0	60,0	78,1	62,6	43,2	62,0	47,5	30,9	70,3	70,3	32,0	17,6	51,3	69,8	69,7	54,1	20,8
76	a	17,2	19,5	19,0	55,2	55,4	18,0	16,7	53,5	57,5	18,5	19,0	19,7	52,4	71,0	55,0	69,3	88,8	72,4	51,1	72,0	55,6	38,0	79,1	80,2	38,3	22,8	59,5	79,1	79,0	62,4	25,0
	b	16,0	19,0	16,9	54,0	52,8	17,0	16,3	52,4	57,0	18,1	18,0	19,2	50,4	68,1	52,0	65,9	86,0	69,4	47,9	68,4	52,4	35,3	77,2	78,1	36,1	20,3	57,0	77,0	77,1	60,3	23,3

Bodenplatte.

15	a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,6	0,2	—	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	b	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0	0,5	0,4	1,0	0,5	1,0	0,5	0,4	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	b	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3	1,3	1,2	1,5	1,1	1,5	1,2	1,4	1,2	0,3	1,3	1,3	0,6	—	—	—	—	—	—
	b	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	a	1,0	1,3	1,0	7,5	8,0	1,0	1,2	8,0	8,1	1,2	1,7	2,2	4,3	7,0	4,8	7,5	11,0	8,5	4,1	5,7	4,8	2,6	10,0	10,0	3,0	—	—	—	—	—	—
	b	0,5	0,6	0	5,2	5,9	0	0,5	5,3	5,2	0,5	0,9	1,0	2,1	4,0	2,4	4,0	7,0	5,0	2,0	3,5	2,4	1,0	6,0	6,8	1,5	—	—	—	—	—	—
50	a	4,6	5,8	5,0	21,0	24,0	3,7	3,5	21,2	22,3	4,5	5,6	6,0	13,6	22,1	14,2	22,0	30,0	24,7	10,9	15,1	12,6	8,5	27,5	29,2	9,8	—	—	—	—	—	—
	b	3,5	4,0	3,8	20,0	21,1	2,6	2,4	18,3	18,8	3,7	4,4	4,4	10,1	17,9	11,1	17,8	26,0	20,3	8,6	12,0	10,0	5,9	23,2	25,0	7,5	—	—	—	—	—	—
60	a	9,1	11,2	9,1	33,6	35,5	8,4	6,8	35,0	35,4	9,2	10,0	10,9	22,0	35,8	24,5	34,0	45,1	38,1	19,1	24,1	22,3	13,5	41,4	43,5	17,0	—	—	—	—	—	—
	b	7,6	9,6	7,2	30,2	32,1	6,8	5,3	31,2	31,1	7,8	8,1	8,5	18,2	32,0	20,5	29,2	40,2	33,2	15,4	20,6	18,1	11,2	37,0	39,1	14,3	—	—	—	—	—	—
72	a	16,7	17,6	17,0	48,0	49,7	14,4	15,0	52,8	54,8	16,6	24,1	19,7	35,5	53,7	38,9	51,7	66,5	55,1	35,6	40,5	39,8	23,2	62,3	64,1	26,7	—	—	—	—	—	—
	b	14,2	16,1	14,1	45,9	46,3	12,5	12,0	51,3	51,0	13,5	18,2	17,0	31,2	48,2	33,8	50,6	61,1	50,0	33,0	35,0	35,4	19,8	56,1	58,4	23,3	—	—	—	—	—	—
76	a	18,4	19,7	18,8	53,9	54,5	16,0	16,8	62,6	61,7	18,0	25,8	22,2	41,2	60,0	42,5	58,3	75,6	61,1	41,9	45,2	41,9	27,4	69,2	71,3	30,3	—	—	—	—	—	—
	b	17,6	18,5	17,6	51,8	52,2	14,9	15,9	59,7	58,9	17,5	22,1	20,8	38,0	55,7	38,9	57,8	71,0	56,8	40,3	41,8	40,7	24,7	65,0	66,9	27,8	—	—	—	—	—	—

Bemerkungen. Bei 55 kg traten Undichtheiten ein, welche durch Verstemmen der Ankerscheiben und Niete, sowie durch Nachziehen der Schraubenbolzen beseitigt wurden. Bei 62 kg brach ein Schraubenbolzen an der Bodenplatte. Derselbe wurde erneuert. Bei 68 kg wie bei 55 kg. Bei 72 kg wie bei 62 kg. Bei 76 kg wurden die Undichtheiten so groß, dass der Versuch abgebrochen werden musste.

Hierzu wird in der Einleitung Nachstehendes bemerkt. Der Einfachheit und Uebersichtlichkeit halber hat nur ein Teil der tatsächlich stattgehabten Messungen in der Zusammenstellung Aufnahme gefunden, sowohl in bezug auf die Messpunkte, als auch hinsichtlich der Pressungsstufen.

Der Verstärkungsring, gegen welchen sich die Muttern der Flanschschrauben legen, gab bei jedem Versuche mit

seinem inneren Rande der Biegung der Platte etwas nach (vergl. Fig. 13), wodurch sich die öfters eingetretenen Brüche der Schraubenbolzen erklären.

Ueber die mit dem Anker- und dem Plattenmaterial vorgenommenen Zug- und Biegungsversuche giebt die folgende Zusammenstellung in Verbindung mit den Fig. 18 bis 21 Auskunft.

Fig. 18.

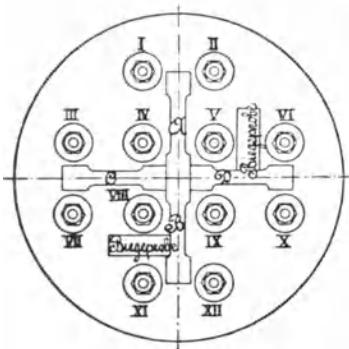


Fig. 21.

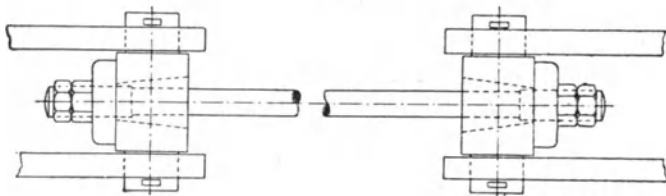


Fig. 19.  
Anker.

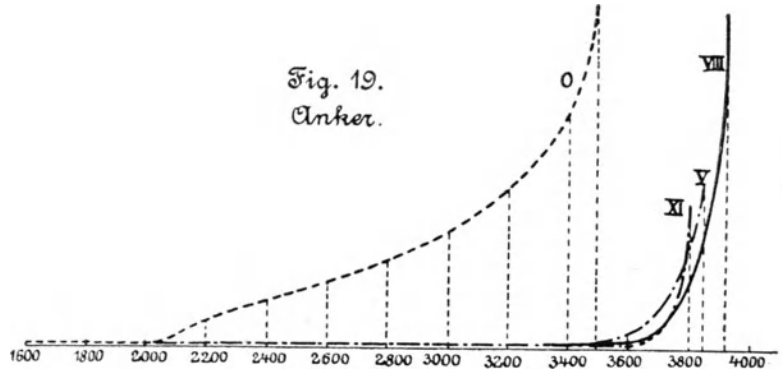
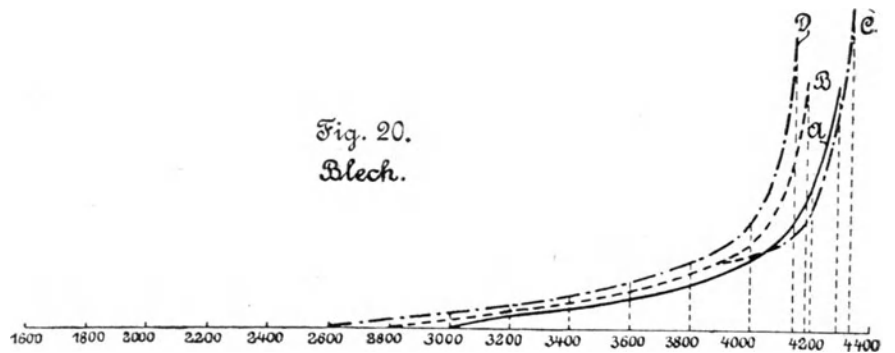


Fig. 20.  
Blech.





Für die Ankerstellen I bis XII sind bei 25 kg/qcm Flüssigkeitspressung die bleibenden Durchbiegungen noch zu Null angegeben, dagegen zeigen diese Stellen bei 30 kg/qcm Pressung bereits bleibende Durchbiegungen, und zwar:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,5	1,0	0,3	1,5	2,6	0,4	0,6	1,1	1,3	0,6	0,3	0,5 mm.

Dieser Pressung von  $p = 30$  kg/qcm entspricht nach Gl. (9) eine Zugspannung im Anker von der Gröfse

$$\sigma_z = \frac{35^2 \cdot 30}{\pi \cdot 4,37^2} = \frac{36750}{18,63} = 1973 \text{ kg/qcm,}$$

bei welcher nach Ausweis der Fig. 19 (vergl. Linie der Dehnungen für den Anker 0, geprüft vor der Ueberanstrengung) thatsächlich der Eintritt einer bleibenden Dehnung zu erwarten steht.

Zur Prüfung, inwieweit Uebereinstimmung besteht zwischen dem, was aus den eingangs unter Ziff. 1) und 2) gegebenen Gl. (2) bzw. (8) sich ableiten lässt, und dem, was aus den Versuchsergebnissen für die Platte IIa geschlossen werden kann, seien folgende Betrachtungen angestellt.

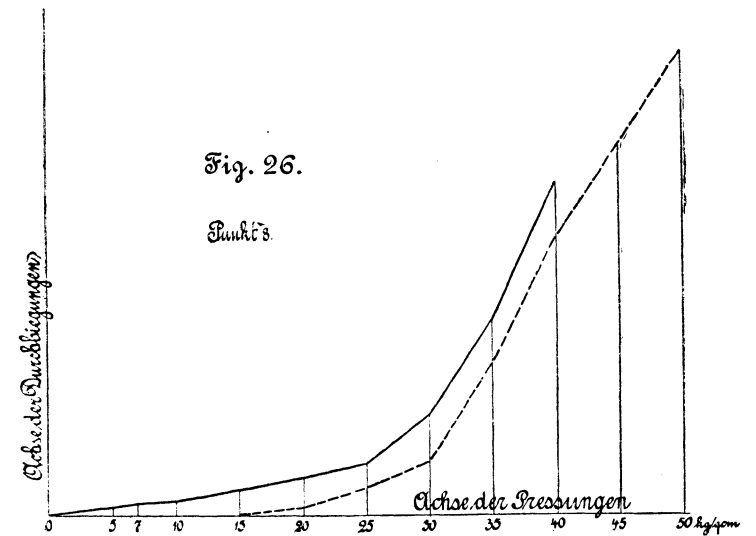
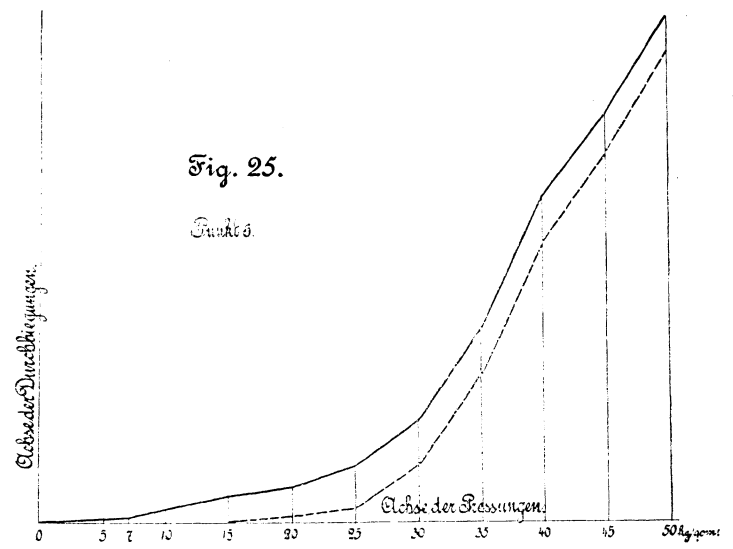
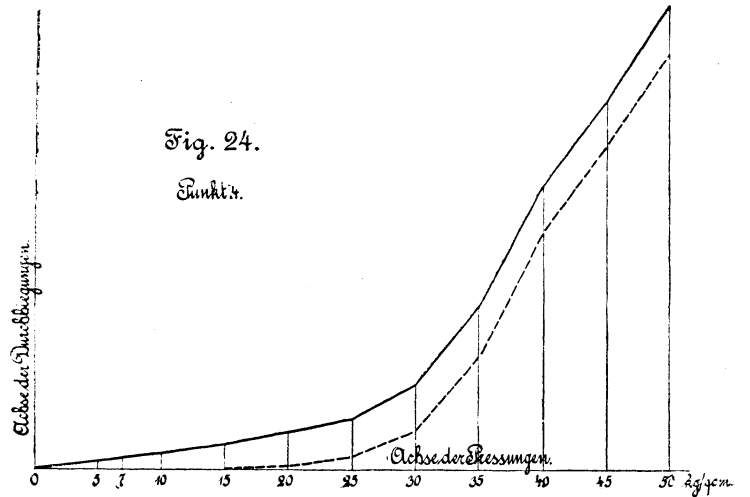
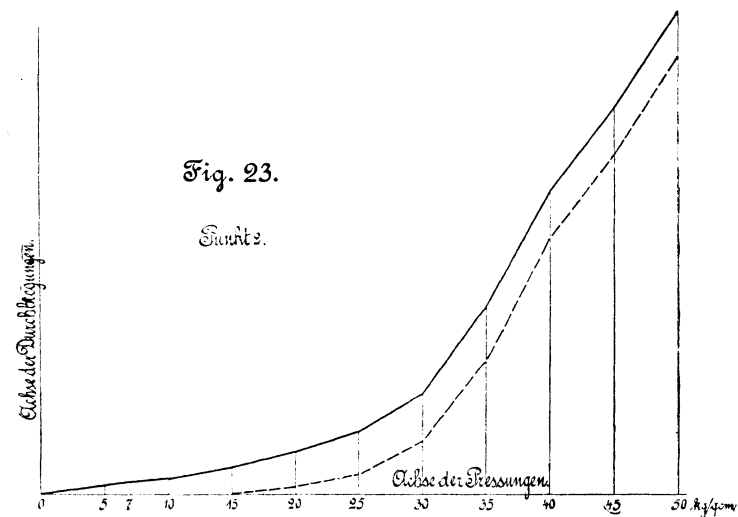
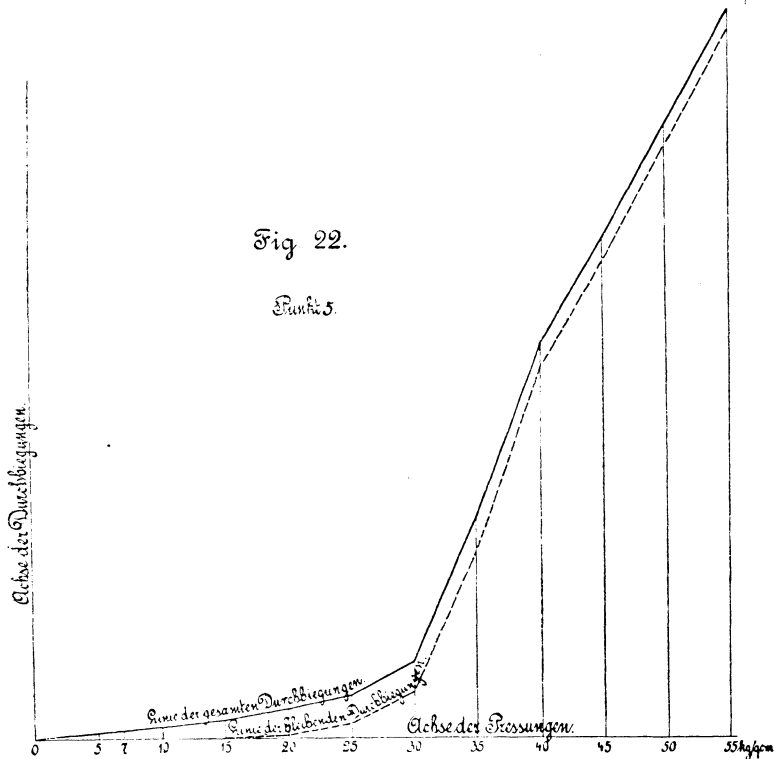
Nach Gl. (2) würde mit  $c_1 = 0$ ,  $c = 0,962$ ,  $K_z = 3550$  kg/qcm (noch nicht überanstrengtes Material)

die zulässige Flüssigkeitspressung betragen

$$p = \left( \frac{1,44}{35} \right)^2 \frac{3550}{0,962} = 6,24 = \sim 6,2 \text{ kg/qcm.}$$

Gl. (8) würde mit  $k_b = 600$  liefern

$$p = \frac{4}{1 - 0,9 \frac{14,4}{35}} \left( \frac{1,44}{35} \right)^2 \cdot 600 = 6,449 = \sim 6,4 \text{ kg/qcm.}$$







Gl. (8) mit  $k_b = 600 \text{ kg}$

$$p = \frac{4}{1 - 0,9} \frac{16,5}{40} \left(\frac{1,6}{40}\right)^2 \cdot 600 = 6,11 = \infty 6,1 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 6,1 \frac{1800}{19} = 578 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 6,1 \frac{2400}{27} = 542 \text{ kg.}$$

Platte IIIb, Fig. 31 und 32.

Fig. 31.

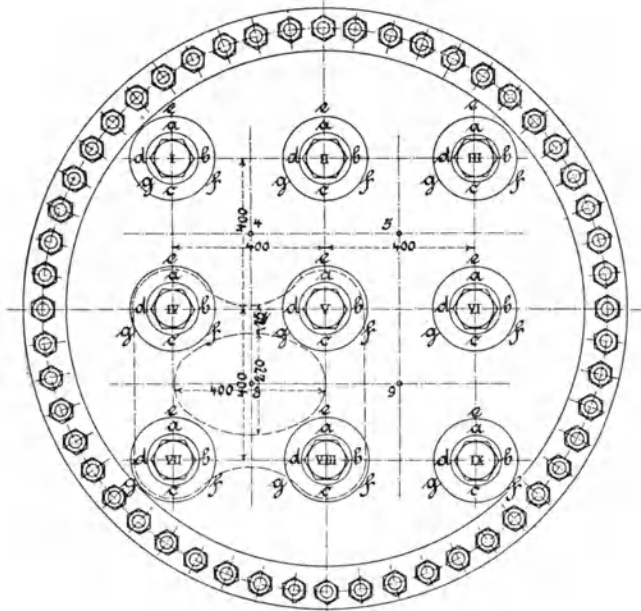
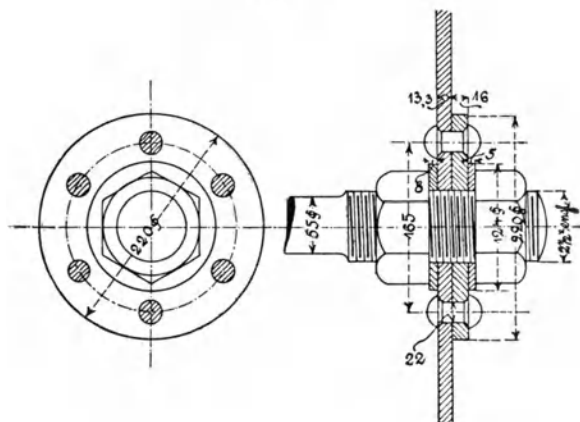


Fig. 32.



Bleibende Durchbiegungen der Feldermittelpunkte

	4	5	8	9
bei $p = 15 \text{ kg}$	0,6	0,6	0,9	1,0 mm
» $p = 20 \text{ kg}$	1,4	1,2	1,6	1,4 »

Hiernach darf die Elastizitätsgrenze als bei etwa  $p = 15 \text{ kg}$  überschritten angenommen werden, während die Aufzeichnung der Durchbiegungslinien nach Maßgabe der Fig. 22 bis 26 schätzen lässt, dass die Streckgrenze bei  $p = 20 \text{ kg}$  überschritten worden ist.

Die Ankerstellen I bis IX weisen bei  $p = 20 \text{ kg}$  noch keine bleibenden Dehnungen auf; bei  $p = 25 \text{ kg}$  ist eine solche nur bei Anker II in der Größe von 0,6 mm beobachtet worden.

Gl. (2) liefert mit

$$\sigma_1 = 0, \quad c = 0,962, \quad K_s = 3550 \text{ kg}$$

$$p = \left(\frac{1,33}{40}\right)^2 \frac{3550}{0,962} = 4,08 = \infty 4,1 \text{ kg.}$$

Gl. (8) mit  $k_b = 600 \text{ kg}$

$$p = \frac{4}{1 - 0,9} \frac{16,5}{40} \left(\frac{1,33}{40}\right)^2 \cdot 600 = 4,23 = \infty 4,2 \text{ kg,}$$

folglich

$$\sigma_b = 4,2 \frac{1800}{15} = 504 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 4,2 \frac{2400}{20} = 504 \text{ kg.}$$

Diese niedrigen Zahlen, welche sich hiernach für die thatsächliche Biegungsanstrengung ergeben, dürften zum größten Teile auf Rechnung des Umstandes zu setzen sein, dass die aufgenietete Scheibe bei erheblicher Größe des Durchmessers (220 mm) 16 mm Stärke besitzt gegenüber nur 13,3 mm Dicke der Versuchsplatte.

Platte IIIc, Fig. 33 und 34.

Fig. 33.

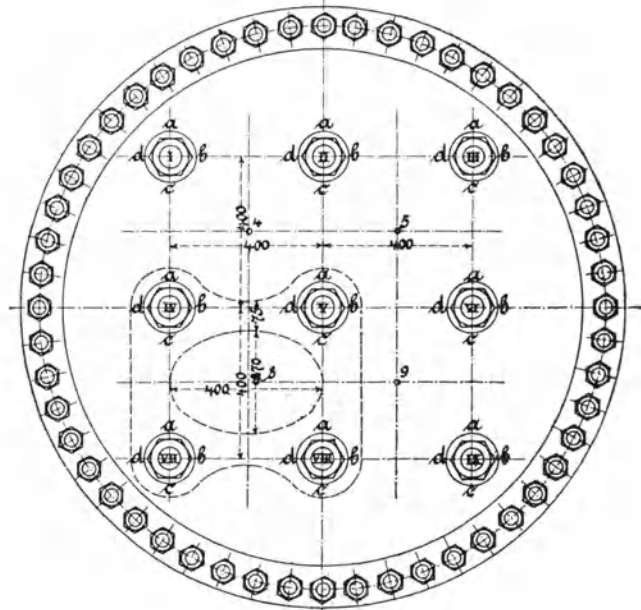
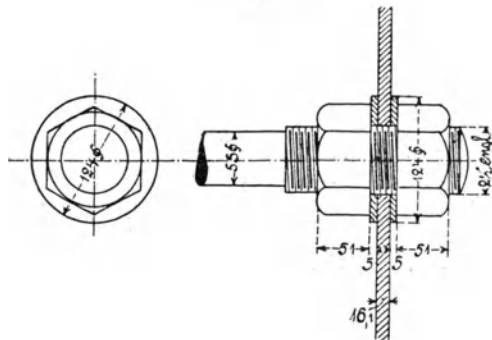


Fig. 34.



Auf dem gleichen Wege wie vorher gelangen wir zu dem Ergebnis, dass die Elastizitätsgrenze des Plattenmaterials bei etwa  $p = 14 \text{ kg}$ , die Streckgrenze ungefähr bei  $p = 17,5 \text{ kg}$  überschritten wird.

Gl. (2) führt mit

$$\sigma_1 = 0, \quad c = 1,146, \quad K_s = 3550 \text{ kg}$$

zu

$$p = \left(\frac{1,61}{40}\right)^2 \frac{3550}{1,146} = 5,02 = \infty 5,0 \text{ kg,}$$

Gl. (6) nach Einführung von  $k_b = 600 \text{ kg}$

zu

$$p = 4 \frac{1 - 0,7}{1 - 1,8} \frac{6,4}{40} \left(\frac{1,61}{40}\right)^2 \cdot 600 = 4,85 = \infty 4,9 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 4,9 \frac{1800}{14} = 630 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 4,9 \frac{2400}{17,5} = 672 \text{ kg.}$$

Platte IV a, Fig. 35 und 36.

Fig. 35.

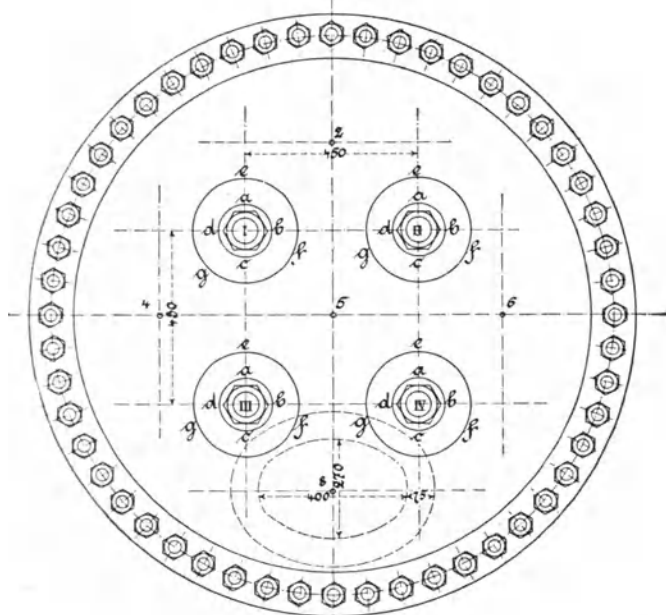
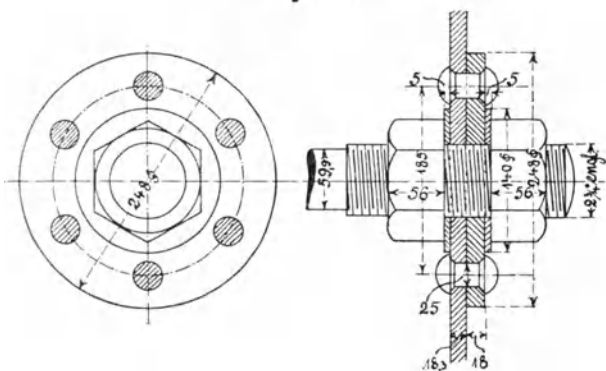


Fig. 36.



Die Elastizitätsgrenze des Plattenmaterials wird hier kurz vor  $p = 20 \text{ kg}$  erreicht.

Die Ankerstellen zeigen bei  $p = 20 \text{ kg}$  noch keine bleibenden Durchbiegungen; dagegen treten solche von erheblicher Größe (im Durchschnitt = 1 mm) schon bei  $p = 25 \text{ kg}$  auf. Nach Gl. (9) ergäbe dies

$$\sigma_s = \frac{45^2 \cdot 25}{\frac{\pi}{4} 5,99^2} = 1797 \text{ kg.}$$

Somit gaben naturgemäfs die Anker nach, noch bevor das Plattenmaterial über die Streckgrenze hinaus in Anspruch genommen war.

Gl. (2) liefert mit

$$c_1 = 0, \quad c = 0,962, \quad K_s = 3550 \text{ kg}$$

$$p = \left(\frac{1,83}{45}\right)^2 \frac{3550}{0,962} = 6,10 = \infty 6,1 \text{ kg,}$$

Gl. (8) nach Einführung von  $k_b = 600 \text{ kg}$

$$p = \frac{4}{1 - 0,9} \frac{18,5}{45} \left(\frac{1,83}{45}\right)^2 \cdot 600 = 6,30 = \infty 6,3 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 6,3 \frac{1800}{20} = 567 \text{ kg.}$$

Platte IV b, Fig. 37 und 38.

Fig. 37.

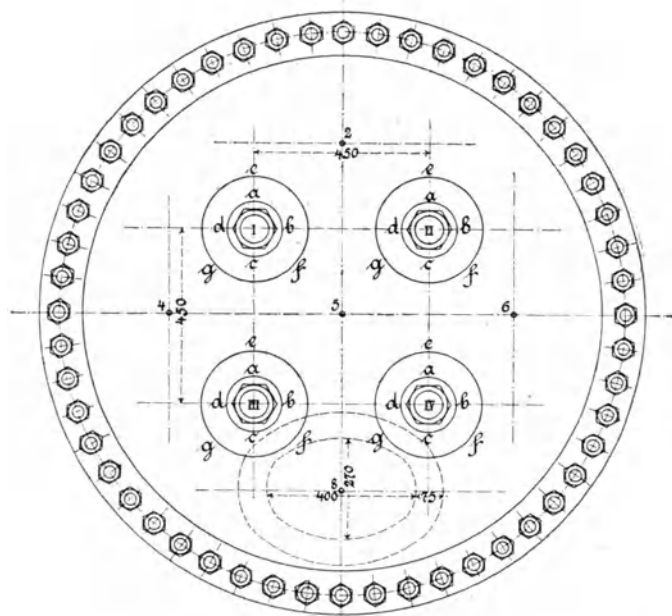
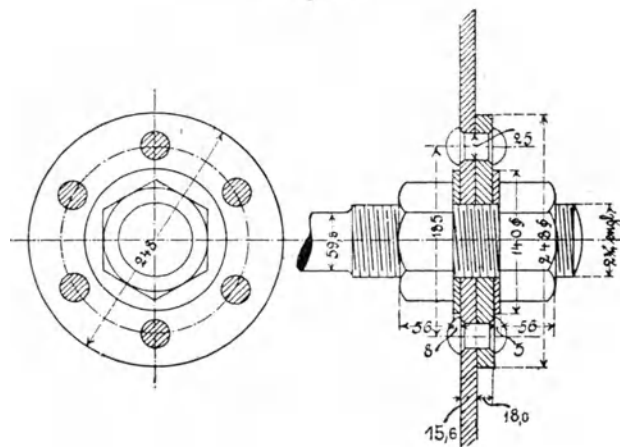


Fig. 38.



Bei  $p = 14 \text{ kg}$  wird die Elastizitätsgrenze und bei  $p = 19 \text{ kg}$  die Streckgrenze des Plattenmaterials erreicht sein.

Gl. (2) liefert mit

$$c_1 = 0, \quad c = 0,962, \quad K_s = 3550 \text{ kg}$$

$$p = \left(\frac{1,56}{45}\right)^2 \frac{3550}{0,962} = 4,43 = \infty 4,4 \text{ kg.}$$

Gl. (8) mit  $k_b = 600 \text{ kg}$

$$p = \frac{4}{1 - 0,9} \frac{18,5}{45} \left(\frac{1,56}{45}\right)^2 \cdot 600 = 4,58 = \infty 4,6 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 4,6 \frac{1800}{14} = 591 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 4,6 \frac{2400}{19} = 581 \text{ kg.}$$

Platte IV c, Fig. 39 und 40.

Bei  $p = 12 \text{ kg}$  wird die Elastizitätsgrenze und bei etwa  $p = 15 \text{ kg}$  die Streckgrenze des Plattenmaterials erreicht sein.

Gl. (2) ergibt mit

$$c_1 = 0, \quad c = 1,146, \quad K_s = 3550 \text{ kg}$$

$$p = \left(\frac{1,82}{45}\right)^2 \frac{3550}{1,146} = 5,07 = \infty 5,1 \text{ kg,}$$

Fig. 39.

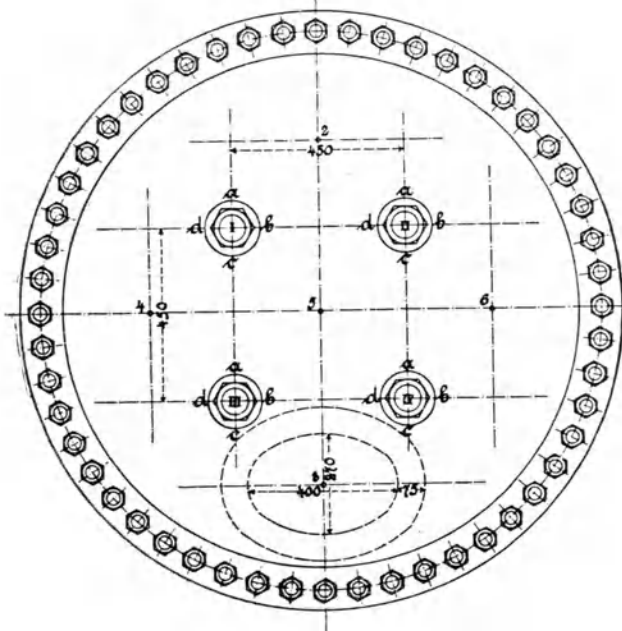
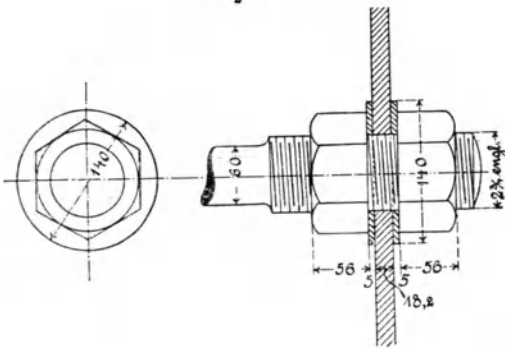


Fig. 40.



Gl. (6) mit  $k_b = 600 \text{ kg}$

$$p = 4 \frac{1 - 0,7 \frac{7,0}{45} \left( \frac{1,82}{45} \right)^2}{1 - 1,8 \frac{7,0}{45}} 600 = 4,86 = \infty 4,9 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 4,9 \frac{1800}{12} = 735 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 4,9 \frac{2400}{15} = 784 \text{ kg.}$$

Platte Va, Fig. 41 und 42.

Bei  $p = 12,5 \text{ kg}$  wird die Elastizitätsgrenze und bei  $p = 17,5 \text{ kg}$  die Streckgrenze des Plattenmaterials erreicht sein.

Wird, da es sich hier nicht um quadratische, sondern rechteckige Felder von den Seitenlängen 392 und 345 mm handelt, mit dem arithmetischen Mittel

$$e = \frac{39,2 + 34,5}{2} = 36,9 \text{ cm}$$

gerechnet, was allerdings nur mit Annäherung zulässig erscheint, so findet sich

nach Gl. (2)

$$p = \left( \frac{1,22}{36,9} \right)^2 \frac{3550}{0,962} = 4,03 = \infty 4,0 \text{ kg,}$$

nach Gl. (8)

$$p = \frac{4}{1 - 0,9 \frac{17}{36,9}} \left( \frac{1,22}{36,9} \right)^2 600 = 4,48 = \infty 4,5 \text{ kg,}$$

Fig. 41.

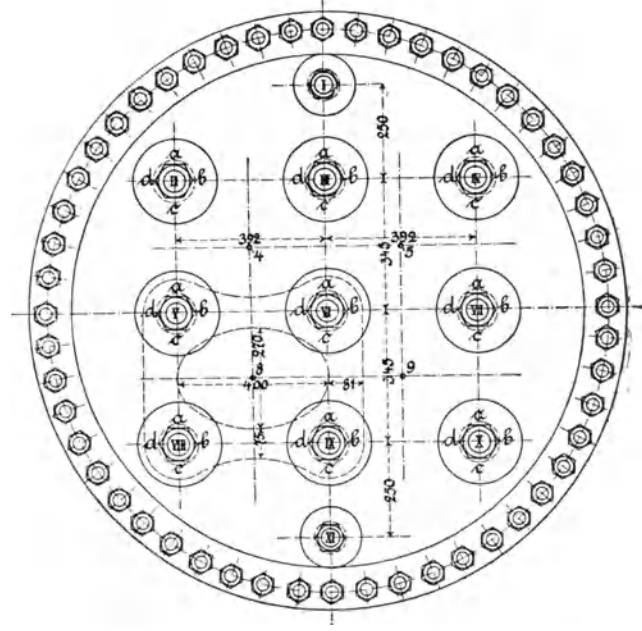
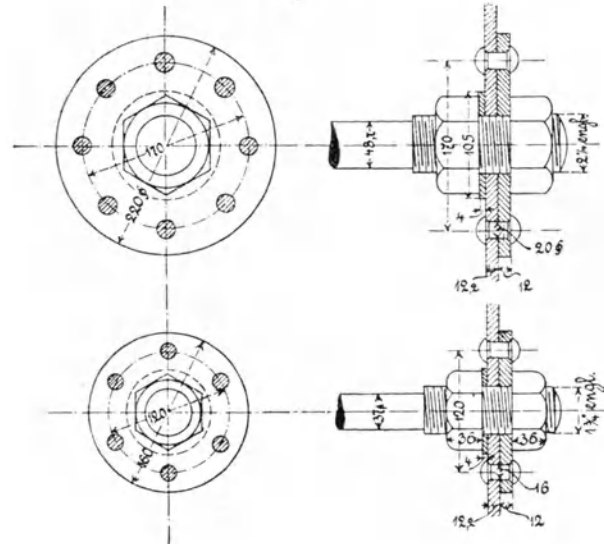


Fig. 42.



somit

$$\sigma_b = 4,5 \frac{1800}{12,5} = 648 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 4,5 \frac{2400}{17,5} = 617 \text{ kg.}$$

Platte Vb, Fig. 43 und 44.

Bei  $p = 9 \text{ kg}$  wird die Elastizitätsgrenze und bei  $p = 12 \text{ kg}$  die Streckgrenze des Plattenmaterials erreicht sein.

Wie unter Platte Va findet sich

nach Gl. (2)

$$p = \left( \frac{0,92}{36,9} \right)^2 \frac{3550}{0,962} = 2,29 = \infty 2,3 \text{ kg,}$$

nach Gl. (8)

$$p = \frac{4}{1 - 0,9 \frac{17}{36,9}} \left( \frac{0,92}{36,9} \right)^2 600 = 2,55 = \infty 2,6 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 2,6 \frac{1800}{9} = 520 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 2,6 \frac{2400}{12} = 520 \text{ kg.}$$



Fig. 43.

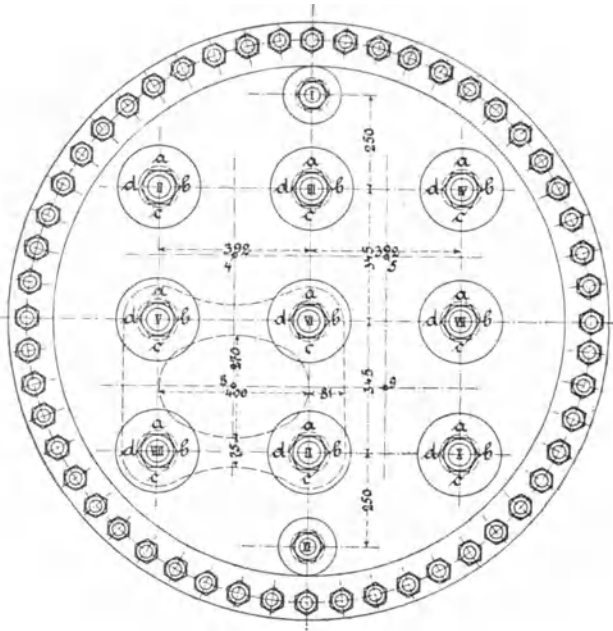
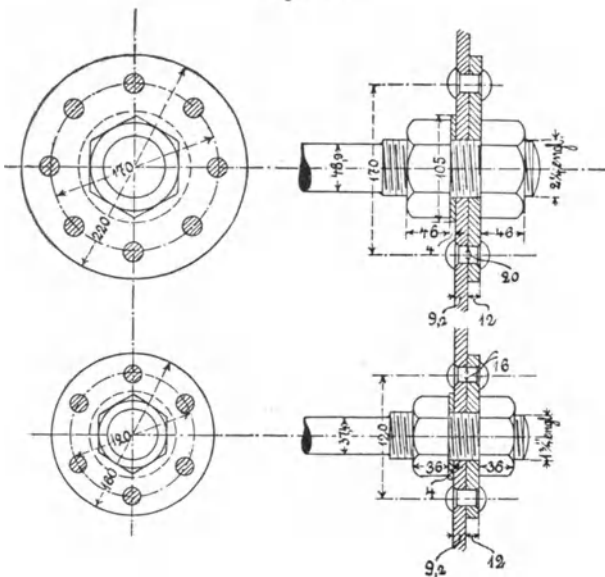


Fig. 44.



Auch hier zeigt sich in den niedrigen Zahlen der Einfluss der Stärke der aufgenieteten Scheibe in der Gröfse von 12 mm gegenüber der nur 9,2 mm starken Platte.

Platte Ia, Fig. 45 und 46.

Bei dieser Platte ist nur ein quadratisches Feld, nämlich dasjenige mit dem Mittelpunkt 3, vorhanden.

Die bleibenden Durchbiegungen sind für diese Platte — es war die erste Versuchsplatte — nur bei sehr hohen Pressungen angegeben; bei denen, welche hinsichtlich der Elastizitäts- und Streckgrenze des Plattenmaterials in Frage kommen, scheint eine Ermittlung überhaupt nicht stattgefunden zu haben. Infolgedessen muss versucht werden, die thatsächliche Anstrengung des Plattenmaterials auf andere Weise zu bestimmen.

Es beträgt für den Punkt 3 die gesamte Durchbiegung.

Bei $p = 10$ kg	. . .	1,5 mm	
» $p = 15$ »	. . .	2,25 »	0,75 mm
» $p = 20$ »	. . .	3,00 »	0,75 »
» $p = 25$ »	. . .	4,50 »	1,50 »
» $p = 27$ »	. . .	5,50 »	

Fig. 45.

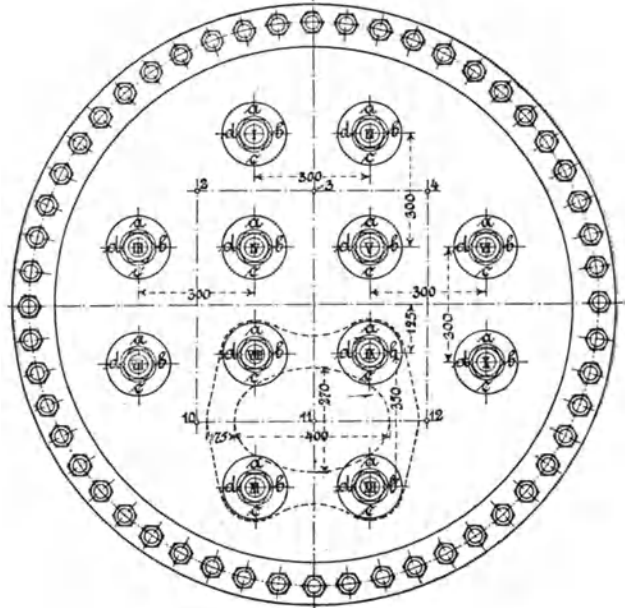
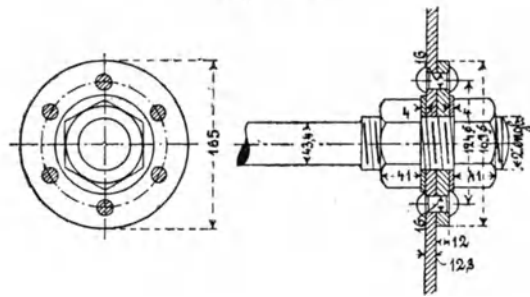


Fig. 46.



Hiernach darf proportionales Wachsen der Durchbiegung jedenfalls bis  $p = 20$  kg angenommen werden. Wird die Proportionalitätsgrenze des Plattenmaterials zu 1800 kg geschätzt, so entspräche 1 kg Flüssigkeitspressung einer Biegungsanstrengung von  $\frac{1800}{20} = 90$  kg.

Die Streckgrenze (2400 kg) dürfte bei  $p = 25$  kg erreicht werden, entsprechend mit Annäherung

$$\frac{2400}{25} = 96 \text{ kg}$$

Biegungsinanspruchnahme auf 1 kg Flüssigkeitspressung.

Nach Gl. (2) wird mit

$$c_1 = 0, c = 0,962, K_z = 3550 \text{ kg}$$

$$p = \left(\frac{1,23}{30}\right)^2 \frac{3550}{0,962} = 6,20 = \infty 6,2 \text{ kg.}$$

Gl. (8) liefert nach Einführung von  $k_b = 600$  kg

$$p = \frac{4}{1 - 0,9 \frac{12,4}{30}} \left(\frac{1,23}{30}\right)^2 600 = 6,42 = \infty 6,4 \text{ kg,}$$

somit

$$\sigma_b = 6,4 \frac{1800}{20} = 576 \text{ kg}$$

und

$$\sigma_b' = 6,4 \frac{2400}{25} = 614 \text{ kg.}$$

Größere Durchbiegungen (gesamte) als Punkt 3 weisen auf

Punkt 2, nämlich	5 mm bei $p = 20$ kg
» 4, »	4,5 » » $p = 20$ »
» 10, »	4,3 » » $p = 20$ »
» 12, »	4,0 » » $p = 20$ »



4) Zusammenfassung.

In der folgenden Zusammenstellung sind für die 14 Versuchsplatten enthalten:

Spalte 2 die Dampfpressungen  $p$  in kg/qcm, welche sich aus Gl. (2) mit  $e_1 = 0$  als zulässig ergeben;

Spalte 3 die gleichen Pressungen, ermittelt aus Gl. (8) bzw. (6) mit  $k_b = 600$  kg/qcm;

Spalte 4 und 5 die Bieugungsanspruchnahmen in kg/qcm, welche bei den Dampfpressungen, Spalte 3, nach Maßgabe der Versuchsergebnisse in Wirklichkeit anzunehmen sein würden, wie unter Ziff. 3) (vgl. S. 7 u. f.) dargelegt; und zwar gelten die Werte Spalte 4, wenn von der Elastizitäts- oder Proportionalitätsgrenze ausgegangen wird, diejenigen in Spalte 5, wenn die Streckgrenze den Ausgangspunkt bildet.

Platte	nach Gl. (2)	nach Gl. (8) bzw. (6)	$\sigma_b$	$\sigma_b'$
1	2	3	4	5
Ia	6,2	6,4	576	614
Ib	3,6	3,8	547	456
Ic	5,1	5,0	720	686
IIa	6,2	6,4	576	614
IIb	3,8	4,0	576	549
IIc	5,3	5,2	720	713
IIIa	5,9	6,1	578	542
IIIb	4,1	4,2	504	504
IIIc	5,0	4,9	630	672
IVa	6,1	6,3	567	—
IVb	4,4	4,6	591	581
IVc	5,1	4,9	735	784
Va	4,0	4,5	648	617
Vb	2,3	2,6	520	520

Ein Vergleich der Werte in den Spalten 2 und 3 zeigt durchschnittlich gute, zum teil sehr gute Uebereinstimmung.

Dagegen lassen die Spalten 4 und 5 erkennen, dass die Platten Ic, Iic, IIIc und IVc, d. s. die Platten ohne aufgenietete Scheibe (vergl. Fig. 5) verhältnismäßig stärker beansprucht erscheinen als die übrigen; d. h., dass die Widerstandsfähigkeit dieser Platten im Vergleich mit derjenigen der anderen Platten sowohl durch die Gl. (2) (Bureau Veritas, Hamburger Normen), als auch durch die Gl. (6) bzw. (8) (Verfasser) zu hoch gewürdigt ist, indem die Bieugungsanspruchnahmen merklich größer als 600 kg gefunden wurden. Etwas zu niedrig gewertet erscheint dagegen die Widerstandsfähigkeit der Platten Ib, IIb, IIIb und Vb, d. s. Platten, bei welchen die Dicke der aufgenieteten Scheiben erheblich größer ist als die Stärke der Versuchsplatte. Das letztere trifft zu für die Platten

Ib, IIb, IIIb, IVb, Vb,

indem die Plattenstärke  $s = 9,4, 11,3, 13,3, 15,6, 9,2$  mm, dagegen die Scheibendicke  $s_1 = 12, 14, 16, 18, 12$  »

beträgt. Das Nichthervortreten des bezeichneten Umstandes bei Platte IVb kann zu einem großen Teil darin begründet sein, dass der Einfluss des Ueberschusses von  $s_1$  über  $s$  verhältnismäßig für Platte IVb geringer ist als bei den übrigen Platten.

Das hinsichtlich der Platten Ic, Iic, IIIc und IVc Bemerkte deutet darauf hin, dass der Berichtigungskoeffizient  $\mu$  (vergl. S. 2) im Falle der Befestigung der Anker nach Fig. 5 etwas größer als  $1/2 = 0,5$  in Rechnung gestellt werden muss. Wir entscheiden uns für  $5/9 = 0,555$  und erhalten damit an die Stelle der Gl. (6)

$$p = 3,6 \frac{1 - 0,7 \frac{d}{e}}{1 - 1,8 \frac{d}{e}} \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \quad (6a.)$$

Für die Befestigungsweise der Anker nach Fig. 6 mit  $s_1 = 0,75 s$  bis  $s$  dagegen erscheint der kleinere Wert von  $\mu = 1/2$  ganz zutreffend, entsprechend dem Umstande, dass die Versteifung der mittleren um den Anker gelegenen Felderteile (um  $M$  in Fig. 1) durch die aufgenietete Scheibe eine größere Heranziehung der vom Anker abgelegenen Teile des Querschnittes der Platte für die Uebertragung zur Folge hat.

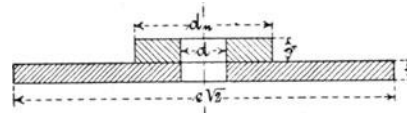
Das, was in bezug auf die Platten Ib, IIb, IIIb und Vb festzustellen war, und was nach Maßgabe der Fußbemerkung 3 S. 2 zu erwarten stand, müsste bei strengem Vorgehen dazu führen, dass an die Stelle von Gl. (12) die folgende gesetzt wird

$$1/2 e^2 p (1/3 e V^{1/2} - 0,21 d_n) \mu = k_b \frac{\Theta}{e_2},$$

worin bedeutet:

$\Theta$  das Trägheitsmoment des Querschnittes, bei ausreichender Vernietung zwischen Platte und Scheibe, unter Zugrundelegung der Fig. 51 und unter Be-

Fig. 51.



achtung der aus Fig. 6 ersichtlichen Bedeutung von  $d_n$  — Nietlochkreisdurchmesser — zu ermitteln aus

$$\Theta = 1/12 (e V \sqrt{2} - d) s^3 + (e V \sqrt{2} - d) s (e_1 - 0,5 s)^2 + 1/12 (d_n - d) s_1^3 + (d_n - d) s_1 (s + 0,5 s_1 - e_1)^2,$$

sofern  $e_1$  der Abstand der wagerechten Schwerlinie des Querschnittes (der Nullachse) von der unteren Begrenzungslinie, d. h.

$$e_1 = \frac{(e V \sqrt{2} - d) s \cdot 0,5 s + (d_n - d) s_1 (s + 0,5 s_1)}{(e V \sqrt{2} - d) s + (d_n - d) s_1}$$

$e_2 = (s + s_1) - e_1$  der für die größte Anstrengung des Materials in betracht kommende Faserabstand.

Damit wird alsdann

$$p = \frac{8,5}{e^2 (e - 0,9 d_n) \mu} \frac{\Theta}{e_2} k_b = \frac{17}{e^2 (e - 0,9 d_n)} \frac{\Theta}{e_2} k_b \quad (8a),$$

wenn man sich hinsichtlich des Koeffizienten  $\mu$  für Beibehaltung von  $\mu = 1/2$  entscheidet.

Wie aus der Betrachtung folgt, und wie auch ein nochmaliger Blick auf die obige Zusammenstellung lehrt, sind es aber nur diejenigen Platten, bei denen  $s_1$  größer als  $s$  war, welche dazu nötigen könnten, an die Stelle der einfacheren Rechnung mit Gl. (8) diejenige mit Gl. (8a) zu setzen<sup>1)</sup>. In

<sup>1)</sup> Wird die Gl. (8a) zur Bestimmung von  $p$  benutzt, so findet sich mit  $k_b = 600$  kg und  $\mu = 1/2$  Nachstehendes:

Platte	$\Theta$	$e_2$	$\frac{\Theta}{e_2}$	$p$	$\sigma_b$	$\sigma_b'$
Ia	17,69	1,62	10,92	6,6	594	634
Ib	11,65	1,46	7,98	4,8	691	576
IIa	33,21	1,89	17,57	6,6	594	634
IIb	22,87	1,71	13,37	5,1	734	699
IIIa	55,01	2,13	25,82	6,5	616	578
IIIb	41,20	1,98	20,81	5,3	636	636
IVa	91,36	2,41	37,91	6,7	603	—
IVb	70,83	2,26	31,34	5,6	720	707

Auf die beiden letzten Platten Va und Vb mit ihren rechteckigen Feldern von 345 mm und 392 mm Seitenlänge kann die Gl. (8a), welche quadratische Felder voraussetzt, nicht ohne weiteres angewendet werden.

der Regel dürfte  $s_1 \leq s$  sein, somit die Nötigung zur Benutzung der weniger einfachen Gl. (8a) entfallen.

Werden diejenigen Platten, bei denen  $s_1 > s$  war, aufser acht gelassen, sowie die Platten Ic, IIc, IIIc und IVc nach Gl. (6a) beurteilt, so ergibt sich die folgende Zusammenstellung:

Platte	nach Gl. (2)	nach Gl. (8) bzw. (6a)	$\sigma_b$	$\sigma_b'$
1	2	3	4	5
Ia	6,2	6,4	576	614
Ic	5,1	4,5	648	617
IIa	6,2	6,4	576	614
IIc	5,3	4,6	637	631
IIIa	5,9	6,1	578	542
IIIc	5,0	4,4	566	603
IVa	6,1	6,3	567	—
IVc	5,1	4,4	660	704
Va	4,0	4,5	648	617

Die Werte in den Spalten 4 und 5 enthalten die Biegungsanstrengungen des Plattenmaterials, wie solche bei den Flüssigkeitspressungen in Spalte 3 nach Maßgabe der oben unter Ziffer 3) besprochenen Versuchsergebnisse in Wirklichkeit anzunehmen sein würden; sie stimmen so befriedigend unter einander überein, als es bei dem Grade der Sicherheit, mit welchem von den Versuchsergebnissen auf die tatsächliche Beanspruchung geschlossen werden kann, überhaupt zu erwarten steht.

Damit gelangen wir hinsichtlich der Berechnung flacher, durch Anker oder Stehbolzen unterstützter Kesselwandungen zu dem Endergebnis, dass zu rechnen sein wird:

a) bei Befestigung der Anker (Bolzen) nach Fig. 4

$$p = 3,6 \left(1 - 0,7 \frac{d}{e}\right) \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \dots (I),$$

b) bei Befestigung der Anker nach Fig. 5

$$p = 3,6 \frac{1 - 0,7 \frac{d}{e}}{1 - 1,3 \frac{d}{e}} \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \dots (II),$$

c) bei Befestigung der Anker nach Fig. 6

$$p = \frac{4}{1 - 0,9 \frac{d_n}{e}} \left(\frac{s}{e}\right)^2 k_b \dots (III),$$

sofern die Stärke  $s_1$  der aufgenieteten Scheibe  $0,75 s$  bis  $s$  beträgt.

Bei erheblich größerem Werte von  $s_1$  kann Gl. (8a) unter Beachtung des daselbst (S. 380) Bemerkten benutzt werden.

Nach Spalte 3 der Zusammenstellung (S. 16) wäre die zulässige Flüssigkeitsbelastung

der Platte	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIc	IIIa	IIIb	IIIc	IVa	IVb	IVc	Va	Vb
$v =$	6,4	3,8	5,0	6,4	4,0	5,2	6,1	4,3	4,9	6,3	4,6	4,9	4,5	2,6 kg/qcm.

Bei den Versuchen wurde die Flüssigkeitspressung gesteigert bis

$p =$	45	65	62	76	56	75	80	74	78	71	80	70	65	71 kg/qcm,
d. i. auf das	7	17,1	12,4	11,9	14,0	14,4	13,3	17,6	15,9	11,3	17,4	14,3	14,4	27,3 fache.

Hinsichtlich der Wahl von  $k_b$ , d. h. des Wertes der zulässigen Biegungsanstrengung des Plattenmaterials, wird Folgendes im Auge zu behalten sein.

α) Der etwa zu erwartenden Abnutzung der Platte, z. B. durch Abrosten usw., ist gegebenenfalls dadurch Rechnung zu tragen, dass die berechnete Wandstärke um einen der Abnutzung entsprechenden Betrag vergrößert wird.

β) Der Eintritt merkbarer bleibender Durchbiegungen bleibt bei zähem Fluss- oder Schweifeseisen vorzüglicher Beschaffenheit für etwa  $k_b = 1800$  kg, und entschiedenes Wachstum dieser Durchbiegungen für etwa  $k_b = 2400$  kg zu erwarten. Wird  $k_b = 600$  gewählt, so ist das ein Drittel der ersteren und ein Viertel der letzteren Spannung. Ich halte bei Beachtung des unter α) Gesagten, sowie unter Voraussetzung vorzüglichen Materials  $k_b$  bis gegen 800 kg (bei der größten Pressung des Dampfes, für welchen der Kessel gebaut wird) für zulässig, falls Veranlassung vorliegt, hohe Inanspruchnahme zu gestatten<sup>1)</sup>.

γ) Ebene, aus genügend zähem Material bestehende Platten, welche sich unter Einwirkung der Belastung durchgebogen haben, besitzen in diesem gewölbten Zustande eine größere Widerstandsfähigkeit als in ihrer ursprünglichen ebenen Form<sup>2)</sup>. Die Zähigkeit des Materials nimmt jedoch durch diese Ueberanstrengung ab.

Stuttgart, Ende November 1893.

<sup>1)</sup> In Amerika fand ich bei bewährten Lokomotiven, z. B. bei denjenigen der Pennsylvania Railroad Company,

Feuerkasten-Seitenwände . . .	$s = 5,16''$ engl. = $\infty$ 8 mm.
Dmr. der Stehbolzen . . .	$d = 1''$ » = $\infty$ 25,4 »
Stehbolzenteilung . . .	$e = 4,1,2''$ » = $\infty$ 114,3 »

bei Dampfpressungen bis zu reichlich 12 kg/qcm Ueberdruck. Material der Wände: Flusseisen, von dem verlangt wird, dass ungeglühte Blechstreifen 3850 kg Zugfestigkeit und 30 pCt Bruchdehnung auf 51 mm Länge besitzen; Platten von weniger als 3500 kg und mehr als 4500 kg Festigkeit oder weniger als 25 pCt Dehnung werden nicht angenommen. Die eisernen Stehbolzen müssen denselben Bedingungen entsprechen.

Somit nach Gl. (I)

$$12 = 3,6 \left(1 - 0,7 \frac{2,6}{11,4}\right) \left(\frac{0,8}{11,4}\right)^2 k_b$$

$$k_b = \infty 800 \text{ kg,}$$

wobei eine Zugabe für Abnutzung (Abrosten, Abbrennen) nicht vorhanden ist.

Da diese Eisenbahngesellschaft gegen 3000 Lokomotiven im Betrieb hat, sie in ihren eigenen Werkstätten ausbessert, sowie jährlich gegen 300 neue Lokomotiven baut, aufserdem eine vorzüglich geleitete Materialprüfungsanstalt besitzt, so darf angenommen werden, dass es sich hier um — mindestens relativ — bewährte Abmessungen handelt.

<sup>2)</sup> Diese bekannte Thatsache wird aufs neue durch die oben unter Ziff. 3) erörterten Versuchsergebnisse bestätigt.

## Die auf der kaiserlichen Werft in Danzig von 1887 bis 1892 ausgeführten Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Flammrohren.

Die gegen Mitte 1893 unter dem Titel »Versuche, betreffend die Festigkeit cylindrischer Feuerungen, ausgeführt auf der kaiserlichen Werft in Danzig«, erfolgte Veröffentlichung der Ergebnisse dieser Versuche ist seitens der Industrie wie seitens der Wissenschaft mit Freude zu begrüßen. Sie ergänzt das auf dem fraglichen Gebiete bis jetzt bekannte, übrigens recht bescheidene Versuchsmaterial gerade nach der Richtung hin, in welcher die heutigen Ausführungen gelegen sind.

Die von Fairbairn angestellten Versuche erstrecken sich, wie ich bereits früher an anderer Stelle auszuführen veranlasst war, zum größten Teile auf verhältnismäßig sehr schwache Rohre; es besaßen nämlich von diesen kreisförmigen Versuchsrohren

26	eine	Wandstärke	von	1,1	mm,
3	»	»	»	3,2	»
2	»	»	»	3,5	»
1	»	»	»	6,35	»

Die geringste Stärke, welche bei den Flammrohren nach heutigem Stande zugelassen zu werden pflegt, beträgt 7 mm; ausgeführt finden sich — soweit meine eigene Erfahrung bis heute reicht — Flammrohre mit Wandstärken bis 24 mm.

Auch die Durchmesser der Fairbairnschen Versuchsrohre, von denen

10	Stück	einen	Durchmesser	von	102	mm
6	»	»	»	»	152	»
5	»	»	»	»	203	»
2	»	»	»	»	229	»
2	»	»	»	»	254	»
3	»	»	»	»	305	»
1	»	»	»	»	370	»
1	»	»	»	»	381	»
1	»	»	»	»	394	»
1	»	»	»	»	476	»

zeigten, sind als klein zu bezeichnen gegenüber den heute üblichen Ausführungen, welche bei etwa 600 mm beginnen und in Einzelfällen bis 1750 mm hinaufreichen. Es bleiben somit die Wandstärken und die Durchmesser der Fairbairnschen Versuchsrohre ziemlich weit unterhalb des Gebietes, auf dem die tatsächlich zur Ausführung gelangenden Größen liegen. Dazu kommt ferner, dass die Fairbairnschen Rohre bei der Prüfung sich unter Verhältnissen befanden, die nicht ganz denjenigen entsprechen, welchen ein Flammrohr in Wirklichkeit ausgesetzt ist<sup>1)</sup>; bei welcher Bemerkung zu-

<sup>1)</sup> Das Rohr hing in dem Versuchsapparat, wie in meinen Maschinenelementen 1891/92 Taf. 3, Fig. 62, dargestellt.

nächst ganz abgesehen werden soll von dem Einflusse der Einseitigkeit der Erwärmung im Betriebe<sup>1)</sup>. Unter diesen Umständen konnte es nicht ausbleiben, dass trotz der Vorliebe, mit welcher man sich in England, Frankreich, ganz besonders aber in Deutschland der mathematischen Verarbeitung der Fairbairnschen Versuchsergebnisse widmete<sup>2)</sup>, die Berechnung der erforderlichen Wandstärke der Flammrohre für die Konstrukteure von Dampfkesseln wie für die mit der Prüfung und Ueberwachung der letzteren betrauten Ingenieure eine recht schwache Stelle blieb, die um so mehr an Bedenklichkeit zunahm, je höher die Dampfspannungen stiegen, und je größer die Durchmesser der Rohre wurden. Darüber konnte auch die im Schiffbau bis auf den heutigen Tag herrschende Gepflogenheit nicht hinweghelfen, die Wandstärke  $s$  der Flammrohre auf grund der Fairbairnschen Formel

$$s = \sqrt{\frac{p d l}{c}}$$

zu berechnen, worin  $p$  den größten zulässigen Betriebsüberdruck im Kessel,  $d$  den Durchmesser des Flammrohres,  $l$  die Länge des letzteren, zutreffendenfalls den in betracht kommenden Abstand der wirksamen Rohrversteifungen, und  $c$  eine Konstante bedeutet. Dass diese aus den Ergebnissen der Fairbairnschen Versuche abgeleitete Vorschrift den Einfluss von  $l$  irrtümlich beurteilt, erhellt schon daraus, dass sie in der Form

$$p = c \frac{s^2}{d l}$$

für  $l = \infty$  zu  $p = 0$  führt, d. h. ein noch so starkes Rohr soll selbst bei kleinem Durchmesser einem ganz geringen Ueberdruck nicht widerstehen können, wenn es nur lang genug gemacht wird! Andererseits ergeben sich für kleine Werte von  $l$  außerordentlich hohe Pressungen  $p$  oder unzulässig kleine Wandstärken.

Die von der deutschen Reichsmarine mit glatten Rohren angestellten Versuche beziehen sich auf Wandstärken von 7,5 bis rd. 15 mm bei Durchmessern von 950 und 1000 mm. Diese Abmessungen liegen demnach ungefähr mitten auf dem Gebiete, auf welchem sich die tatsächlichen Ausführungen zur Zeit bewegen. Außerdem waren die Versuchsrohre in dem Versuchsapparate so befestigt wie in einem Dampfkessel: ein Mantel umschloss das

<sup>1)</sup> Weiteres über die Fairbairnschen Versuche kann nachgelesen werden in Transactions of the Royal Society 1858, oder auch Fairbairn, Useful Information for Engineers, second series, second edition, London 1867, oder meine Maschinenelemente 1891/92, S. 148 u. f.

<sup>2)</sup> vergl. Maschinenelemente. S. 148 u. f.

Rohr, welches die beiden Stirnböden durchdrang und mit diesen vernietet war.

### I. Anzahl der Versuche, Versuchseinrichtungen, Durchführung der Versuche.

Die Versuche erstrecken sich auf 18 kreisförmige Flammrohre, worunter 4 gewellte Rohre von Schulz-Knaudt in Essen und 1 geripptes Rohr von John Brown & Co. in Sheffield. Darüber, dass die Rohre schon gebraucht gewesen seien, d. h. einem betriebenen Kessel angehört hätten, findet sich keine Bemerkung; infolgedessen wird anzunehmen sein, dass sämtliche Versuche mit neuen Rohren durchgeführt wurden.

Textfig. 1 bis 3 lassen die Versuchseinrichtungen erkennen. In den 1320 mm weiten, aus geschmiedetem Martinstahl hergestellten Versuchscylinder ist das zu prüfende, mit den Stirnwänden vernietete Rohr eingebaut. Diese selbst sind an den Anlageflächen abgedreht und durch 52 Stück 38 mm starke Stahlschrauben mit den Flanschen des Versuchscylinders verschraubt, vgl. Fig. 4, Taf. XIV. Der außen aufgelegte Ring von 104 mm Breite, gegen den sich die Muttern der Flanschschrauben pressen, bezweckt Sicherung der Abdichtung und Befestigung. Die Stirnwände wurden gegen die Flansche des Cylinders einerseits und gegen den soeben erwähnten Verstärkungsring andererseits abgedichtet durch Mennigekitt, bei den Versuchen 10, 11 und 18 durch geschlossenen Gummiring mit eingewirkter Drahtgaze. Zum Trocknen der Mennigedichtung waren ungefähr 4 Tage erforderlich. Außerdem wurde jede Flanschschraube durch Hanfumwicklung mit Mennigekitt gedichtet.

Der Hohlraum zwischen Versuchscylinder und Flammrohr steht mit dem Pumpwerk in Verbindung.

Die Vorrichtung zum Messen der inneren Radien des Flammrohres besteht im wesentlichen aus einer in der Achse des letzteren an beiden Enden drehbar gelagerten Welle *a*, aus Bronze hergestellt, auf welcher mittels Schraubenspindel *b* der senkrecht zur Welle stehende Arm *c* verschiebbar angeordnet ist. Letzterer besitzt außen eine konische Spitze, deren Entfernung von der Wellenachse nach Erfordernis eingestellt werden kann; die Skala mit Nontius ermöglicht Ablesungen bis auf Zehntel Millimeter. Durch Handrad *d* kann die Welle von dem einen Ende aus gedreht und mittels Teilscheibe für jede Messung genau eingestellt werden.

Die beiden Lager der Welle *a* wurden jeweils so gestellt, dass ihre Achsen möglichst genau in die Linie fallen, welche durch die Mittelpunkte je zweier zu einander senkrechter Durchmesser an den Enden des Flammrohres bestimmt ist.

Bei sämtlichen Versuchen wurde der Druck in dem Hohlraum zwischen Versuchscylinder und Flammrohr stufenweise, und zwar in der Regel von 5 zu 5 kg/qcm erhöht, bis die Bildung einer Beule eintrat. Zur Beobachtung der Wasserpressung dienten zwei an den Versuchscylinder angeschlossene Manometer. Mit Beginn der Beulenbildung fiel der Druck. Er wurde alsdann wieder so lange gesteigert, bis infolge zu großer Undichtheiten, Formänderungen oder aus Anlass von Rissbildungen eine weitere Vermehrung unmöglich wurde. Die bei den Druckstufen eingetretenen Formänderungen wurden durch Messung der inneren Radien des Rohres ermittelt, und zwar während des Druckes und

Fig. 1.

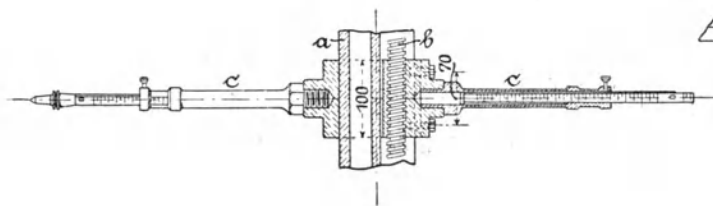
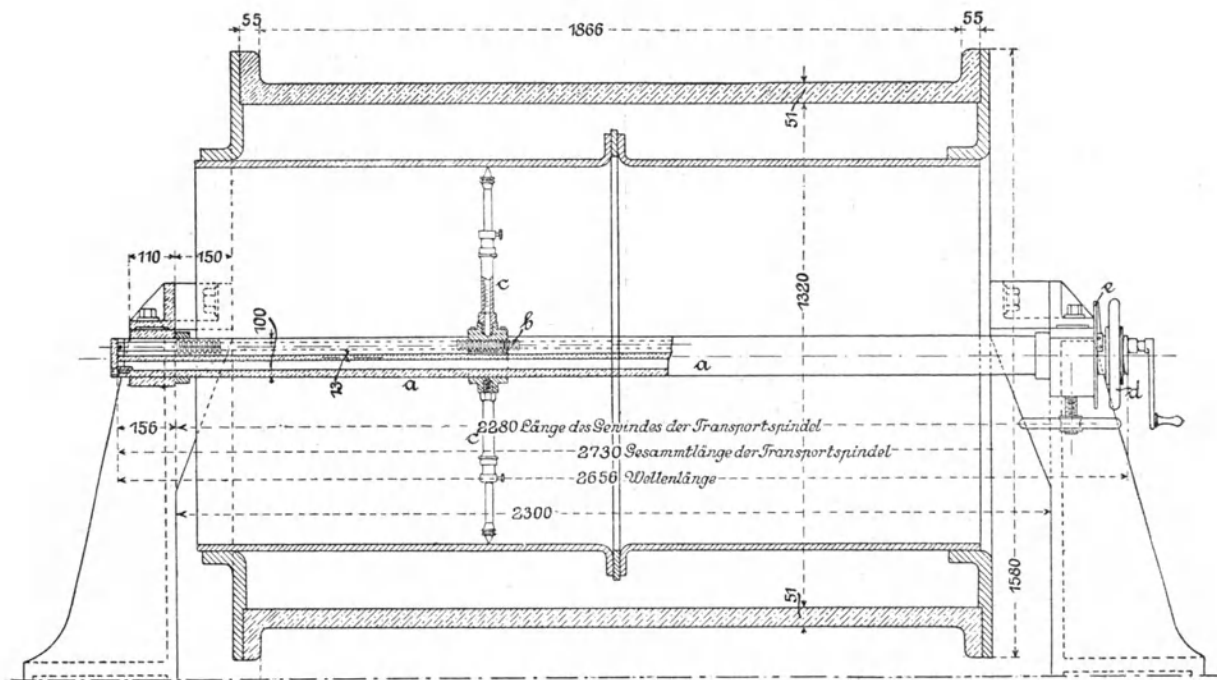


Fig. 2.

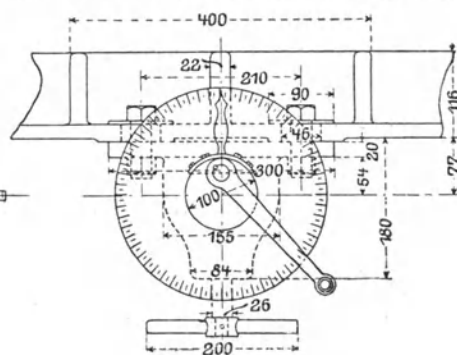


Fig. 3.

sodann nach Ablassen des Wassers, bis der Druck auf Null gefallen war. Die ersteren Messungen lieferten die gesamten, die letzteren die bleibenden Formänderungen.

Die Kosten der Versuche sind auf mindestens 50 000 bis 60 000 *M* zu schätzen.

## II. Die Versuchsergebnisse.

### Rohr No. 1, Fig. 4 bis 9, Taf. XIV.

#### a) Ausführung des Rohres.

Fig. 4 und 5<sup>1)</sup>, Taf. XIV, zeigen das in den Versuchscylinder eingebaute Flammrohr, aus zwei Schüssen bestehend. Jeder Schuss hat eine Längsnaht, die nur an den Enden geschweißt ist, während in der Mitte die Verbindung durch beiderseits angeordnete Laschen mittels einreihiger Vernietung hergestellt wurde, wie das Fig. 4 für den linken Schuss deutlich erkennen lässt.

In den Schnitten, Fig. 4 . . . . .	I	II	III	IV	V
nach der Ebene <i>ad</i> , Fig. 5 . . . . .	999,1	999,2	998,7	1003,2	1002,3 mm
» » » <i>be</i> » . . . . .	1000,4	999,9	1003,6	1000,1	1001,1 »
» » » <i>cf</i> » . . . . .	997,8	997,3	997,3	997,6	1000,8 »
Größter Unterschied in Millimetern .	2,6	2,6	6,3	5,6	1,5 mm
» » » Hundertteilen	0,26	0,26	0,63	0,56	0,15

Diese Zahlen kennzeichnen gleichzeitig den Grad der Vollkommenheit der Kreisform; er muss in den Schnitten I, II und V als ein hoher bezeichnet werden; dabei darf nicht ganz außer Acht gelassen werden, dass die ermittelten Blechstärken um 0,6 mm schwankten. Diese Vollkommenheit zu erzielen ist namentlich im Schnitt I leicht, da hier die Kreisform der Öffnung in der Stirnwand Einfluss nimmt. Die geringere Vollkommenheit in den Schnitten III und IV hängt damit zusammen, dass hier bei Bildung der Rohrflansche (durch Umbördeln) die Einhaltung der genauen Kreisform mit Schwierigkeiten verknüpft ist. Da, wie sich aus dem Späteren ergibt, die Einbeulung ungefähr in der Mitte zwischen I und III, d. i. im Schnitt II oder in dessen Nähe ihren Anfang nahm, so hat die geringere Vollkommenheit der Kreisform im Schnitt III einen erheblichen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit nicht äußern können. Naturgemäß tritt die Bedeutung der Unvollkommenheit der Kreisform in der Nähe der Rohrflanschen, da diese eine wirksame Versteifung bilden, überhaupt zurück.

#### c) Einbeulungspressung, Formänderung.

Bei 24 kg Pressung entstand plötzlich die Beule, wie sie in Fig. 6 und 7 gestrichelt eingetragen ist; der Druck fiel auf 8 kg. Bei weiterem Pumpen wurde die Pressung von 17 kg erreicht, wodurch die Beule auf das in Fig. 6 und 7 eingezeichnete Maß sich vergrößerte, und der in letzterer Abbildung hervorgehobene Riss quer zur Rohrachse entstand. Das Eintreten des Querrisses erscheint ganz natürlich angesichts der großen Verlängerung, welche die in der Ebene der Rohrachse gelegenen am stärksten durchgebogenen Fasern erfahren. Dieser Verlängerung entsprechen große Längsspannungen, zu denen sich noch die Inanspruchnahme durch Abbiegung gesellt, welche gegen die Enden des Rohrschusses hin am größten ausfällt. Je stärker, unnachgiebiger die Stirnwandung ist — diese Eigenschaft besitzt sie hier

<sup>1)</sup> Die in Fig. 5 gezeichnete Anzahl der Niete stimmt nicht mit der wirklichen Anzahl überein, weshalb die letztere — 63 — in Fig. 4 eingeschrieben wurde. Die Figuren sind in verschiedener Hinsicht, wie ein Vergleich mit der Veröffentlichung zeigt, ergänzt. Diese Bemerkung gilt auch für die übrigen Rohre. Als Wandstärken der Rohre wurden in die Fig. 4, 10, 14 usw. diejenigen Werte eingetragen, welche später die Grundlage für Rechnungen bilden.

In gleicher Weise sind alle übrigen glatten Rohre, mit Ausnahme der Rohre No. 10 und No. 11, deren Längsnaht ganz durch Schweißung hergestellt waren, ausgeführt.

#### b) Abmessungen des Rohres, Vollkommenheit der Kreisform.

Die Blechstärke, gemessen am Rande der zu dem Rohre verwendeten Platten, schwankte zwischen 7,8 und 8,4 mm. Die unter Zugrundelegung eines spezifischen Gewichtes von 7,763 aus Länge, Breite und Gewicht berechnete Blechstärke betrug 8,3 mm. Ueber die Wandstärke ist überdies noch das unter d) Bemerkte zu vergleichen.

Der innere Durchmesser ist zu 1000 mm angegeben. Aus den Mitteilungen über die genauen Messungen der Radien, wie oben unter I. besprochen, finden sich für die inneren Rohrdurchmesser — vor Eintritt eines Ueberdruckes — durch Addition der Halbmesser die folgenden Werte<sup>1)</sup>:

in bedeutendem Maße —, um so höher wird unter sonst gleichen Verhältnissen die resultierende Längsspannung steigen. Je zäher das Blech ist, um so später wird sich ein Riss einstellen.

Die höchste Pressung, für welche vor der Einbeulung die größte bleibende Aenderung der Radien — durch Messung unter Druck und durch Messung nach Ablassen von Wasser, bis der Ueberdruck Null geworden — ermittelt wurde, betrug 20 kg. Diese bleibende Aenderung ergibt sich für den eingebulnten Schuss zu Null.

#### d) Rohrmaterial.

Dasselbe ist als »Eisenblech erster Qualität Borsig« bezeichnet. Geprüft wurde es mittelst der Zugprobe und zwar derart,

1) dass 4 Probestäbe — No. 1 bis No. 4 — von den Platten entnommen worden waren, aus denen das Flammrohr angefertigt wurde,

2) dass 4 Probestäbe — No. 5 bis No. 8 — aus dem eingebulnten Schuss an der Einbeulungsstelle, vergl. die Textfig. 8 und 9, entnommen und mittelst hydraulischer Presse im kalten Zustande gerade gebogen wurden.

Fig. 8.

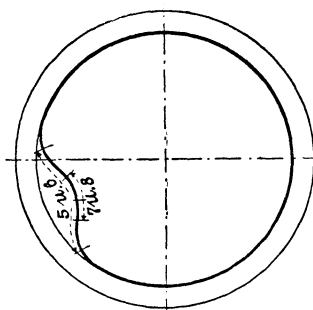
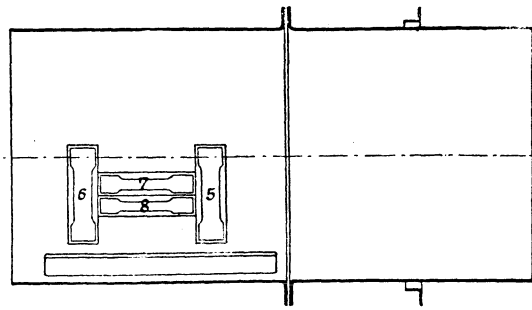


Fig. 9.



Den Mitteilungen über die Ergebnisse dieser Prüfung entnehmen wir folgende Angaben.

<sup>1)</sup> Hinsichtlich der einzelnen Aenderungen der Radien, welche Messungen bei den Versuchsrohren nach vielen Tausenden zählen, muss auf die Veröffentlichung und auch auf die Originalaufnahmen verwiesen werden, da die Veröffentlichung selbst nur einen Teil der letzteren wiedergibt. In der Hauptsache dürfte übrigens das bei den einzelnen Rohren und in der Zusammenstellung S. 22 und 23 Angeführte genügen.

Stab	Breite cm	Stärke cm	Elastizitätsgrenze in kg/qcm		Zugfestigkeit in kg/qcm		Bruchdehnung auf 200 mm in pCt	
			Faser- richtung	quer dazu	Faser- richtung	quer dazu	Faser- richtung	quer dazu
Material im ursprünglichen Zustande								
1	6,41	0,785	1590	—	3480	—	28	—
2	6,50	0,78	1680	—	3350	—	27	—
3	6,28	0,795	—	1800	—	3910	—	11
4	6,08	0,825	—	1890	—	3990	—	10
Material, welches vorher überanstrengt worden war								
5	6,12	0,815	2000	—	3910	—	11,3	—
6	6,02	0,82	1820	—	4250	—	12	—
7	6,04	0,815	—	2440	—	4270	—	8
8	6,02	0,825	—	2520	—	4330	—	10

Hiernach wäre namentlich bei dem Material im ursprünglichen Zustande die Festigkeit des Bleches in der Walzrichtung bedeutend kleiner als diejenige senkrecht dazu. Mit den täglichen Erfahrungen stimmt das nicht überein.

Nach der Stärke des Versuchsstabes 7 und derjenigen des mit 5 bezeichneten Stabes dürfte der schwächste Teil des Bleches an der Einbeulungsstelle nach erfolgter Einbeulung und nach Geradebiegung unter der Presse zu 8,15 mm Dicke anzunehmen sein. Vor der Einbeulung wird das Blech an dieser Stelle eine etwas grössere Stärke besessen haben. Die Messungen an den Blechplatten ergaben, wie oben unter b) bemerkt, die Wandstärke zwischen 7,8 und 8,4 mm schwankend, die Ermittlung aus dem Gewicht, der Länge und der Breite der Platte zu 8,3 mm, welche Grösse auch die ursprüngliche Dicke an der Einbeulungsstelle gewesen sein dürfte.

e) Vergleich der Einbeulungspressung mit der zulässigen Dampfbetriebsspannung.

Die für Flammrohre (1889) von mir aufgestellte Gleichung<sup>1)</sup>

$$p = 10 \frac{\left(\frac{100s}{d}\right)^2}{\frac{100s}{d} + \frac{a}{40} \frac{1}{1 + \frac{d}{l}}} \dots (1)$$

oder

$$s = \frac{pd}{2000} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{a}{p} \frac{1}{1 + \frac{d}{l}}} \right),$$

worin bedeutet

- $p$  den größten zulässigen Betriebsüberdruck in kg/qcm,
- $s$  die Wandstärke des Rohres in cm,
- $d$  den Durchmesser desselben in cm, und zwar streng genommen den äusseren; doch ist es bei den verhältnismässig geringen Werten von  $s$  (gegenüber  $d$ ) auch zulässig, für  $d$  den inneren Durchmesser einzuführen,
- $l$  die Länge des Rohres in cm, zutreffendenfalls den in betracht kommenden Abstand der wirksamen Rohrversteifungen,
- $a$  eine Zahl, welche in erster Linie von der mehr oder minder grossen Vollkommenheit der kreiszylindrischen Form abhängt<sup>2)</sup>, und welche für Rohre, deren Längsnähte geschweisst oder stumpf gestossen und innen wie aussen gelascht sind, bei guter Ausführung zu 80 angenommen werden darf,

liefert, da im vorliegenden Falle

$$s = 0,83 \text{ cm}, d = 100 \text{ cm}, l = 106,2 \text{ cm}, (\text{Fig. 4}),$$

$$p = 10 \frac{\left(\frac{100 \cdot 0,83}{100}\right)^2}{\frac{100 \cdot 0,83}{100} + \frac{80}{40} \frac{1}{1 + \frac{100}{106,2}}} = 3,70.$$

<sup>1)</sup> Näheres s. Maschinenelemente 1891/92 S. 154 u. f.

<sup>2)</sup> Näheres s. Maschinenelemente 1891/92 S. 147 u. f.

Wird dieser Druck in Vergleich gestellt mit der Pressung  $p_0$ , welche bei dem Versuche die Einbeulung herbeiführte, so findet sich

$$p_0 : p = 24 : 3,7 = 6,48.$$

Hiernach hat erst der 6,48fache Wert des größten nach Gl. (1) zulässigen Arbeitsdruckes die Eindrückung hervorgerufen.

Die im Vorstehenden unter a) bis e) besprochenen Ergebnisse sind in der senkrechten Spalte 1 der Zusammenstellung S. 22 zusammengefasst eingetragen. Die Werte, welche sich daselbst für die Ergebnisse der Materialprüfung angeben finden, bilden jeweils das arithmetische Mittel aus den Zahlen, die oben unter d) angeführt wurden.

Rohr No. 2, Fig. 10 bis 13.

In ganz gleicher Weise, wie im Vorstehenden für das Rohr No. 1 ausführlich erörtert, ergeben sich hier die unter Rohr No. 2 in der Zusammenstellung S. 22 enthaltenen Werte. Dieselbe Bemerkung gilt auch für die übrigen glatten Rohre.

Bei 30 kg Pressung entstand die Beule — in Fig. 12 und 13 gestrichelt —, wodurch der Druck auf 10 kg fiel. Bei weiterem Pumpen vergrösserte sich die Beule allmählich; schliesslich trat bei 20 kg der in Fig. 13 gezeichnete Riss an der Flanschenrundung quer zur Rohrachse ein.

Im Einbeulungsschnitt II, Fig. 10, betrug vor dem Versuche der größte Unterschied in den Rohrdurchmessern 1,0 mm. d. i. 0,1 pCt. Die Vollkommenheit der Kreisform ist demnach eine ausserordentlich hohe, wodurch sich auch erklärt, dass das Verhältnis  $p_0 : p$  für das Rohr No. 2 gross ausgefallen ist, wie die Zusammenstellung S. 22 erkennen lässt.

Rohr No. 3, Fig. 14 bis 17.

Bei 30 kg Pressung entstand, nachdem der Druck etwa 4 Minuten gewirkt hatte, die Beule — in Fig. 16 und 17 gestrichelt —, wodurch die Pressung sofort auf 21 kg fiel. Bei weiterem Pumpen stieg dieselbe auf 25 kg; die Beule vergrösserte sich, bis schliesslich das Blech in unmittelbarer Nähe eines Stehbolzens des Versteifungsringes quer zur Rohrachse einriss, wodurch der Druck auf Null sank. Infolge der Abbiegung, die der Stehbolzen hierbei erfuhr, wurde dieser ganz bedeutend auf Biegung in Anspruch genommen.

Rohr No. 4, Fig. 18 bis 21.

Bei 30 kg Pressung entstand, nachdem der Druck etwa 3 Minuten gewirkt hatte, die Beule, wie gestrichelt in Fig. 20 und 21 eingetragen, zwischen zwei Stehbolzen des Versteifungsringes, Fig. 20. Die Pressung fiel hierbei auf 28 kg. Bei weiterem Pumpen stieg sie auf 32 kg; die Beule vergrösserte sich, die Köpfe der beiden stark einseitig beanspruchten Stehbolzen sprangen ab, die Pressung sank auf Null.

Dieser Versuch zeigt deutlich die schwache Seite der Versteifung durch Winkeleisenringe. Indem die über den Rohrumfang verteilten Stehbolzen den letzteren nur in einzelnen Punkten stützen, deren Entfernung hier reichlich 140 mm beträgt, machen sie den Anfang, die Kreisform des Rohres in diejenige eines Vieleckes — hier 22-Eckes — überzuführen. Es scheint deshalb nur natürlich, wenn die Einbeulung zwischen zwei Stehbolzen beginnt. Von diesem Gesichtspunkte aus empfiehlt es sich, die Entfernung der Stehbolzen gering zu nehmen; andererseits wächst mit Abnahme dieser Entfernung die Wahrscheinlichkeit, dass die engen, für den Wasserumlauf verbleibenden freien Querschnitte zwischen Rohr, Versteifungsring und Bolzenhülle sich rasch mit Kesselstein vollsetzen. Mit Rücksicht auf diese Verhältnisse habe ich bereits in meinen Maschinenelementen 1891/92 S. 146 die Versteifung durch Winkeleisenringe als eine solche bezeichnet, die in der Regel nicht, sondern nur da angewendet werden soll, wo man zu ihrer Benutzung gewissermassen gezwungen ist.

Wie die Zusammenstellung S. 22 für das Rohr No. 4 erkennen lässt, weist das Rohr im Schnitt III, der für die



Beulenbildung in Frage kommt, die größte Abweichung von der Kreisform auf, nämlich 6,1 mm auf rd. 1000 mm Dmr. Demgemäß fand sich auch ein unter dem Durchschnitt liegender Wert für das Verhältnis  $p_0 : p$ .

Rohr No. 5, Fig. 22 bis 25.

Bei 32 kg Pressung entstand die Beule — in Fig. 24 und 25 gestrichelt —, wodurch der Druck auf 12,5 kg sank. Wiederholtes Nachpumpen führte zu Pressungen bis 13 kg; dabei vergrößerte sich die Beule, und Querrisse entstanden an den Verbindungsstellen mit den Stirnwandungen. Schliesslich wurde der Versuch abgebrochen.

Die Widerstandsfähigkeit des Rohres erscheint dadurch nachteilig beeinflusst, dass gerade im mittleren Schnitt II die größte Abweichung von der Kreisform auftritt: 6,4 mm auf rd. 1000 mm Dmr. Hiermit steht in Uebereinstimmung, dass das Verhältnis  $p_0 : p$  unter dem Durchschnittswert bleibt, wie die Zusammenstellung S. 22 und 23 erkennen lässt, welche bei Rohr No. 5 für  $p_0 : p$  den kleinsten Wert giebt.

Rohr No. 6, Fig. 26 bis 29.

Bei 45 kg Pressung entstand, nachdem der Druck etwa 1 Minute gewirkt hatte, die Beule — in Fig. 28 und 29 gestrichelt —, wodurch der Druck auf 17 kg fiel. Bei neuem Pumpen wurde nur eine Pressung von 29 kg erreicht; die Beule vergrößerte sich, und schliesslich sprangen 2 Nietköpfe in der Rundnaht an der Stirnwandung ab.

Auch hier zeigt sich die größte Abweichung von der Kreisform in dem für die Einbeulung in betracht kommenden Schnitt II: 4,4 mm auf rd. 1000 mm Dmr; übrigens erheblich weniger als bei den Rohren No. 4 und 5.

Rohr No. 7, Fig. 30 bis 33.

Bei 45 kg Pressung entstand die in Fig. 32 und 33 gestrichelt eingezeichnete Beule, die sich am Versteifungsring zwischen zwei Stehbolzen hinein erstreckte. Der Druck fiel

auf 30 kg. Bei neuem Pumpen stieg die Pressung bis 36 kg; die Beule vergrößerte sich und schliesslich sprang der Kopf des einen Stehbolzens ab, worauf sich das Blech des Rohres über das Gewinde des Bolzens, der in das Rohr eingeschraubt, streifte.

Rohr No. 8, Fig. 34 bis 37.

Bei 45 kg Pressung bildete sich, nachdem der Druck etwa 2 Minuten gewirkt hatte, die in Fig. 36 und 37 gestrichelt wiedergegebene Beule; infolgedessen die Pressung auf 22 kg fiel. Bei neuem Pumpen stieg sie auf 45 kg; die Beule vergrößerte sich und schliesslich sprang beim Nachstemmen ein Nietkopf der Rundnaht ab, worauf der Versuch abgebrochen werden musste.

Rohr No. 9, Fig. 38 bis 41.

Bei 55 kg Pressung bildete sich im mittleren Schuss, nachdem der Druck ungefähr 3 Minuten geherrscht hatte, zwischen zwei Stehbolzen die Beule — vergl. Fig. 40 —, wodurch die Pressung zuerst auf 45 kg, sodann auf 32 kg und schliesslich infolge der entstandenen Undichtheiten auf Null sank. Durch starkes Pumpen wurde nochmals ein Druck von 32 kg erreicht; hierbei sprangen die Köpfe von zwei Stehbolzen ab, die Pressung fiel auf Null.

Von Interesse ist die Verbiegung des Versteifungsringes, dessen Schenkel bei 13 mm Stärke eine Breite von 75 mm besaßen.

Wie beim Rohr No. 4, so tritt auch hier das Unzureichende der Versteifung durch Winkelisenringe scharf hervor: die Beule bildete sich zwischen 2 Stehbolzen, trotzdem die Entfernung der letzteren nur reichlich 140 mm betrug.

Rohr No. 10, Fig. 42 bis 45, Taf. XV.

Die Längsnahte der Schüsse sind durchaus geschweisft. Die in Fig. 43 eingeschriebenen Zahlen, wie z. B.  $\begin{pmatrix} 13,1 \\ 14,3 \end{pmatrix}$

Zusammen  
13 glatte

Rohr No.	1	2	3	4	5	
Abbildungen . . . . .	Fig. 4 bis 9	Fig. 10 bis 13	Fig. 14 bis 17	Fig. 18 bis 21	Fig. 22 bis 25	
Zeit des Versuches . . . . .	August 1887	Okt. 1887	Nov. 1887	Febr. 1888	März 1887	
Material . . . . .	Eisenblech I. Qualität	wie No. 1	wie No. 1	wie No. 1	wie No. 1	
Lieferant . . . . .	Borsig	» »	» »	» »	» »	
Längsnaht . . . . .	an den Enden geschweisft, im mittleren Teile einreihig vernietet, beiderseits Laschen	» »	» »	» »	» »	
Innerer Durchmesser $d$ in mm . . . . .	1000	1000	1000	1000	1000	
Größter Unterschied in den Rohrdurchmessern (vor dem Versuche) in mm	Schnitt I . . . . .	2,6	3,7	2,5	2,8	
	» II . . . . .	2,6	1,0	0,9	6,0	
	» III . . . . .	6,3	6,4	2,3	6,1	
	» IV . . . . .	5,6	5,0	5,7	4,6	
	» V . . . . .	1,5	2,0	1,4	2,0	
	» VI . . . . .	—	1,0	—	1,2	
Einbeulungspressung $p_0$ in kg/qcm . . . . .	24	30	30	30	32	
Größte bleibende Aenderung der Halbmesser im eingebeulten Schuss, vor Beginn der Einbeulung beobachtet bei der Pressung in kg/qcm . . . . .	0,0	0,1	1,5	0,1	1,8	
Wandstärke in mm, ermittelt	an den Platten (Rohren) durch Messung	20	25	25	20	
	aus dem Gewicht usw. . . . .	7,8 bis 8,4	7,2 bis 8,0	7,5 bis 8,4	7,2 bis 8,1	10,8 bis 11,8
Materialprüfung	Elastizitätsgrenze in kg/qcm	8,3	7,5	8,1	7,8	11,44
		8,15 bis 8,25	7,5	7,75 bis 7,85	7,8	—
		1635	1760	1690	1700	—
Zugfestigkeit in kg/qcm	Faserrichtung quer dazu . . . . .	1845	2105	1800	1750	—
		3415	3765	4190	3595	3750
Bruchdehnung auf 200 mm in pCt	Faserrichtung quer dazu . . . . .	3950	4215	4005	3845	3700
		27,5	22,0	22,6	23,5	21,3
Rohrlänge oder Entfernung der Rohrversteifungen $l$ in mm	10,5	12,3	10,3	19,5	12,6	
In Rechnung gestellte Wandstärke in mm . . . . .	1062	737	512	334	1980	
Größte Betriebsspannung $p$ , berechnet nach Gl. 2 in kg/qcm	8,3	7,6	8,0	7,8	11,4	
Verhältnis $p_0 : p$ . . . . .	3,70	3,59	4,33	4,75	5,26	
Unterschied vom Mittelwert 6,92 . . . . .	6,48	8,35	6,92	6,32	6,08	
Dieser Unterschied in Hundertteilen des Mittelwertes . . . . .	— 0,44	+ 1,43	0	— 0,60	— 0,84	
	— 6,4	+ 20,7	0	— 8,7	— 12,1	

Hinsichtlich der Entstehung, wie auch der Bedeutung einzelner Werte dieser

bei  $e$ , bezeichnen die Blechstärken des Rohres vor dem Versuch, gemessen am linken und am rechten Ende. Die auf das linke Ende bezüglichen Zahlen sind eingeklammert. Die große Stärke von 14,3 mm, welche für das rechte Ende unten bestimmt wurde, rührt wahrscheinlich von der Schweißung an dieser Stelle her (die Schweißnaht liegt unten) und soll deshalb bei Beurteilung der Wandstärke nicht in betracht gezogen werden. Der der Einbeulungsstelle in tangentialer Richtung entnommene Probestab (No. 5) zeigte die Stärke 12,6 mm; bei der Zugprobe löste sich unter einer Belastung von 2900 kg/qcm die Schweißung.

Bei 50 kg Pressung wurden die Flanschenringe frisch verstemmt, bei 55 kg bildete sich, nachdem der Druck etwa 10 Minuten gewirkt hatte, die in Fig. 44 und 45 gestrichelt angegebene Beule (an der Schweißstelle), infolgedessen die Pressung auf 45 kg fiel. Durch neues Pumpen konnte dieselbe bis 57 kg gesteigert werden; die Beule vergrößerte sich, und schliesslich entstand der in Fig. 45 gezeichnete Querriss.

#### Rohr No. 11, Fig. 46 bis 53.

Die Längsnähte der Schüsse sind durchaus geschweißt.

Die in Fig. 47 eingeschriebenen Zahlen, wie z. B.  $\begin{matrix} 12,5 \\ (12,4) \end{matrix}$  bei  $d$  bedeuten die Blechstärken des Rohres vor dem Versuch, gemessen an den Rohrenden. Die eingeklammerten Zahlen gelten für das linke, die anderen für das rechte Ende. Die großen Stärken 13,3 und 13,5, welche unten — bei  $e$  — eingetragen sind, gelten wahrscheinlich für die durch die Schweißung verdickten Stellen und sollen deshalb bei Beurteilung der Rohrwandstärke nicht in betracht gezogen werden.

Bei 48 kg Pressung bildete sich die Beule  $A$  im mittleren Schuss, Fig. 50, wodurch der Druck auf 28 kg fiel.

Bei 50 kg Pressung entstand die Beule  $C$  im linken Schuss, Fig. 52, infolgedessen der Druck auf 30 kg sank.

Bei 51 kg Pressung bildete sich die Beule  $D$  im linken Schuss, Fig. 53; der Druck fiel auf 30 kg.

stellung.

Flammrohre.

6	7	8	9	10	11				12	13
Fig. 26 bis 29 Mai 1887 wie No. 1	Fig. 30 bis 33 Sept. 1887 wie No. 1	Fig. 34 bis 37 August 1888 wie No. 1	Fig. 38 bis 41 April 1889 wie No. 1	Fig. 42 bis 45 August 1891 Schweißseisen Schulz-Knaudt	Fig. 46 bis 53 Juli 1891 Siemens-Martineisen Schulz-Knaudt				Fig. 54 bis 57 Juni 1887 Eisenblech Grillo, Funke & Co.	Fig. 58 bis 61 Mai 1890 wie No. 12
» »	» »	» »	» »	ganz geschweifst	ganz geschweifst				wie No. 1	wie No. 1
1000	1000	1000	1000	950	950				950	1000
1,4	4,0	1,3	2,0	6,8	1,8				1,5	1,2
4,4	7,2	2,8	2,9	6,3	3,2				1,3	1,9
1,8	1,6	2,2	2,5	4,0	2,6				1,2	3,7
1,7	2,3	5,1	3,1	3,4	1,6				1,4	7,2
—	—	3,8	3,2	1,9	1,6				4,1	2,0
—	—	0,4	0,6	1,9	2,0				—	—
45	45	45	55	55	Beule A	Beule C	Beule D	Beule B	80	70
0,3	0,2	0,4	1,1	0,8	48	50	51	51	3,5	0,7
40	40	40	50	50	0,9	0,8	0,8	0,9	75	65
10,5 bis 11,5	10,4 bis 11,2	10,6 bis 11,2	10,8 bis 11,6	12,4 bis 13,2	45	45	45	45	—	14,7 bis 15,2
11,4	11,0	10,9	11,3	12,9	12,3 bis 12,5				—	15,1
11,1 bis 11,25	10,6 bis 10,75	10,75	11,2 bis 11,25	12,6	11,9	12,0	12,1	12,1	15,4	14,45 bis 14,52
—	1635	1600	1500	—	—				—	1750
—	1805	1650	1600	—	—				—	1650
4150	3760	3850	3450	3730	3800				3930	3620
4035	3860	3800	3750	3990	3670				3765	3455
24,35	24,0	23,5	24,5	27,0	30,0				17,75	19,75
18,35	16,65	19,0	15,0	25,0	28,0				10,5	13,5
1065	502	733	334	520	710	770	770	710	696	1074
11,4	10,9	10,9	11,3	12,6	12,1	12,2	12,3	12,3	15,4	14,8
5,99	6,76	6,14	7,83	8,65	7,62	7,57	7,66	7,80	10,66	8,71
7,52	6,66	7,33	7,02	6,36	6,30	6,61	6,66	6,54	7,51	8,04
+ 0,60	— 0,26	+ 0,41	+ 0,10	— 0,56	— 0,62	— 0,31	— 0,26	— 0,38	+ 0,59	+ 1,12
+ 8,7	— 3,8	+ 5,9	+ 1,4	— 8,1	— 9,0	— 4,5	— 3,8	— 5,5	+ 8,5	+ 16,2

Zusammenstellung findet sich das Nähere unter II, Rohr No. 1 angegeben.

Bei abermaliger Steigerung der Pressung auf 51 kg entstand die Beule  $B$  im mittleren Schuss, Fig. 50; der Druck sank auf 30 kg.

Nach Erneuerung einiger Nieten und nach erfolgtem Verstemmen liefs sich die Pressung auf 54 kg steigern, wobei im linken Schuss der Querriss  $a$ , Fig. 53, entstand.

Diese Aufeinanderfolge der Beulenbildung ist unter Berücksichtigung der Abweichungen der Wandstärken recht interessant. Die letzteren sind durch die 4 Probestäbe ermittelt, welche den 4 Einbeulungsstellen entnommen wurden.

#### Rohr No. 12, Fig. 54 bis 57.

Die Längsnähte sind beiderseits gelascht und einreihig vernietet.

Der linke Schuss ist an der Stirnwandung eingezogen (abgekröpft) von 950 mm auf rd. 890 mm inneren Durchmesser.

Bei geringerem Druck als 40 kg zeigte sich noch keine bleibende Formänderung.

Bei 80 kg Pressung entstand unter Ausrichtung der Abkröpfung — durch den Wasserdruck — die in Fig. 56 und 57 gestrichelt eingetragene Beule. Der Druck fiel auf 45 kg. Bei erneutem Pumpen wurde eine Pressung von 60 kg erreicht: die Beule vergrößerte sich, und der aus Fig. 57 ersichtliche Querriss entstand ziemlich genau da, wo das Blech durch die Einziehung (Abkröpfung) erheblich beansprucht worden war, also gelitten hatte.

#### Rohr No. 13, Fig. 58 bis 61.

Längsnähte wie bei Rohr No. 12.

Bei 70 kg Pressung bildete sich die in Fig. 60 und 61 gestrichelt angegebene Beule unter Sinken des Druckes bis auf 28 kg. Nach Beseitigung der entstandenen Undichtheiten liefs sich die Pressung bis auf 40 kg steigern: die Beule vergrößerte sich unter Rissbildung an der Flansche, wie in Fig. 61 angegeben ist.

## Rohr No. 14, Fig. 62 bis 65.

Wellrohr von Schulz-Knaut, Siemens-Martineisen. Wandstärke rd. 13 mm. Die in Fig. 63 eingeschriebenen Zahlen sind die für die Enden des Rohres ermittelten Wandstärken (vergl. Rohr No. 10 und 11). Die Zugproben mit Stäben, welche aus dem abgeschnittenen Ende des Rohres entnommen worden waren, ergaben:

Zugfestigkeit $K_z$	}	a) in der Faserrichtung . . .	3730 kg/qcm
		b) quer dazu . . . . .	3780 »
Bruchdehnung $\varphi$	}	a) in der Faserrichtung . . .	36,7 pCt
		b) quer dazu . . . . .	31,3 »

Die der Einbeulungsstelle entnommenen Stäbe, welche im kalten Zustande mittels hydraulischer Presse gerade gerichtet worden waren, lieferten

$K_z$		$\varphi$	
a)	b)	a)	b)
5240 kg	5420 kg	28,7 pCt	28,1 pCt
5700 »	5310 »	29,0 »	28,1 »

Bei 65 kg Pressung entstand, nachdem der Druck 15 Minuten gewirkt hatte, die in Fig. 64 und 65 gestrichelt angedeutete Beule (Schweißstelle liegt bei d). Der Druck fiel auf 48 kg. Nach wiederholter Beseitigung der Undichtheiten und bei wiederholtem Nachpumpen stieg die Pressung zuerst bis auf 44 kg, später nur noch auf 21 kg: die Beule vergrößerte sich unter Geradestreckung der Wellen, ohne dass ein Riss eintrat oder Nietköpfe absprangen.

Der Pressung von 65 kg entspricht eine Druckinnensprünahme im äußeren Durchmesser von angenähert

$$\frac{105 \cdot 65}{2 \cdot 1,3} = 2626 \text{ kg.}$$

Auf dieser Höhe dürfte die Quetschgrenze des Materials liegen, sodass der Versuch bestätigt, was aus der Ueberlegung folgt, nämlich, dass die Eindrückung gewellter Rohre aus zähem Material im Falle genügender Wellenhöhe bei einer Belastung zu erwarten steht, welche ungefähr der Quetschgrenze entspricht<sup>1)</sup>.

## Rohr No. 15, Fig. 66 bis 69.

Wellrohr von Schulz-Knaut, Siemens-Martineisen. Wandstärke rd. 14,5 mm.

Die Materialprüfung ergab geringere Zähigkeit als beim Rohr No. 14, wie aus folgenden Werten erhellt:

Material im ursprünglichen Zustande:

$K_z$		$\varphi$	
a)	b)	a)	b)
4150 kg	—	25,5 pCt	—
4010 »	—	27 »	—

Material nach vorhergegangener Ueberanstrengung:

5100 kg	5420 kg	7,8 pCt	6,0 pCt
4250 »	5070 »	21,8 »	9,0 »

Bei 70 kg Pressung entstand die Beule mit plötzlichem Druckabfall auf 40 kg. Offenbar gab der linke ungewellte, cylindrische Teil des Rohres zuerst nach, vergl. Fig. 69. Demgemäß findet sich auch die Druckbelastung des Rohres bei 70 kg unterhalb der Quetschgrenze, die hier höher liegt als beim Material des Rohres No. 14, da es sich um ein entschieden weniger zähes Material handelt, nämlich im äußeren Durchmesser angenähert zu

$$\frac{105 \cdot 70}{2 \cdot 1,45} = \infty 2530 \text{ kg.}$$

Die Gl. (1) liefert für dieses ungewellte cylindrische Stück mit  $l = 34,5 \text{ cm}$ ,  $s = 1,45 \text{ cm}$ ,  $d = 95 \text{ cm}$  und  $a = 80$

$$p = 11,32,$$

somit  $p_0 : p = 70 : 11,32 = 6,18,$

<sup>1)</sup> Vergl. Maschinenelemente 1891.92 S. 158, 4. Absatz.

welcher Wert in befriedigender Uebereinstimmung steht mit den Werten der betreffenden Zeile der Zusammenstellung hierunter, sowie mit dem, was in der Schlussbemerkung unter Ziff. 2 ausgesprochen ist.

Nach Beseitigung der Undichtheiten wurde nachgepumpt und ein Druck von 65 kg erzielt: die Beule vergrößerte sich, die Pressung sank; schliesslich entstand bei 36 kg Druck der in Fig. 68 eingezeichnete Querriss. Das Material war eben weniger zäh als dasjenige des Rohres No. 14.

## Rohr No. 16, Fig. 70 bis 73.

Wellrohr von Schulz-Knaut, Siemens-Martineisen. Wandstärke rd. 16 mm.

Die Prüfung des Materials ergab folgende Werte:

Material im ursprünglichen Zustande:

$K_z$		$\varphi$	
a)	b)	a)	b)
3900 kg	3900 kg	30,5 pCt	24,5 pCt
3740 »	3820 »	31,5 »	23,5 »

Material nach vorhergegangener Ueberanstrengung:

5310 kg	4800 kg	4,0 pCt	5,8 pCt
5110 »	4800 »	6,5 »	7,0 »

Bei 75 kg Pressung entstand, nachdem der Druck etwa 3 Minuten gewirkt hatte, die in Fig. 73 gestrichelt eingetragene Beule unter Sinken der Pressung auf 61 kg. Nach Beseitigung der Undichtheiten wurde durch Nachpumpen ein Druck von 45 kg erreicht: die Beule vergrößerte sich, ein Längsriss entstand (wahrscheinlich an der Schweißstelle).

Der Einbeulungspressung entspricht eine Druckspannung im äußeren Durchmesser des Rohres von ungefähr

$$\frac{111 \cdot 75}{2 \cdot 1,6} = \infty 2600 \text{ kg.}$$

## Rohr No. 17, Fig. 74 bis 77.

Wellrohr von Schulz-Knaut, Siemens-Martineisen. Wandstärke rd. 17 mm.

Die Prüfung des Materials lieferte folgende Ergebnisse:

Material im ursprünglichen Zustande:

$K_z$		$\varphi$	
a)	b)	a)	b)
3720 kg	3640 kg	23,0 pCt	31,5 pCt

Material nach vorhergegangener Ueberanstrengung:

4860 kg	4170 kg	9 pCt	12 pCt
4180 »	4940 »	11 »	7 »

Bei 70 kg Pressung bildete sich, nachdem der Druck etwa 2 Minuten gewirkt hatte, die in Fig. 76 und 77 gestrichelt angedeutete Beule unter Sinken der Pressung auf 60 kg. Nach Beseitigung der Undichtheiten wurde durch Nachpumpen eine Steigerung der Pressung bis 55 kg erreicht: die Beule vergrößerte sich, eine Niete brach, zwei Längsrisse fing an, sich zu bilden, wie in Fig. 76 und 77 angegeben.

Der Einbeulungspressung entspricht im äußeren Durchmesser eine Druckanstrengung von angenähert

$$\frac{125 \cdot 70}{2 \cdot 1,7} = \infty 2570 \text{ kg.}$$

## Rohr No. 18, Fig. 78 bis 81.

Geripptes Rohr von John Brown & Co. in Sheffield. Wandstärke im cylindrischen Teile reichlich 14 mm.

Die Prüfung des Materials ergab folgende Werte:

Material im ursprünglichen Zustande:

$K_z$		$\varphi$	
a)	b)	a)	b)
4230 kg	4490 kg	23,5 pCt	15 pCt
4120 »	4550 »	26,5 »	13 »

Material nach vorhergegangener Ueberanstrengung:

4450 kg	—	9 pCt	—
4210 »	—	26 »	—
4240 »	—	16 »	—
4260 »	—	29,5 »	—

Die Einbeulung erfolgte bei 60 kg Pressung, durch fortgesetztes Pumpen vergrößerte sich die Beule unter Sinken des Druckes auf 21 kg. Schliesslich bildete sich bei dieser Pressung der in Fig. 80 und 81 angegebene lange Querriss.

Der Einbeulungspressung entspricht unter Aufserachtung der Rippen eine Druckspannung von angenähert

$$\frac{98 \cdot 60}{2 \cdot 1,4} = 2100 \text{ kg.}$$

Hiernach beulte sich das Rippenrohr früher ein als die Wellrohre No. 14 bis 17.

Hinsichtlich der Würdigung des gerippten Rohres gegenüber dem gewellten Rohr und der Wertschätzung des letzteren verweise ich auf meine Maschinenelemente 1891/92 S. 144 u. f. Die vorliegenden Prüfungsergebnisse können nur die Meinung befestigen, dass das Wellrohr für Flammrohrkessel dem Rippenrohr vorzuziehen ist.

#### Schlussbemerkung.

In bezug auf die Berechnung der Flammrohre seien aus den Versuchsergebnissen insbesondere die beiden folgenden Punkte hervorgehoben.

1) Die Versteifung der Flammrohre durch Winkeleisenringe, welche durch eine Anzahl Stehbolzen (Nieten) in der

üblichen Weise mit dem Rohr verbunden sind, ist geringwertig. (Vergl. namentlich Rohr No. 4, No. 7, No. 9.)

2) Nach der Zusammenstellung S. 22 und 23 schwanken die Werte der Quotienten

$$\frac{\text{Einbeulungspressung } p_0, \text{ beobachtet bei den Versuchen}}{\text{größte Betriebsspannung } p, \text{ berechnet nach Gl. (2)}}$$

für die 16 Einbeulungen der glatten Rohre zwischen 6,08 und 8,35; der Mittelwert beträgt 6,92.

Hiernach hat erst der 6,08- bis 8,35-fache, im Durchschnitt der 6,92-fache Wert der größten Betriebspressung, welche Gl. (1) gestattet, die Eindrückung herbeigeführt. Die Abweichungen der Einzelwerte des Verhältnisses  $p_0 : p$  von der Durchschnittsgröße 6,92 sind nicht bedeutender, eher kleiner, als sie bei einer so eigenartigen und überdies in derart erheblichem Masse von der Vollkommenheit der Kreisform abhängigen Beanspruchung zu erwarten waren (vergl. in letzterer Hinsicht die Schlussbemerkungen unter Rohr No. 2, No. 4 und No. 5). Für die kleinste Rohrlänge von 334 mm, welche zweimal auftritt, beträgt  $p_0 : p$  6,32 und 7,02, für die größte Rohrlänge von 1980 mm ist  $p_0 : p = 6,08$  (Rohr No. 5, s. Schlussbemerkung zu demselben).

Insoweit hieraus ein Schluss gezogen werden darf, müssen die Wandstärken, welche Gl. (1) liefert, als vollständig ausreichend bezeichnet werden.

Im übrigen sei auf die Erörterungen zu den einzelnen Rohren und auf die Zusammenstellung S. 22 und 23 verwiesen.

Stuttgart, Anfang Januar 1894.

Additional material from *Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen*, ISBN 978-3-662-32464-6, is available at <http://extras.springer.com>



Von demselben Verfasser sind im Erscheinen begriffen, bezw. früher erschienen:

## **Die Maschinen-Elemente.**

Ihre Konstruktion und Berechnung mit Rücksicht auf die neueren Versuche.

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen und 45 Tafeln Zeichnungen.*

Dritte Auflage. Stuttgart 1894.

---

## **Elasticität und Festigkeit.**

Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsgemässe Grundlage.

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen und 15 Tafeln in Lichtdruck.*

Zweite Auflage. Berlin 1894.

---

## **Die Konstruktion der Feuerspritzen**

mit einem Anhang:

**Die allgemeinen Grundlagen für die Konstruktion der Kolbenpumpen.**

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen und einem Atlas von 25 Tafeln.*

Stuttgart 1883.

---

Versuche

über

## **Ventilbelastung und Ventilwiderstand.**

*Mit 5 Tafeln.*

Berlin 1884.

---

## **Die Wasserräder.**

**Turbinen und vertikale Wasserräder.**

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen und einem Atlas von 25 Tafeln.*

Stuttgart 1886.

---

Versuche

zur

**Klarstellung der Bewegung selbstthätiger Pumpenventile.**

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen und 8 Tafeln.*

Stuttgart 1887.

---

Versuche

über die

**Widerstandsfähigkeit ebener Platten.**

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen.*

Berlin 1891.

---

Versuche

über die

**Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.**

Heft 1: Wasserkammerplatten von Wasserröhrenkesseln.

*Mit in den Text gedruckten Abbildungen.*

Berlin 1893.