

Versuche

über die

Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

C. Bach,

K. Württ. Baudirektor,

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

Heft 6.

Die Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen gegenüber äußerem Ueberdruck.

Mit 36 Abbildungen im Text.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1902.

Versuche

über die

Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

C. Bach,

K. Württ. Bandirektor,

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

Heft 6.

Die Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen gegenüber äußerem Ueberdruck.

Mit 36 Abbildungen im Text.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1902

ISBN 978-3-662-32244-4
DOI 10.1007/978-3-662-33071-5

ISBN 978-3-662-33071-5 (eBook)

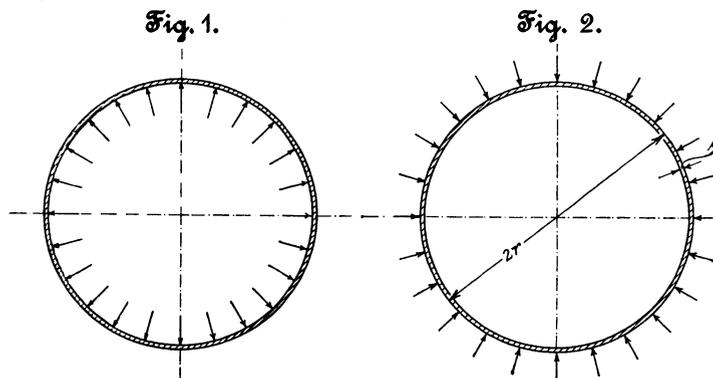
Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
A) Kugelförmige Wandungen aus Kupfer	2
I. Durchführung der Versuche mit den Böden	3
II. Prüfung des Kupfers der Böden	9
III. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und Folgerungen aus ihnen	10
IV. Zulässige Belastung der kugelförmigen Kupferböden von Braupfannen und ähnlichen Kochgefäßen	11
B) Kugelförmige Wandungen aus Flusseisenblech	13
I. Versuchsmaterial	13
II. Zulässige Belastung der kugelförmigen Flusseisenböden von Braupfannen und ähnlichen Gefäßen	14
C) Cylindrische Wandungen aus Flusseisenblech	14
Schlussbemerkung	15

Die Widerstandsfähigkeit

kugelförmiger Wandungen gegenüber äußerem Ueberdruck.

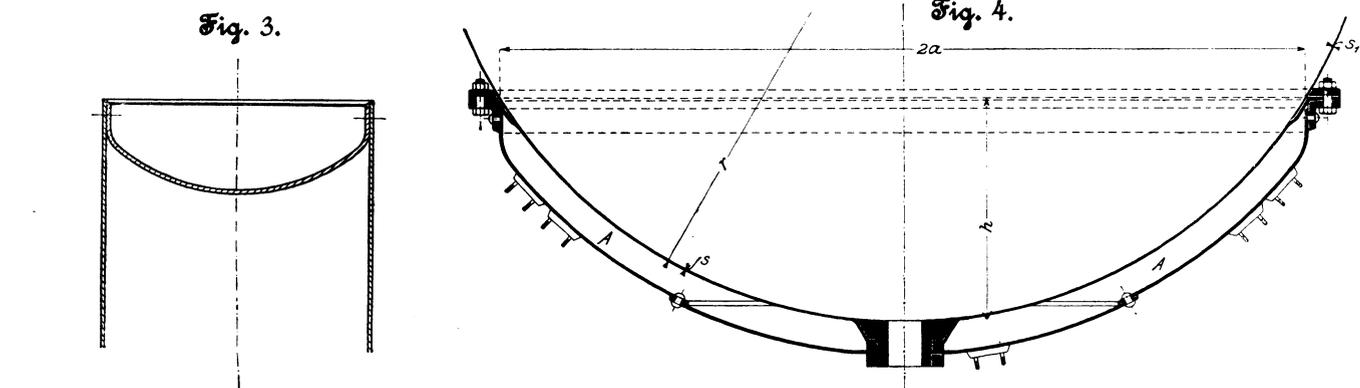
Während die Berechnung der Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen, deren Stärke im Verhältnis zum Kugelhalmesser gering ist, mit befriedigender Genauigkeit erfolgen kann, sofern es sich um Belastung durch inneren Ueberdruck handelt, Fig. 1, stellen sich bedeutende, bisher nicht



strebt ist; infolgedessen wird bei genügend hoher Steigerung des äußeren Ueberdruckes die Wandung eingebeult (eingeknickt) werden.

Es liegt hier die Sache ähnlich, wie bei einem schlanken Stab. Wird derselbe in Richtung der Achse durch eine Zugkraft belastet, so sucht diese etwaige Abweichungen von der geraden Form zu beseitigen; erfolgt die Belastung durch eine Druckkraft, so ist diese bestrebt, solche Abweichungen zu vergrößern, und führt bei genügender Größe die Knickung des Stabes herbei. Im ersten Fall sucht die belastende Kraft die Beanspruchung zur reinen Zuganstrengung zu machen, im zweiten ist sie bestrebt, zur Druckbeanspruchung des Materials sich steigernde Biegungsanstrengungen hinzuzufügen.

Dass die Frage der Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen von verhältnismäßig geringer Stärke gegenüber äußerem Ueberdruck zuverlässig nur auf dem Wege des Versuches beantwortet werden kann, liegt klar zutage. Meines Wissens ist auch bis jetzt noch niemals eine Untersuchung veröffentlicht worden, welche lediglich auf dem



überwundene Schwierigkeiten ein, wenn der Ueberdruck auf die äußere Wandungsfläche wirksam ist, Fig. 2. Der Grund für diesen Unterschied — sonst volle Gleichartigkeit vorausgesetzt — liegt darin, dass im ersteren Falle, Fig. 1, der Ueberdruck etwaige Abweichungen von der genauen Kugelform zu beseitigen sucht, während im zweiten Falle, Fig. 2, der Ueberdruck solche Abweichungen¹⁾ zu vergrößern be-

¹⁾ In demselben Sinne wie Abweichungen von der genauen Hohlkugelform — sowohl hinsichtlich der Form als auch inbezug auf die Wandstärke — wirken Ungleichartigkeiten in der Beschaffenheit des Materials (z. B. Stellen, an denen das Material durch zu hohe Tem-

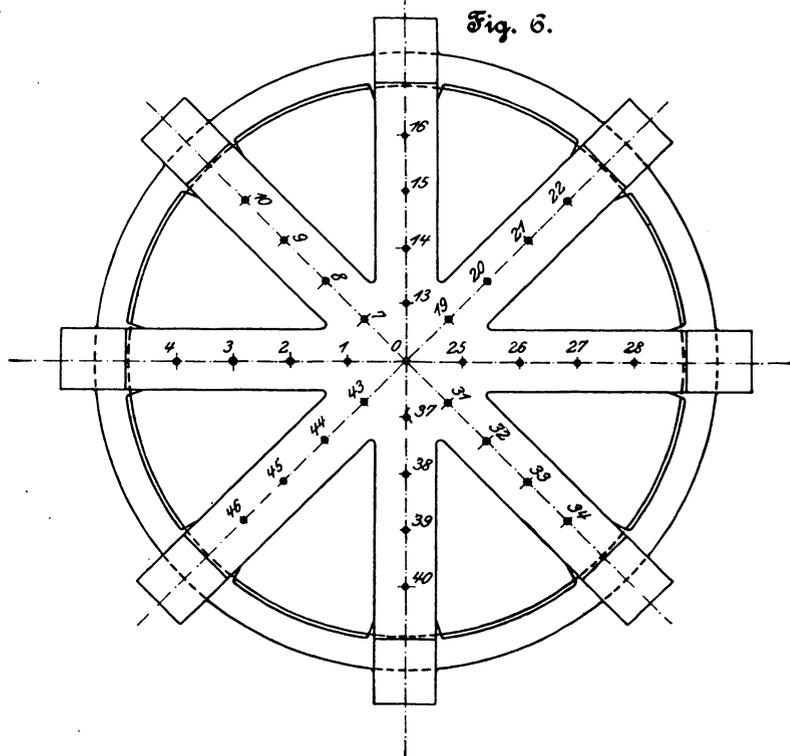
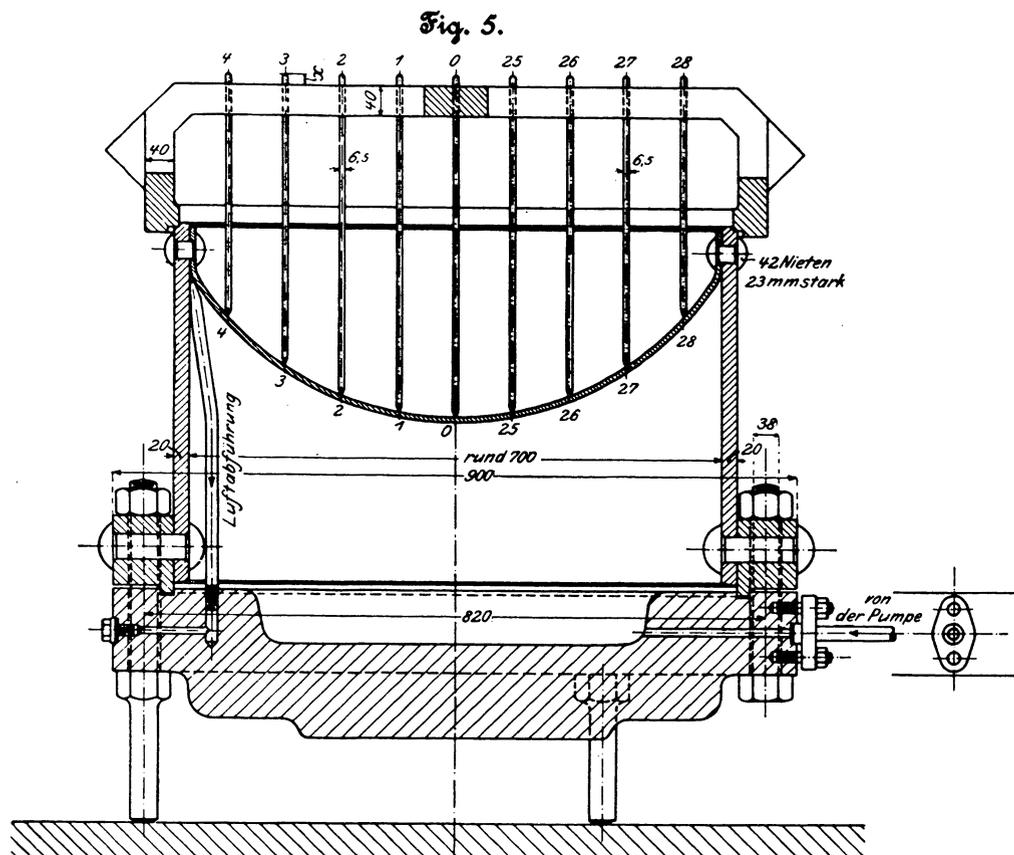
Wege der Rechnung die hier zur Erörterung stehende Aufgabe zu lösen gesucht hätte, etwa ähnlich wie Euler das Knickungsproblem für den geraden Stab gelöst hat.

peraturen bei der Verarbeitung geschädigt worden ist oder aus einem anderen Grunde sich abweichend verhält), sowie Unterschiede im Zustande desselben (beispielsweise durch Temperaturverschiedenheiten herbeigeführt).

Ferner nehmen Einfluss, falls nicht die ganze Hohlkugel vorhanden ist, wie z. B. in den Figuren 3, 4 usw., die Art der Befestigung, die Formgebung und die Größe der maßgebenden Abmessungen an der Befestigungsstelle.

Leider fehlen nun Ergebnisse von Versuchen, welche eine ausreichend sichere Grundlage zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen, bei denen die Gefahr der Einbeulung besteht, liefern könnten. Zur Klarstellung, dass das Bedürfniss nach dieser Richtung in sehr starkem Maße vorhanden ist, sei verwiesen auf die Konstruktion von Kesselköpfen, wie Fig. 3 einen solchen zeigt, ferner auf die in großer Zahl ausgeführten und fortgesetzt zur Ausführung gelangenden Kochpfannen der Brauereien usw. Fig. 4 giebt ein derartiges Kochgefäß wieder. Diese Brau-

pfannen werden zumteil in sehr großen Abmessungen, z. B. mit $r = 2300 \text{ mm}^1$, selbst noch darüber (vergl. das Versuchsmaterial unter B, S. 14 Ziff. 3) zur Ausführung gebracht. Die Heizung erfolgt bei ihnen durch mehr oder minder hoch gespannten Dampf, der sich zwischen den beiden Böden, also in A befindet. Der innere Kugelboden, welcher durch die Dampfspannung auf der äußeren Wandung belastet erscheint, besteht in vielen Fällen aus Kupfer, während der äußere Boden aus Flusseisenblech hergestellt zu werden pflegt. In der That haben diese Kochgefäße, von denen einerseits gefordert werden muss, dass sie genügende Widerstandsfähigkeit besitzen, und andererseits mit Recht verlangt wird, dass sie, namentlich bei Herstellung der Böden aus Kupfer, ohne Materialverschwendung zur Ausführung gelangen, auch die Veranlassung zu den Versuchen gegeben, über welche im Nachstehenden unter A berichtet werden wird.



A) Kugelförmige Wandungen aus Kupfer.

I. Durchführung der Versuche mit den Böden.

Der Untersuchung wurden 10 Böden aus Kupfer, das in der Kugelgestalt kräftig abgehämmert worden war, unterworfen²⁾.

Die Böden sind von der Fabrik A. Ziemann in Feuerbach bei Stuttgart, welche in dem Bau von Braupfannen und sonstigen Kochgefäßen eine große Erfahrung besitzt, in ent-

¹⁾ Häufig wird nicht der Wölbungshalbmesser r angegeben, sondern die Innenweite $2a$ und die zugehörige Pfeilhöhe h , woraus wegen

$$[2(r - s) - h]h = a^2$$

folgt:

$$r = \frac{a^2}{2h} + \frac{h}{2} + s.$$

Im Interesse der Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen Einbeulung ist es angezeigt, h im Verhältnis zu a nicht zu klein zu wählen. So pflegen z. B. gute Ausführungen nach Fig. 4

$$h = 0,55 a \text{ bis etwa } 0,65 a$$

zu zeigen.

²⁾ Nicht gehämmertes Kupfer ist wegen seiner Weichheit (Biegsamkeit), d. h. wegen seiner Neigung zu bleibenden Formänderungen gegenüber äußerem Ueberdruck, weit weniger geeignet.

Durch das Hämmern wird die Elastizitätsgrenze (d. i. die Spannung, von welcher ab bleibende Formänderungen beobachtet werden), die für weiches Kupfer der Null ziemlich nahe liegt, ganz bedeutend gehoben. Die Streckgrenze, insoweit bei Kupfer von einer solchen gesprochen werden kann, erhöht sich dabei von einem Viertel der Zugfestigkeit bis auf etwa das dreifache und noch darüber, je nach der Dicke der Kupferbleche und der Stärke des Hämmerns; sie nähert sich bei den für gewöhnlich in Betracht kommenden Wandstärken (vergl. Zusammenstellung 3) und bei starkem Hämmern der Zugfestigkeit (s. Fig. 25, welche die Dehnungslinie für hart gehämmertes Kupfer zeigt). Vergl. auch C. Bach, Maschinenelemente, ersten Abschnitt, unter »Kupfer«.

gegenkommendster Weise und unentgeltlich geliefert. Die Ausführung war eine sorgfältige. Durch Uebergabe von zwei Lehren, entsprechend zwei verschiedenen Kugelhalbmessern, an die Fabrik hatte ich darauf hingewirkt, größere Abweichungen von dem Kugelhalbmesser sowie flache Stellen fernzuhalten.

Bei den Böden I bis VI ist das Verhältnis zwischen der Weite $2a$ und der Pfeilhöhe h , Fig. 4, so, wie es die ausgeführ-

Boden I, Fig. 7 und 8.

$r = 400$ mm, $s = 7,8$ mm.

Die gesamten bleibenden und federnden Durchbiegungen wurden an allen in Fig. 6 eingetragenen Punkten: 0 1 2 3 4, 7 8 9 10, 13 14 15 16, 19 20 21 22, 25 26 27 28, 31 32 33 34, 37 38 39 40, 43 44 45 46, für Flüssigkeitspressungen p bis zu 60 at ermittelt; ferner noch für $p = 65$ at

Fig. 7.

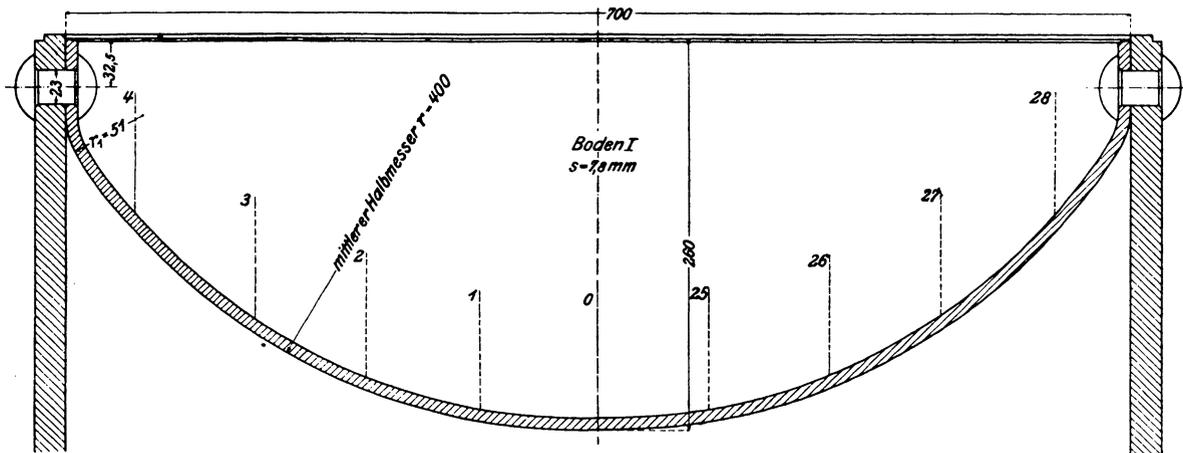
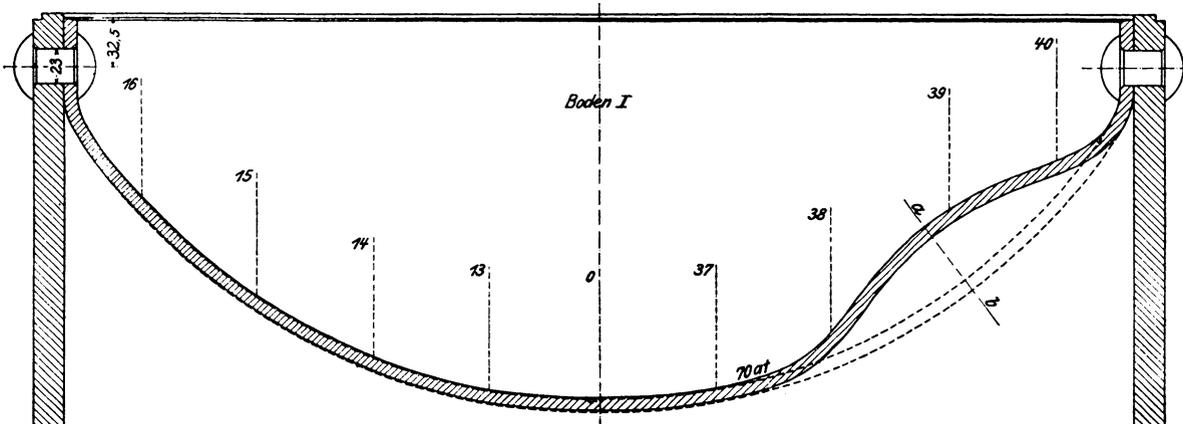


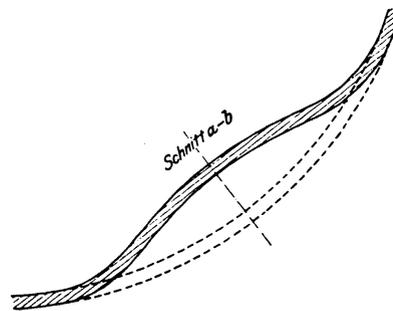
Fig. 8.



ten Gefäße vielfach zeigen (vergl. Fußbemerkung 1 S. 2), während die Böden VII bis X weit flacher gewählt wurden, um bei der durch die Versuchsvorrichtung beschränkten Weite $2a$ verhältnismäßig große Kugelhalbmesser r gegenüber der Wandstärke s zu erhalten.

Die Versuchseinrichtungen waren dieselben wie bei den Untersuchungen, welche ich früher mit flachen Böden (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897 S. 1158 u. f., Fig. 1 bis 3, oder auch Heft 3 der Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen S. 4, Fig. 1 bis 3) sowie mit gewölbten Böden (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1899 S. 1585 u. f., oder auch Heft 5 der Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen) zur Ausführung gebracht habe. Fig. 5 und 6 lassen die Einrichtung mit eingietetem Kupferboden deutlich erkennen. Hinsichtlich der Einzelheiten sei auf die eben genannte Veröffentlichung 1897 verwiesen. Um die langen Messstifte am Schiefstellen zu verhindern, wurde die hohle Bodenfläche an den betreffenden Punkten, d. s. in Fig. 5 die Stellen 0, 1, 2, 3, 4, 25, 26, 27 und 28, durch leichte Körnerschläge mit Vertiefungen versehen, in die sich die unteren, kegelförmig zugespitzten Enden der Messstifte legten und so eine Sicherung ihrer Stellung erfuhren.

Bei den Versuchen waren thätig die Herren Beck, Haberer und gegen das Ende Scheerer.



die gesamten und für $p = 68$ at die bleibenden Durchbiegungen. Belastung und Entlastung fanden also bis 68 at statt. Dabei schwankten die Temperaturen im Versuchsraum zwischen $15,8$ und $19,3^{\circ}$ C.

Die Mittelwerte aus den beobachteten Durchbiegungen, gemessen in Millimetern, sind im Folgenden zusammengestellt¹⁾.

¹⁾ Ueber die Bildung dieser Mittelwerte, je gültig für Punkte, welche ungefähr in dem gleichen Abstand von der Bodenmitte liegen, vergleiche die oben angegebenen Berichte über die Versuche mit flachen und gewölbten Böden (1897 bzw. 1899).

Zusammenstellung 1.
Durchbiegungen.

Pressung p in kg/qcm	Punkt 0		Mittelwerte für die Punkte							
			1, 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43		2, 8, 14, 20 26, 32, 38, 44		3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45		4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46	
	gesamte	bleibende	gesamte	bleibende	gesamte	bleibende	gesamte	bleibende	gesamte	bleibende
1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
1	0,018	0,003	0,011	0	0,010	0	0,010	0	0,005	0
3	0,038	0,003	0,031	0	0,031	0	0,031	0	0,019	0
5	0,063	0,008	0,054	0	0,051	0	0,051	0	0,032	0
7	0,093	0,013	0,079	0,005	0,073	0,004	0,074	0,005	0,046	0,003
9	0,123	0,018	0,104	0,008	0,099	0,007	0,098	0,008	0,060	0,006
11	0,153	0,023	0,129	0,009	0,123	0,011	0,124	0,008	0,081	0,008
13	0,183	0,023	0,153	0,013	0,147	0,013	0,148	0,012	0,097	0,009
15	0,208	0,028	0,178	0,017	0,173	0,016	0,173	0,016	0,116	0,011
17	0,228	0,028	0,202	0,018	0,196	0,018	0,196	0,018	0,128	0,013
19	0,253	0,033	0,229	0,022	0,223	0,021	0,221	0,021	0,143	0,014
21	0,278	0,038	0,256	0,026	0,248	0,024	0,249	0,024	0,164	0,016
23	0,303	0,038	0,279	0,029	0,272	0,027	0,272	0,027	0,184	0,019
25	0,328	0,043	0,302	0,033	0,293	0,031	0,294	0,029	0,198	0,021
30	0,428	0,053	0,383	0,042	0,369	0,047	0,365	0,049	0,254	0,033
35	0,518	0,068	0,456	0,054	0,434	0,063	0,426	0,067	0,301	0,044
40	0,603	0,098	0,565	0,129	0,514	0,104	0,526	0,094	0,366	0,066
45	0,678	0,148	0,678	0,161	0,609	0,137	0,608	0,125	0,451	0,094
60	1,173	0,438	1,093	0,410	1,029	0,379	1,007	0,349	0,780	0,309
65	1,353	—	1,294	—	1,205	—	1,333	—	1,067	—

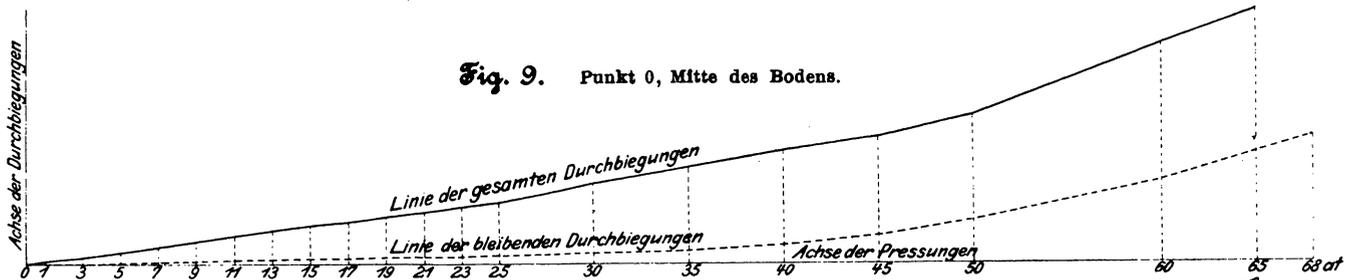


Fig. 10. Punktreihe 1, 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43
im Abstände von rd. 75 mm aus der Mitte.

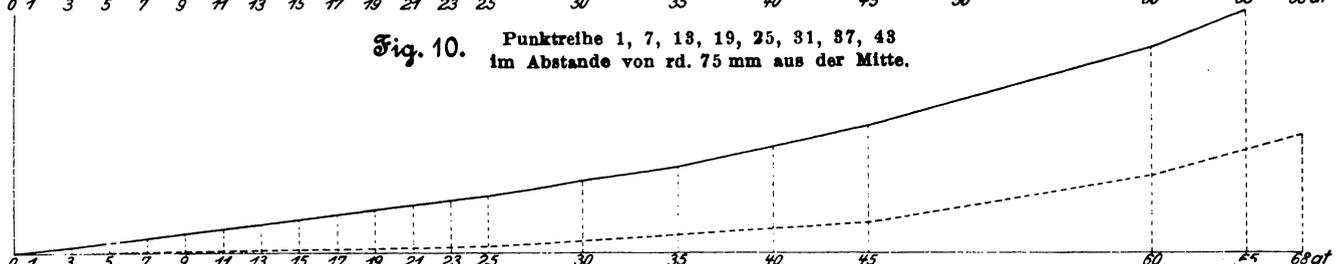


Fig. 11. Punktreihe 2, 8, 14, 20, 26, 32, 38, 44
im Abstände von rd. 150 mm aus der Mitte.

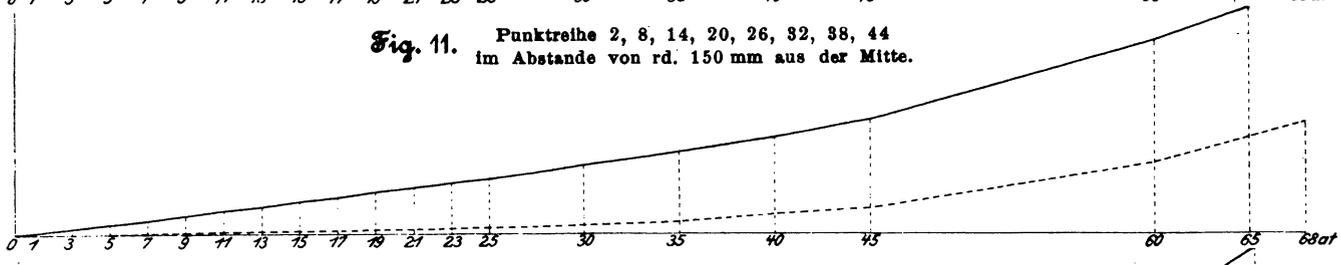


Fig. 12. Punktreihe 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45
im Abstände von rd. 225 mm aus der Mitte.

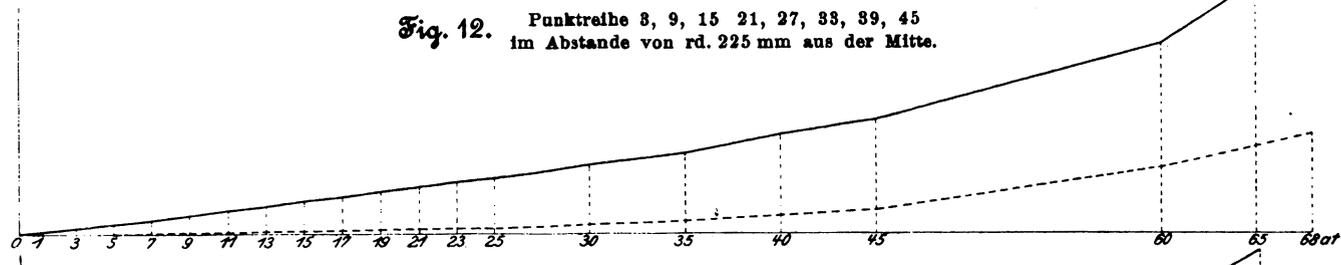
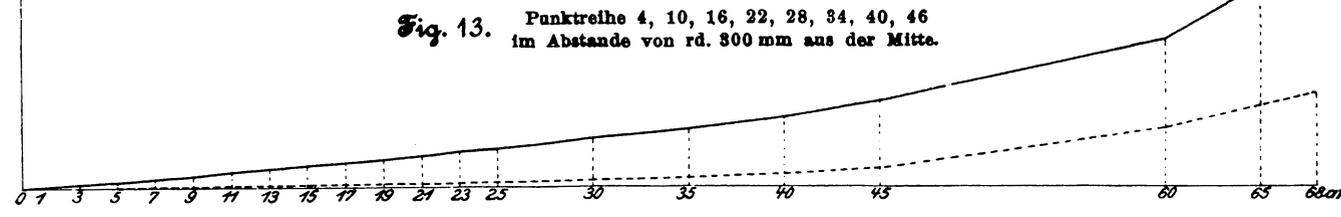


Fig. 13. Punktreihe 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
im Abstände von rd. 300 mm aus der Mitte.



Der Druck wurde bis 70 at gesteigert. Als diese Pressung reichlich 7 Minuten wirksam gewesen war, erfolgte unter Knall eine Einbeulung¹⁾, wobei der Druck bis auf 16 at sank. In Fig. 8 ist diese Einbeulung, nach genauer Aufnahme bei $p = 0$, eingezeichnet. Sie lag ungefähr in der Mitte des Dreieckes 46 0 40, Fig. 6.

Durch Wiederaufnahme des Pumpens liefs sich der Druck unter fortgesetzter Zunahme der Einbeulung bis auf 26 at steigern.

In Fig. 9 sind zu den Flüssigkeitspressungen als Abszissen die zugehörigen gesamten und bleibenden Durchbiegungen in der Bodenmitte, d. i. im Punkte 0, als Ordinaten aufgetragen. Wie ersichtlich, wachsen die gesamten Durchbiegungen bis $p = 25$ at ziemlich gleichmäfsig mit dem Flüssigkeitsdruck; nach Ueberschreiten dieser Pressung, also etwa bei 0,35 bis 0,4 des Einbeulungsdruckes, zeigt sich raschere Zunahme.

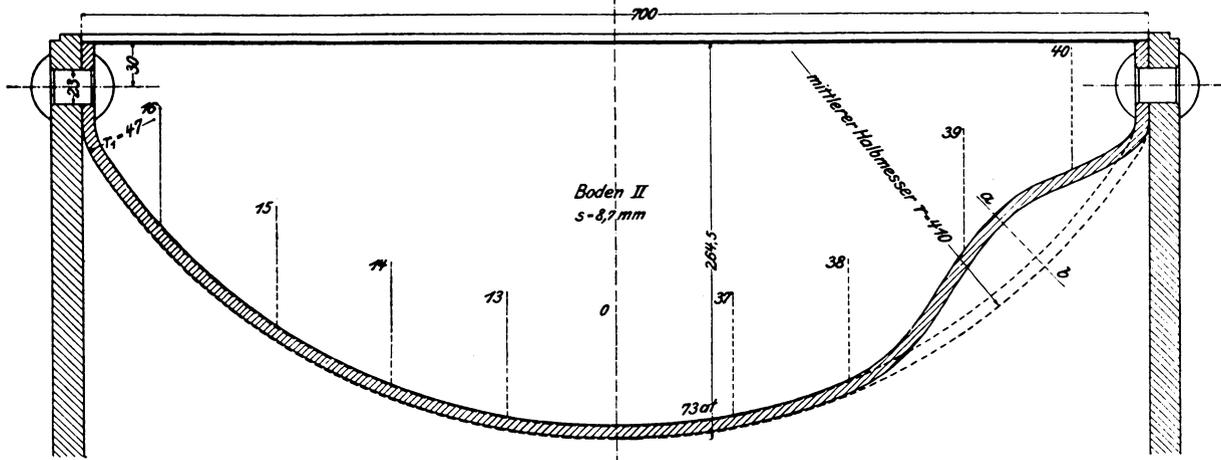
In der bezeichneten Weise wurden r und s auch bei den übrigen Böden ermittelt.

Dass sich der Boden (vergl. Fig. 8) nicht im mittleren Teile der Kugelfläche, sondern mehr nach dem Rande hin einbeulen würde, stand zu erwarten. Es ist dies die Folge davon, dass die Beanspruchung da, wo die mittlere Krümmung vom Halbmesser r in diejenige der Krempung, d. h. wo die eigentliche Hohlkugel in den Hohlkörper der Krempung übergeht, und darüber hinaus, notwendigerweise gröfser sein muss als im mittleren Teile.

Daraus folgt, dass eine volle Hohlkugel unter sonst gleichen Verhältnissen eine gröfsere Einbeulungspressung ergeben haben würde als der Boden, welcher nur in seinem mittleren Teile Kugelgestalt besitzt.

Die durch die Versuche mit dem Boden ermittelte Einbeulungspressung schliesft den Einfluss der Formgebung am Umfange und der damit zusammenhängenden Biegebear-

Fig. 14.



Die Schaulinien, Fig. 10 bis 13, gelten für die Werte der Spalten 3 bis 6, geben also ein Bild der durchschnittlichen Durchbiegungen für die am Kopfe dieser Spalten bezeichneten Punkte. Sie zeigen sämtlich ein rascheres Wachsen der Durchbiegungen nach Ueberschreiten von $p = 25$ at.

In Fig. 7 und 8 ist der Boden dargestellt:

a) im ursprünglichen Zustand, derart ermittelt, dass für die beiden zu einander senkrecht stehenden Achsialebenen 4, 0, 28 und 16, 0, 40 (vergl. Fig. 6) durch Herstellung von Lehren die Form der hohlen Fläche des Bodens genau bestimmt wurde,

b) bei der Pressung 0, nachdem die Einbeulung stattgefunden hatte.

Die Ermittlung unter a) lieferte auch den Kugelhalbmesser r mit genügender Annäherung.

Die Stärke s des Bodens an der Einbeulungsstelle wurde durch Anbohren an mehreren Punkten zu 7,8 mm bestimmt²⁾.

¹⁾ Hieraus erkennt man, dass die Belastungsdauer auf die Höhe der Pressung, bei welcher die Einbeulung stattfindet, nicht ganz ohne Einfluss ist; es wurde deshalb auch jeweils nach Erreichung der beabsichtigten Belastung einige Zeit gewartet, ehe die Pressung auf neue Steigerung erfuhr.

Auf den Belastungsstufen, für welche die gesamten Durchbiegungen bestimmt wurden, hatte die Belastung schon an und für sich mindestens diejenige Zeit zu wahren, welche die Messung der Durchbiegungen an den 33 Punkten erforderte.

Es ist ferner von Interesse, zu beachten, dass, namentlich bei Versuchen mit Böden aus zähem und im kalten Zustande nicht bearbeiteten Flusseisen, verschiedene hohe Einbeulungspressungen erlangt werden, je nachdem man den Boden unter wiederholter Belastung und Entlastung zur Einbeulung bringt, oder ob dabei eine Entlastung nicht stattfindet. Im ersten Falle erhält man eine niedrigere Einbeulungspressung als im zweiten Falle. Die Herbeiführung der Einbeulung mit Wechsel zwischen Belastung und Entlastung — wie oben für den Boden I angegeben — liefert somit eine geringere Widerstandsfähigkeit als die Erzeugung der Einbeulung unter fortgesetzt steigender Belastung.

²⁾ Gehämmertes Kupfer zeigt infolge dieser Bearbeitung Ungleichmäfsigkeiten der Wandstärke, die bei einer mittleren Wandstärke von

spruchung an der Befestigungsstelle gemäß den Verhältnissen, unter denen die Untersuchung stattgefunden hat, in sich.

Boden II, Fig. 14.

$$r = 410 \text{ mm}, s = 8,7 \text{ mm}.$$

Dieser Boden und die folgenden Böden wurden in gleicher, zumteil jedoch in abgekürzter Weise der Pressung unterworfen. Es wird, nachdem das Vorgehen für Boden I ausführlich erörtert worden ist, ausreichen, wenn im Folgenden nur die für die spätere Verwendung nötigen Beobachtungen und Ermittlungen angegeben werden.

Die Einbeulung erfolgte unter Knall bei der Pressung von 73 at, nachdem diese etwa 1 min gewirkt hatte. Der Druck sank auf 20 at. Fig. 14 zeigt diese Einbeulung, gemessen unter dem Druck null.

Bei Wiederaufnahme des Pumpens stieg die Pressung auf 30,3 at unter fortgesetzter Vergrößerung der Einbeulung.

8 mm den Betrag von 1 mm noch erheblich überschreiten können. Sind die Stellen mit der geringsten Wandstärke klein, was beim Hämmern leicht der Fall zu sein pflegt, so ist ihr Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber Einbeulungen unerheblich, weshalb es unter solchen Umständen unrichtig wäre, der Beurteilung die schwächste Stelle zugrunde zu legen.

Boden III, Fig. 15. $r = 412 \text{ mm}$, $s = 5,2 \text{ mm}$.

Unter dem Druck von 36 at war Knistern zu hören; die Einbeulung erfolgte unter Knall bei $p = 36,4 \text{ at}$. Hierbei fiel die Pressung auf 9,2 at.

Fig. 15 lässt die Einbeulung, bestimmt bei $p = 0$, erkennen.

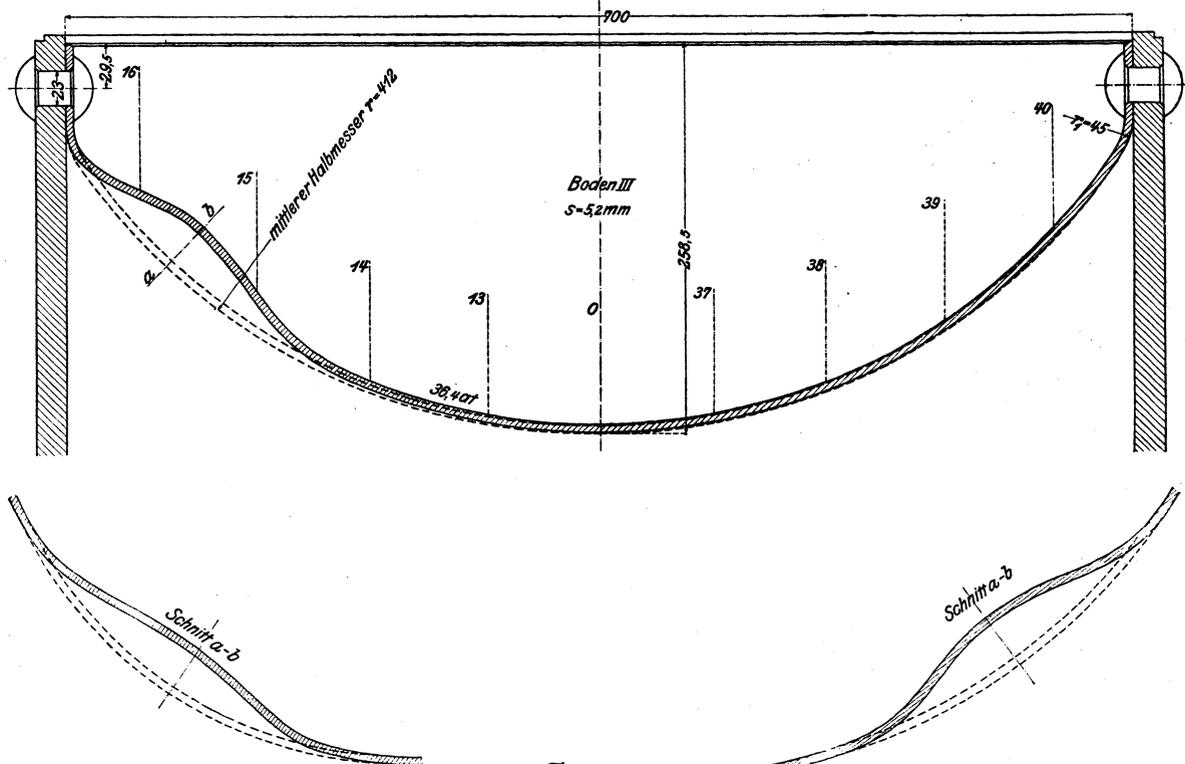
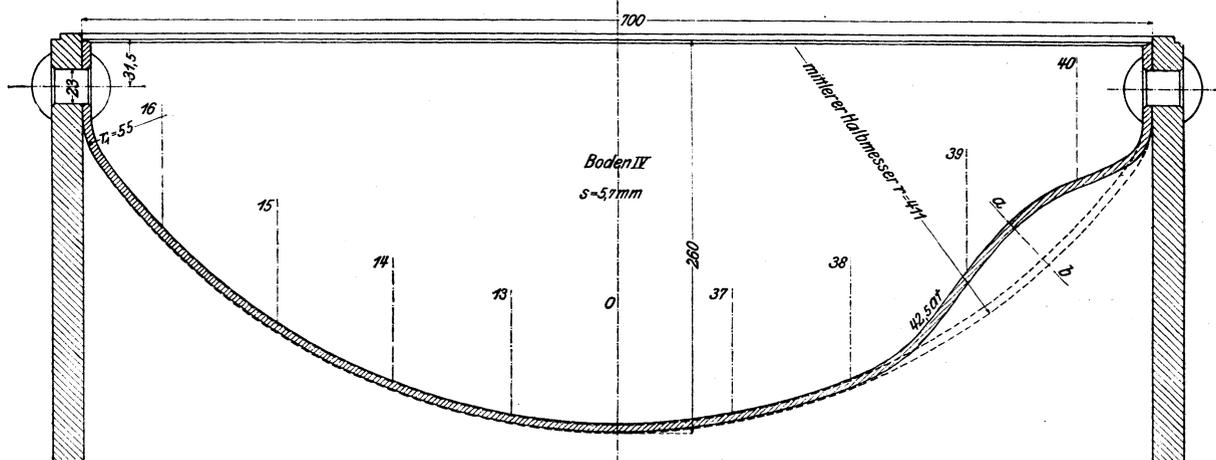
Die Wiederaufnahme des Pumpens führte zu einer Pressung von 16 at.

Boden V, Fig. 17. $r = 405 \text{ mm}$, $s = 2,8 \text{ mm}$.

Knistern wurde hier schon bei 3 at bemerkt. Die Einbeulung erfolgte unter Knall bei 16,2 at unter Sinken des Druckes auf 4,2 at.

Fig. 17 zeigt die Form und GröÙe der Einbeulung.

Die Wiederaufnahme des Pumpens führte zu einer Pressung von 6,5 at.

Fig. 15.**Fig. 16.****Boden IV, Fig. 16.** $r = 411 \text{ mm}$, $s = 5,7 \text{ mm}$.

Bei Steigerung des Druckes von 35 auf 40 at war Knistern zu beobachten. Die Einbeulung fand unter Knall bei $p = 42,5 \text{ at}$ statt, wobei der Druck auf 9 at zurückging.

Fig. 16 zeigt die Einbeulung bei $p = 0$.

Die Wiederaufnahme des Pumpens führte zu einer Pressung von 17,1 at.

Boden VI, Fig. 18. $r = 412 \text{ mm}$, $s = 2,8 \text{ mm}$.

Einbeulung erfolgte unter Knall bei $p = 14,8 \text{ at}$; der Druck sank auf 3,7 at.

In Fig. 18 ist die Einbeulung dargestellt.

Die Wiederaufnahme des Pumpens ergab $p = 6,7 \text{ at}$.

Boden VII, Fig. 19. $r = 855 \text{ mm}$, $s = 7,8 \text{ mm}$.

Während für die Böden I bis VI das Verhältnis des Wölbungshalbmessers zur Pfeilhöhe ungefähr so gewählt war, wie es die Kupferböden bei den in Fig. 4 dargestellten Ge-

fäßen zeigen, wurden die Böden VII bis X weit flacher geformt, wie dies schon oben bemerkt worden ist.

Die Pressung wurde bei Boden VII stetig bis 24,5 at gesteigert. Unter diesem Druck entstand allmählich — also ohne Knall — Einbeulung, und trotz fortgesetzten Pumpens sank die Pressung auf 16,5 at.

Fig. 17.

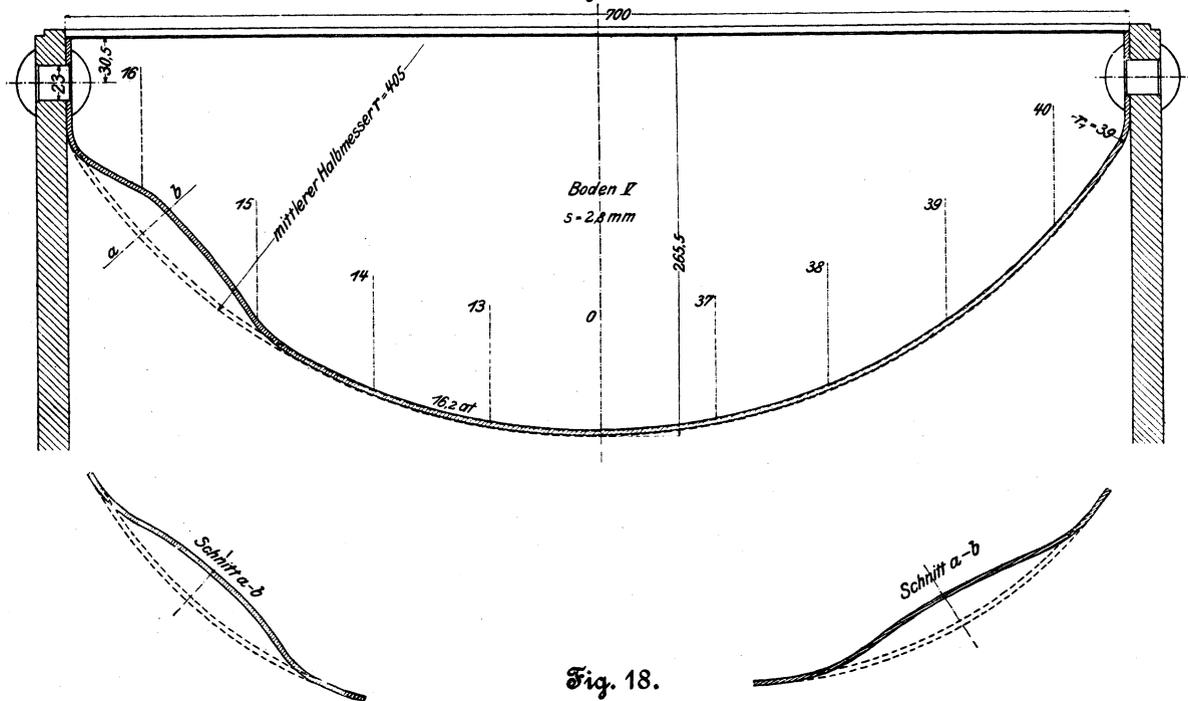


Fig. 18.

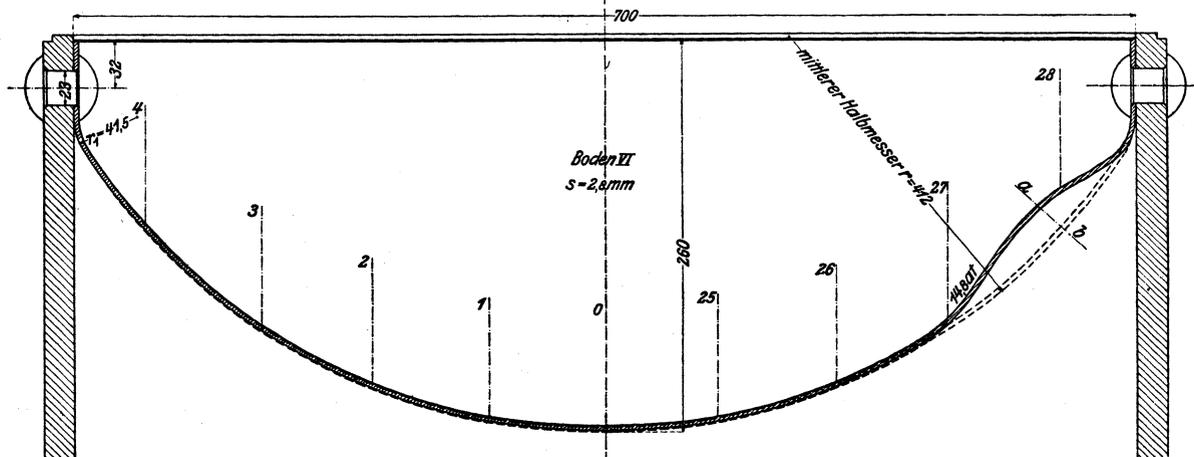
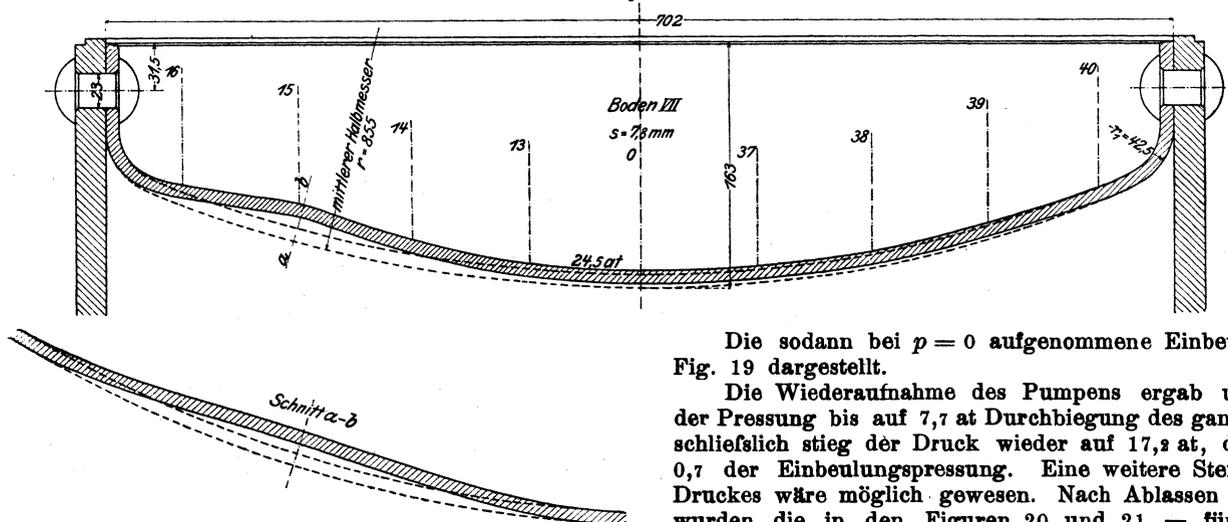


Fig. 19.



Die sodann bei $p = 0$ aufgenommene Einbeulung ist in Fig. 19 dargestellt.

Die Wiederaufnahme des Pumpens ergab unter Fallen der Pressung bis auf 7,7 at Durchbiegung des ganzen Bodens; schließlich stieg der Druck wieder auf 17,2 at, d. i. auf rd. 0,7 der Einbeulungspressung. Eine weitere Steigerung des Druckes wäre möglich gewesen. Nach Ablassen des Wassers wurden die in den Figuren 20 und 21 — für zwei sich

rechtwinklig schneidende Ebenen — gezeichneten Durchbiegungen festgestellt.

Es bildet sich also nach Eintritt der Einbeulung unter steigender Flüssigkeitspressung eine neue Bodenform heraus, an der sich die Belastung des Bodens durch die Flüssigkeitspressung und die Widerstandskräfte, welche die Befestigung des Bodens am Umfange wirksam werden lässt, das Gleichgewicht halten¹⁾.

Boden VIII, Fig. 22.

$$r = 870 \text{ mm}, s = 8,3 \text{ mm}.$$

Zunächst unter dem Druck von 18,2 at, sodann bei $p = 20,2$ at wurde Knistern beobachtet. Unter der Pressung von 21,1 at bildete sich allmählich — also wieder ohne Knall

Fig. 20.

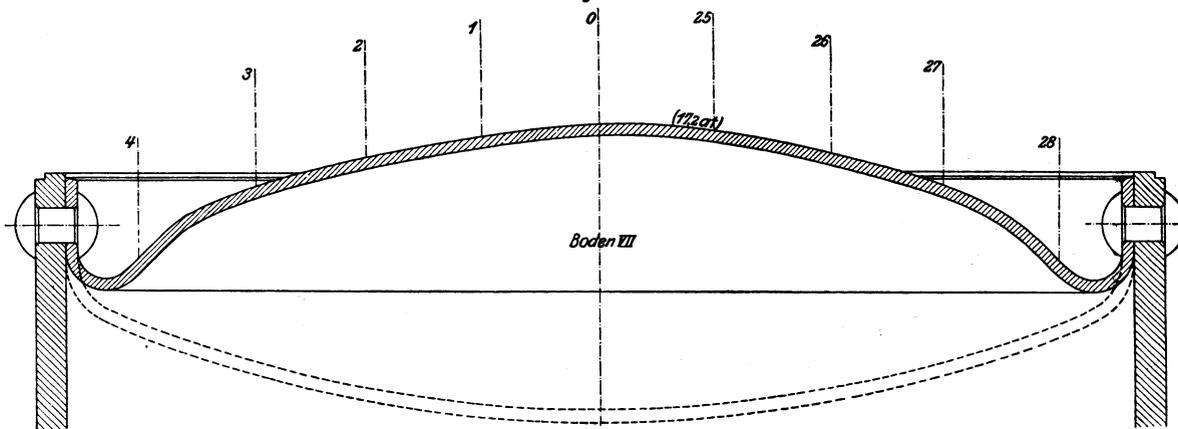


Fig. 21.

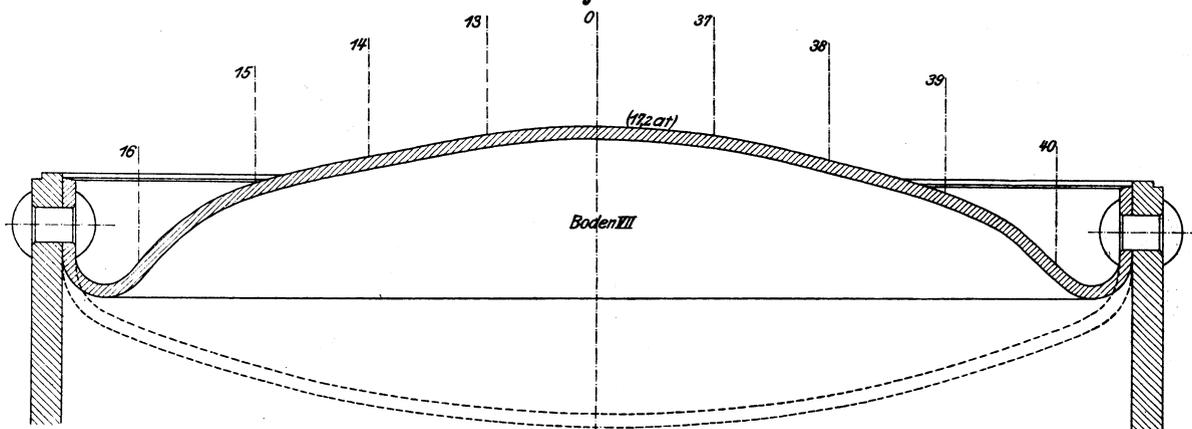
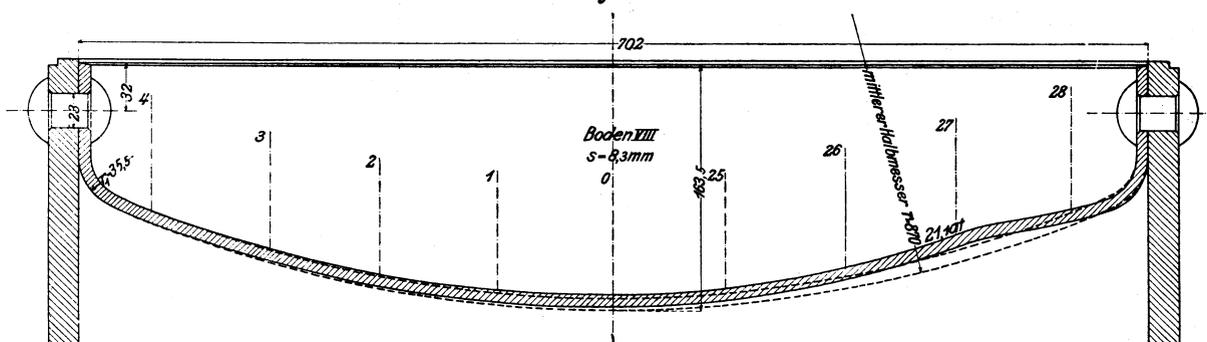


Fig. 22.



¹⁾ Dieses Verhalten von gewölbten Böden aus zähem Material gegenüber äußerem Ueberdruck bietet im Falle einer Einbeulung noch eine gewisse Sicherung, ausreichende Zähigkeit des Materials vorausgesetzt. Je nach der ursprünglichen Form des Bodens und dem Material desselben liegt die Flüssigkeitspressung, welcher die neue Bodenform Widerstand leistet, mehr oder weniger unter- oder auch oberhalb der Einbeulungspressung. Bei den 3 Flusseisenböden, über welche unter B, I berichtet werden wird, ergab sie sich für

$$\text{Boden E zu } \frac{31}{25} p_0 = 1,24 p_0,$$

$$\text{» F » } \frac{43}{29} p_0 = 1,48 p_0,$$

$$\text{» G » } \frac{51}{54,5} p_0 = 0,94 p_0.$$

— eine Einbeulung, trotz fortgesetzten Pumpens sank die Pressung auf $p = 16,7$ at.

Die hierauf bei $p = 0$ ermittelte Einbeulung lässt Fig. 22 erkennen. In tangentialer Richtung erstreckt sie sich nahezu auf die Hälfte des Umfanges.

Der Boden macht den Eindruck, als ob er weniger stark gehämmert worden sei als die übrigen, also etwas weiches, früher zur bleibenden Formänderung neigendes Material besitze.

Selbstverständlich nimmt auch die neue Bodenform Einfluss, die ihrerseits wieder davon abhängt, wie weit man die Pressung bei der Neubildung gesteigert hat.

Boden IX, Fig. 23.

$r = 870 \text{ mm}$, $s = 2,8 \text{ mm}$.

Von $p = 1 \text{ at}$ an wurde Knistern beobachtet. Unter $p = 2,8 \text{ at}$ bildete sich allmählich eine Einbeulung, wobei ohne Nachpumpen der Druck auf $2,3 \text{ at}$ sank. Die sodann unter $p = 0$ ermittelte Formänderung zeigt Fig. 23.

Bei Wiederaufnahme des Pumpens stieg der Druck auf $2,1 \text{ at}$, sank sodann auf $1,75 \text{ at}$. In Fig. 23 ist auch diese Einbeulung, und zwar unter Druck aufgenommen, eingetragen.

I und V mittels Fräser herausgeschnitten, gerade gerichtet und nach Formgebung durch Fräsen der Zugprobe unterworfen. Sie sind in der Folge mit A_1, A_2, A_3 bzw. B_1, B_2, B_3 bezeichnet.

Stab A_1 .

Stärke $s = 0,76 \text{ cm}$, Breite $b = 3,6 \text{ cm}$, Querschnitt $f = 0,76 \cdot 3,6 = 2,74 \text{ qcm}$.

Die Zugprobe lieferte den Dehnungskoeffizienten der Federung

Fig. 23.

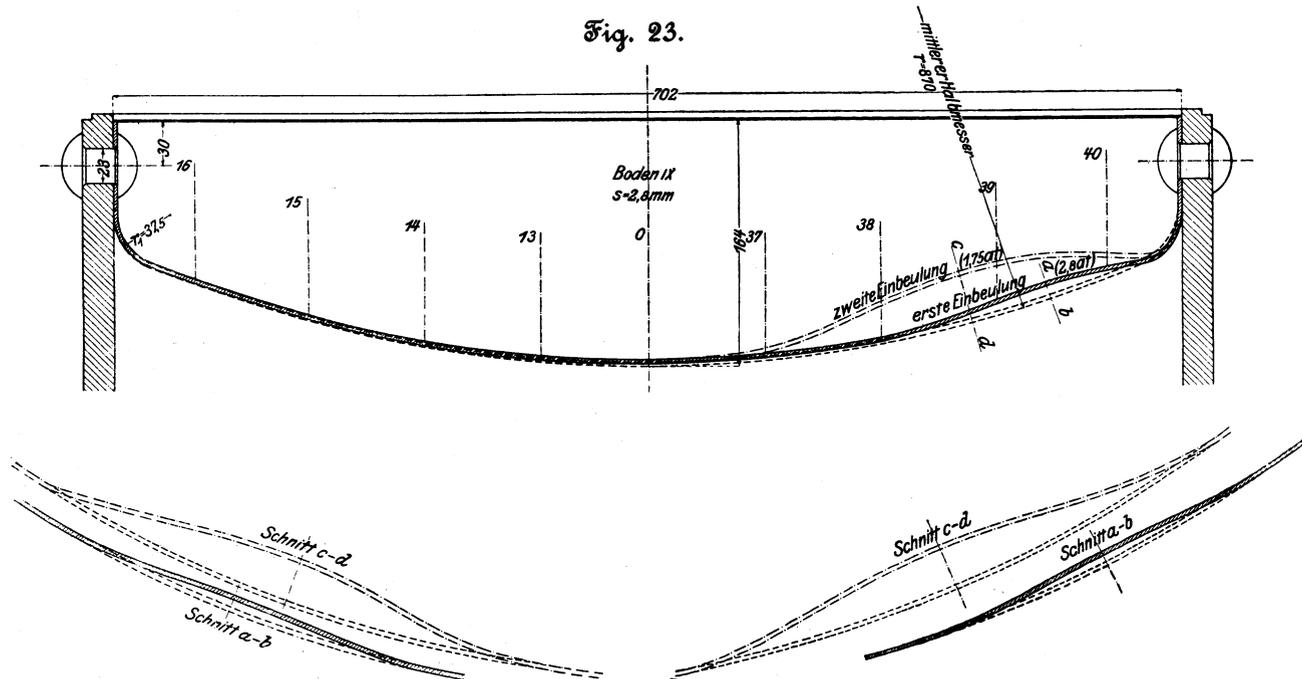
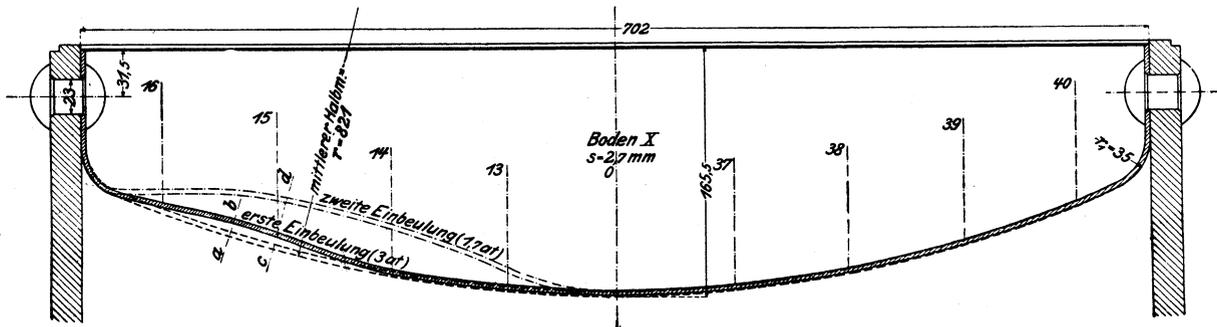


Fig. 24.



Boden X, Fig. 24.

$r = 821 \text{ mm}$, $s = 2,7 \text{ mm}$.

Von $p = 1,5 \text{ at}$ an wurde Knistern gehört. Bei $2,7 \text{ at}$ begann sich die Einbeulung deutlich zu entwickeln; bei $p = 3 \text{ at}$ nahm sie unter schwachem Knall plötzlich zu, wobei der Druck auf 2 at zurückging. Die unter $p = 0$ festgestellte Formänderung ist in Fig. 24 eingetragen.

Bei Wiederaufnahme des Pumpens liefs sich der Druck auf $p = 2 \text{ at}$ steigern; er fiel sodann trotz des Pumpens auf $1,7 \text{ at}$ zurück. Die Einbeulung, welche sich hierbei eingestellt hatte, ist gleichfalls in Fig. 24 eingezeichnet.

II. Prüfung des Kupfers der Böden.

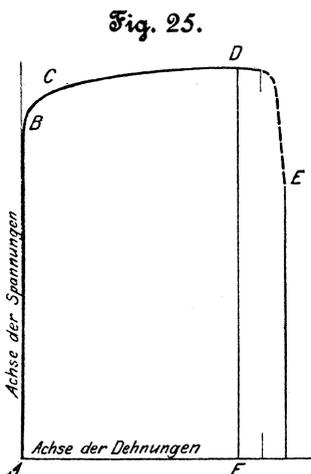
Zur Prüfung des Kupfers, aus dem die Böden bestanden, wurden je 3 Flachstäbe aus den mittleren Teilen der Böden

für die Spannungsstufe $182,5/365 \text{ kg/qcm}$	1
» » » $182,5/547,4$ »	1
» » » $182,5/729,9$ »	1
» » » $182,5/912,4$ »	1
» » » $182,5/1094,9$ »	1
	1278 000
	1244 000
	1216 000
	1200 000
	1195 000

die Zugfestigkeit K , ergab sich zu 2142 kg/qcm
 » Bruchdehnung φ ergab sich zu $10,2 \text{ vH}$
 » Querschnittsverminderung ψ ergab sich zu $26,6 \text{ »}$

Die Bruchstelle war durch die Einschnitte für das Instrument zur Ermittlung der Dehnungen etwas verletzt worden, weshalb sich sowohl K_z , noch mehr aber φ und ψ kleiner ergeben mussten als sonst (vergl. Stab A_2).

In Fig. 25 ist die Dehnungslinie $ABCDE$ dargestellt. Hätte die erwähnte Verletzung nicht stattgefunden, so würde eine weit längere Schaulinie ermittelt worden sein. Der Punkt B , von dem ab ein rascheres Wachsen der Dehnungen sich einstellt, liegt auf der Höhe von reichlich 1800 kg/qcm, also ziemlich nahe der Zugfestigkeit¹⁾. (Vergl. das in der Fußbemerkung 2 auf S. 2 Gesagte.)



Stab A_2 .

$s = 0,74 \text{ cm}, b = 3,66 \text{ cm}, f = 2,71 \text{ qcm}, K_z = 2277 \text{ kg/qcm}.$

Der Bruch erfolgte außerhalb der Messlänge²⁾, weshalb φ und ψ nicht bestimmt wurden.

Stab A_3 .

$s = 0,76 \text{ cm}, b = 3,53 \text{ cm}, f = 2,68 \text{ qcm}, K_z = 2216 \text{ kg/qcm},$
 $\varphi = 22,7 \text{ vH (auf 190 mm)}, \psi = 47,8 \text{ vH}.$

Stab B_1 .

$s = 0,24 \text{ cm}, b = 4,98 \text{ cm}, f = 1,20 \text{ qcm}, K_z = 2417 \text{ kg/qcm}$
 (Bruch erfolgte außerhalb der Messlänge).

Stab B_2 .

$s = 0,23 \text{ cm}, b = 4,98 \text{ cm}, f = 1,15 \text{ qcm}, K_z = 2435 \text{ kg/qcm}$
 (Bruch erfolgte wie bei Stab B_1).

Stab B_3 .

$s = 0,23 \text{ cm}, b = 4,94 \text{ cm}, f = 1,14 \text{ qcm}, K_z = 2390 \text{ kg/qcm},$
 $\varphi = 20 \text{ vH (auf 120 mm)}, \psi = 43 \text{ vH}.$

Wird der Stab A_1 wegen der Verletzung des Bruchquerschnittes außer Betracht gelassen, so findet sich

a) für das stärkere Kupfer

$$K_z = \frac{2277 + 2216}{2} = 2246,5 \text{ kg/qcm},$$

b) für das schwächere Kupfer

$$K_z = \frac{2417 + 2435 + 2390}{3} = 2414 \text{ kg/qcm}.$$

¹⁾ In des Verfassers Maschinenelementen, 8. Aufl. S. 77, wird durch Fig. 83 die Dehnungslinie für einen Stab aus nicht gehämmertem Kupfer wiedergegeben. Der Vergleich dieser Linie mit Fig. 25 lässt den Unterschied deutlich hervortreten.

²⁾ Da sich dies mehrfach ereignete, so sei darauf hingewiesen, dass der Grund hierfür in der Ungleichmäßigkeit der Stärke der Versuchstäbe liegt, welche eine Folge des Hämmerns des Materials ist.

Der Unterschied der Werte K_z unter a) und b) dürfte auf Rechnung des Einflusses des Hämmerns zu setzen sein. Der Gesamtdurchschnitt beträgt

$$K_z = \frac{2277 + 2216 + 2417 + 2435 + 2390}{5} = 2347 \text{ kg/qcm}.$$

III. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und Folgerungen aus ihnen.

In der folgenden Zusammenstellung ist das Wesentliche der Versuchsergebnisse niedergelegt.

Spalte 2 giebt die Flüssigkeitspressung p_0 , welche die Einbeulung herbeiführte,

- » 3 enthält den äußeren Halbmesser r der Hohlkugel,
- » 4 » die Wandstärke s an der Einbeulungsstelle,
- » 5 » das Verhältnis $r : s$,
- » 6 » die Druckbeanspruchung k_0 , welche sich, s. Fig. 2, aus der Gleichung

$$\pi r^2 p_0 = 2 \pi r s k_0$$

zu

$$k_0 = \frac{1}{2} p_0 \frac{r}{s} \dots \dots \dots (1)$$

ergiebt.

Zusammenstellung 2.

Bezeichnung des Bodens	Einbeulungsdruck p_0 at	Wölbungshalbmesser r mm	Wandstärke s mm	$\frac{r}{s}$	$k_0 = \frac{1}{2} p_0 \frac{r}{s}$ kg	$\frac{r}{s} \sqrt{\frac{2550 - 120}{r}}$	gesamter Unterschied in	
							kg	vH
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	70,0	400	7,8	51,3	1795	1691	+ 104	+ 5,79
II	73,0	410	8,7	47,1	1719	1727	- 8	- 0,47
III	36,4	412	5,2	79,2	1442	1482	- 40	- 2,77
IV	42,5	411	5,7	72,1	1582	1581	+ 1	+ 0,07
V	16,2	405	2,8	144,8	1171	1108	+ 63	+ 5,38
VI	14,8	412	2,8	147,1	1089	1095	- 6	- 0,55
VII	24,5	855	7,8	109,6	1848	1295	+ 48	+ 3,57
VIII	21,1	870	8,3	104,8	1106	1322	- 216	- 19,53
IX	2,8	870	2,8	310,7	435	434	+ 1	+ 0,23
X	3,0	821	2,7	304,1	456	457	- 1	- 0,22

Greifen wir Boden I und Boden X heraus, so ersehen wir, dass im ersteren Falle bei $r:s=51,3$ die Druckspannung k_0 sich zu 1795 kg/qcm ergibt, dagegen im letzteren Falle bei $r:s=304,1$ nur 456 kg/qcm, also ungefähr bloß ein Viertel dieses Wertes beträgt. Wir erkennen (bei Auserachtlassung kleiner Unregelmäßigkeiten): Je geringer die Wandstärke s im Verhältnis zum Wölbungshalbmesser r ist, um so niedriger ergibt sich die Druckspannung k_0 , bei welcher die Einbeulung erfolgt, also auch die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber äußerem Ueberdruck. Deutlich tritt hier die Eigenartigkeit der Beanspruchung der kugelförmigen Wandung durch äußeren Ueberdruck zutage.

Bei den Versuchen, die Abhängigkeit der Druckspannung k_0 von $r:s$ durch eine möglichst einfache Beziehung zum Ausdruck zu bringen, bin ich u. a. auch auf die Gesetzmäßigkeit

$$k_0 = A - B \sqrt{\frac{r}{s}} \dots \dots \dots (2)$$

gekommen. Mit den abgerundeten Werten

$$A = 2550 \text{ und } B = 120$$

geht Gl. (2) über in

$$k_0 = 2550 - 120 \sqrt{\frac{r}{s}} \dots \dots \dots (3)$$

Damit finden sich die in Spalte 7 der Zusammenstellung 2 eingetragenen Werte.

Die Spalten 8 und 9 geben den Unterschied zwischen den aus der Beobachtung erlangten Werten von k_0 (Spalte 6) und den aus Gl. (3) berechneten Werten von k_0 (Spalte 7) in kg bzw. in Hundertteilen.

In Fig. 26 ist die durch Gl. (3) bestimmte Kurve dargestellt; außerdem sind die aus der Beobachtung mittels Gl. (1) abgeleiteten Werte von k_0 als Einzelpunkte eingetragen: Punkt I gilt für Boden I, Punkt II für Boden II usw. Abgesehen von dem Punkte VIII, welcher dem Anschein nach — wie schon früher bemerkt — weniger stark gehämmert war, zeigen diese Einzelpunkte eine sehr befriedigende Lage zur Linie Gl. (3). Die Übereinstimmung ist größer, als bei so eigenartigen Verhältnissen, wie sie hier vorliegen, zu erwarten steht.

Außerordentlich anschaulich zeigt die Kurve den Einfluss des Verhältnisses $r:s$ auf die Druckspannung k_0 , bei welcher die Einbeulung stattfindet, und damit die Abnahme der Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen bei wachsender Größe des Verhältnisses zwischen Wölbungshalbmesser r und Wandstärke s .

Die Gültigkeit von Gl. (3) ist, wie aus dem Gange der Entwicklung folgt, zunächst beschränkt auf die untersuchten gehämmerten Kupferböden, also insbesondere auch auf die Form und die Befestigungsweise, wie sie die Versuchsböden zeigen, und auf das durch den größten und den kleinsten Wert von $r:s$ (Spalte 5) begrenzte Gebiet.

Wenn die Gleichung in letzterer Hinsicht darüber hinaus noch verwendbar sein sollte, so müsste sie bei kleinem Werte von $r:s$ für k_0 Zahlen liefern, die ungefähr der Festigkeit des Materials entsprechen. Der kleinste Wert von $r:s$, welcher sinngemäß noch herangezogen werden könnte, ergibt sich aus $r=s$ zu 1, somit nach Gl. (3)

$$(k_0)_{\max} = 2550 - 120 = 2430 \text{ kg/qcm.}$$

In der That fanden wir auf S. 10 die Zugfestigkeit des Kupfers im Einzelfalle (Stab B, aus Boden V) bis 2435 kg/qcm reichend und im Durchschnitt zu 2347 kg/qcm¹⁾.

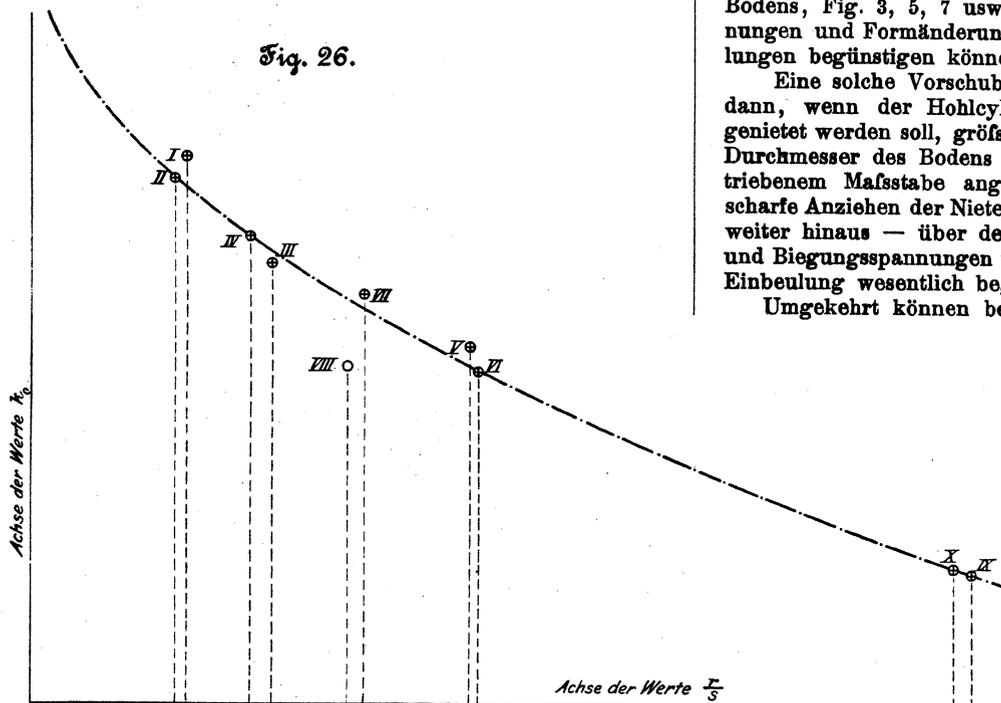
Für große Werte von $r:s$ zieht Gl. (3) eine Grenze, denn mit $k_0 = 0$ liefert sie

$$0 = 2550 - 120 \sqrt{\frac{r}{s}},$$

$$\frac{r}{s} = 451,6,$$

d. h. ein Boden, dessen Wölbungshalbmesser das 451,6fache der Wandstärke beträgt, würde überhaupt gegenüber einem

¹⁾ Streng genommen wäre die Widerstandsfähigkeit gegenüber Druck (Quetschgrenze, Druckfestigkeit, vergl. in dieser Hinsicht Schlusssatz der Fußbemerkung 2 auf S. 2) zum Vergleiche heranzuziehen, doch musste auf deren Bestimmung verzichtet werden.



äußeren Ueberdruck nicht mehr widerstandsfähig sein, selbst wenn dieser klein wäre. Beispielsweise würde dies für eine Hohlkugel von 1 mm Wandstärke bedeuten, dass bei einem Durchmesser von reichlich 900 mm eine eigentliche Widerstandsfähigkeit gegenüber äußerem Ueberdruck nicht mehr vorhanden sei¹⁾. Aus dem praktischen Gefühl heraus wird sich hiergegen wenig einwenden lassen²⁾.

Für größere Wandstärken, z. B. 10 mm, würde man als Grenze auf den Durchmesser von reichlich 9 m kommen²⁾. Wenn nun auch hier infolge des Umstandes, dass größere Wandstärken gegenüber Biegung verhältnismäßig widerstandsfähiger erscheinen, das praktische Gefühl geneigt sein dürfte, einer derartigen Hohlkugel noch einen Ueberdruck zuzumuten, so wird dieser doch nur gering sein dürfen.

Unter Bezugnahme auf das Vorstehende wird ausgesprochen werden dürfen, dass die Gleichung (3) auch noch über die oben für $r:s$ angegebenen Grenzen hinaus benutzt werden kann, nach der für Einbeulungen inbetracht kommenden Richtung hin bis etwa $r:s = 350$.

IV. Zulässige Belastung der kugelförmigen Kupferböden von Braupfannen und ähnlichen Kochgefäßen.

Bei den im Späteren über diese zulässige Belastung gemachten Angaben, welche sich auf die im Vorhergehenden besprochenen Versuche stützen, werden die folgenden Voraussetzungen zu beachten sein.

a) Das Material der Böden ist gut und die Ausführung derselben, namentlich auch in Hinsicht auf die Vollkommenheit der Form, sorgfältig.

b) Bedeutende Ungleichartigkeiten der auf S. 1 (Fußbemerkung daselbst) bezeichneten Art sind nicht vorhanden; insbesondere treten größere Unterschiede in den Temperaturen an den verschiedenen Stellen der Wandung nicht auf.

c) Da die Heizung der Gefäße durch Dampf erfolgt, der sich niederschlägt und damit die erwähnten Temperaturunterschiede, soweit solche vorhanden sind, auszugleichen bestrebt ist, so darf diese Voraussetzung als erfüllt angesehen werden.

Der Heißdampf überschreitet die Spannung von 5 at, entsprechend 158°C Temperatur, nicht.

Für wesentlich höhere Temperaturen würde der Abnahme der Widerstandsfähigkeit des Kupfers mit steigender Temperatur durch Erniedrigung der Materialanstrengung Rechnung zu tragen sein.

d) Bei der Befestigung, insbesondere bei Einnietung des Bodens, Fig. 3, 5, 7 usw., ist darauf zu achten, dass Spannungen und Formänderungen, die das Entstehen von Einbeulungen begünstigen können, ferngehalten werden.

Eine solche Vorschubleistung kann leicht eintreten, z. B. dann, wenn der Hohlzylinder, in welchen der Boden eingietet werden soll, größere Weite besitzt, als dem äußeren Durchmesser des Bodens entspricht, wie in Fig. 27 in übertriebenem Maßstabe angenommen worden ist. Durch das scharfe Anziehen der Niete werden — etwa bis α hin und noch weiter hinaus — über den ganzen Umfang Formänderungen und Biegungsspannungen wachgerufen, die das Entstehen einer Einbeulung wesentlich begünstigen.

Umgekehrt können bei nicht genügend weitem Cylinder, der stark erwärmt werden muss, um den Boden überhaupt einbringen zu können, mit der Erhaltung des Cylindermantels

¹⁾ Mit Rücksicht auf den Schlusssatz des unter Boden I Dargelegten würde sich für eine ganze Hohlkugel noch ein größerer Wert des Durchmessers ergeben.

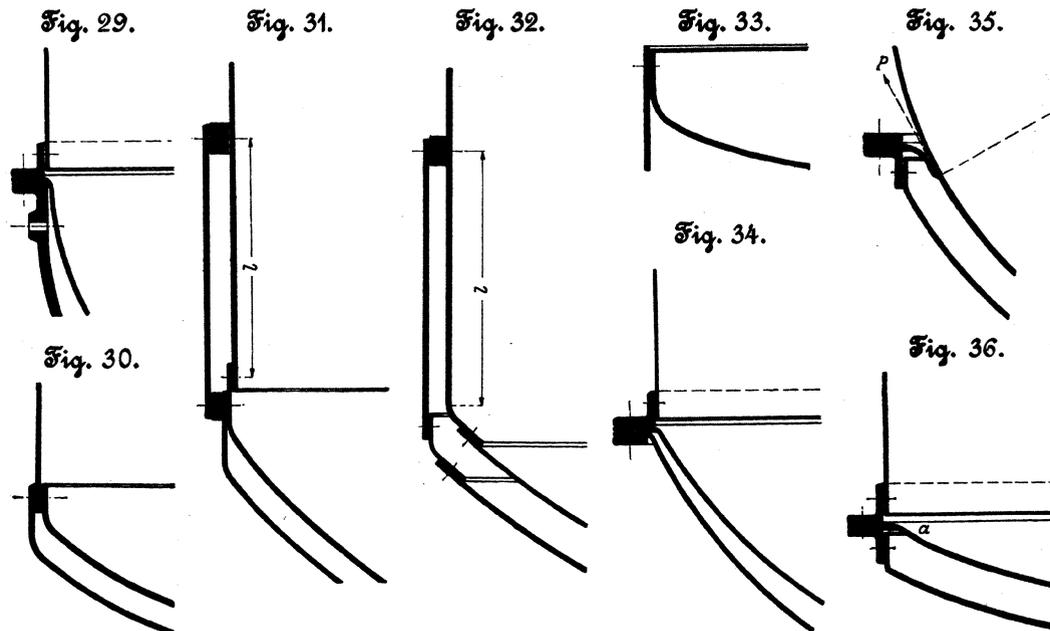
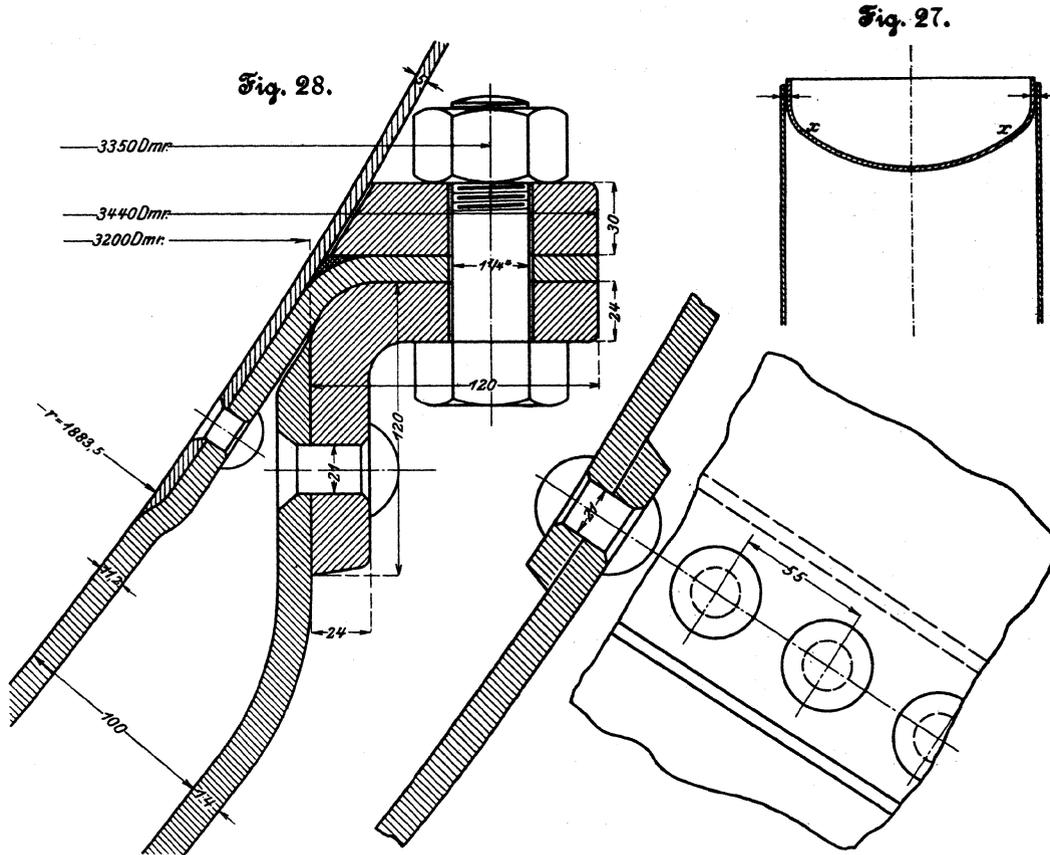
²⁾ Dieses Beispiel zeigt auch, dass der Gedanke, den man für den ersten Augenblick haben kann, die Funktion für k_0 sei so zu wählen, dass die Kurve Fig. 26 asymptotisch zur Achse der Werte $r:s$ verlaufe, nicht ganz die volle Wirklichkeit berücksichtigt.

Formänderungen und Spannungen im Boden wachgerufen werden, welche die Widerstandsfähigkeit gegen Einbeulung erhöhen¹⁾.

e) Die Gestalt des Bodens und seine Befestigung am Umfange müssen so sein, dass die von der Befestigungsstelle

belasteten Hohlkugel von vollkommener Form und Gleichartigkeit, Fig. 2, nur die durch Gleichung

$$k = \frac{1}{2} p \frac{r}{\sigma} \dots \dots \dots (4)$$



auf die Kugelwandung zurückwirkende Biegungsanspruchnahme nicht zu bedeutend ausfällt.

Die Figuren 4 und 28 bis 36 geben eine Anzahl solcher Verbindungen wieder.

Während bei einer ganzen, durch äußeren Ueberdruck

bestimmte Druckspannung stattfindet, lassen sämtliche Konstruktionen, Fig. 4 und 28 bis 36, im Falle scharfer Betrachtung erkennen, dass bei den am Umfange befestigten Böden ein biegendes Moment hinzutritt. Dieses Moment erscheint z. B. im Falle der Figur 35 bestimmt: durch den Kugelwandungsdruck *P* und durch den Abstand, in welchem dieser Druck sich von demjenigen Punkte der Befestigungsstelle befindet, in dem er aufgefangen wird.

Die Konstruktion Fig. 28, eine Einzelheit der Gefäßkonstruktion Fig. 4 für 4 at höchsten Betriebsdruck (A. Ziemann in

¹⁾ Dieser die Widerstandsfähigkeit verstärkende Einfluss des Warmaufziehens des Cylinders auf den kugelförmigen Boden kann recht erheblich sein, wie Verfasser bei Untersuchung kugelförmiger Böden aus Flusseisen fand.

Feuerbach), läßt — im Gegensatz zu Fig. 35 — das Bestreben, das bezeichnete Moment nach Möglichkeit gering zu halten, besonders deutlich erkennen: der Druck, welcher infolge der Flüssigkeitspressung in der Kugelwandung wachgerufen wird und sich in ihr nach dem Umfange hin fortpflanzt, wird durch die Befestigung möglichst dicht an dieser Wand aufgefangen.

Als brauchbar sind in dieser Hinsicht noch zu bezeichnen die Konstruktionen Fig. 29 bis 34. Schlecht ist diejenige in Fig. 35, weil der Ring, welcher den Druck der Kugelwandung aufzufangen hat, viel zu weit von dieser absteht; als schlecht muss ferner die Formgebung in Fig. 36 mit dem Wendepunkt der Bodenlinie bei *a* bezeichnet werden. Solche fehlerhafte Konstruktionen sind auszuschließen.

Bei der Konstruktion Fig. 32 wirken die Achsialkräfte in den Wänden der beiden Cylindermäntel gemäß der Entfernung der Kraftrichtungen mit einem bedeutenden biegenden Moment aufeinander¹⁾.

Bei genügender Erfüllung der im Vorhergehenden unter *a* bis *e* angegebenen Voraussetzungen halte ich als Anstrengung für kugelförmige Böden aus stark gehämmertem Kupfer für zulässig:

gegenüber Druck (gemäß Gl. (4))

$$k = 300 \text{ bis höchstens } 400 \text{ kg/qcm} \quad (5)$$

gegenüber Einbeulung

$$k = 0,3 k_0 \text{ bis höchstens } 0,4 k_0 \quad (6)$$

worin k_0 durch Gl. (3) bestimmt ist.

Zu den höchsten für *k* angegebenen Werten zu greifen, würde ich jedoch nur dann als zulässig erachten, wenn es sich sowohl hinsichtlich der Konstruktion als auch in bezug auf die Güte des Materials und die Vollkommenheit der Ausführung um Erzeugnisse aus Werkstätten handelt, deren Leistungen dem heutigen Stande der Technik vollständig entsprechen. Da, wo diese Voraussetzungen überhaupt nicht oder doch nicht ausreichend zutreffen, wird man *k* den Verhältnissen entsprechend niedriger zu wählen haben²⁾. Dabei wird man veranlasst sein können, insbesondere wegen Nichterfüllung der oben unter *a*, *d* und *e* ausgeführten Forderungen, noch bedeutend unter 300 bzw. 0,3 zu bleiben.

Ist die absolute Größe von *r* oder auch die Dampfspannung nicht so bedeutend, dass zu großer Materialanstrengung Nötigung vorliegt, so wird man diese ebenfalls den Verhältnissen gemäß niedrig wählen können.

Die Gleichsetzung der für die zulässigen Anstrengungen gegebenen Werte, *d*. h.

$$300 = 0,3(2550 - 120\sqrt{\frac{r}{s}}) \text{ oder } 400 = 0,4(2550 - 120\sqrt{\frac{r}{s}})$$

führt zu

$$\sqrt{\frac{r}{s}} = \frac{1550}{120},$$

$$r = 167s,$$

d. h. erst für $r > 167s$ wird unter den der Entwicklung zugrunde liegenden Voraussetzungen der Gefahr der Einbeulung durch Wahl von *k* nach Gl. (6) bei Benutzung der Gl. (4) Rechnung zu tragen sein.

Unter den mir bekannt gewordenen, im Betriebe befindlichen Braupfannen sind allerdings mehrere, welche Anstrengungen ergeben, die bereits die oben angegebene Grenze ein wenig überschreiten. Ich nenne die in der Zusammenstellung 3 enthaltenen Gefäße, die in der großen Mehrzahl nach der in Fig. 4 dargestellten Konstruktion ausgeführt sind. Wie die letzte Spalte zeigt, wird die oben durch Gl. (6) bestimmte zulässige Belastung bei den ersten 6 Gefäßen

¹⁾ In grundsätzlicher Hinsicht ist bei der Konstruktion Fig. 32 noch zu beachten, dass der Cylindermantel, in den der Boden eingetietet ist, ebenfalls äußerem Ueberdruck, der wirksam auf den Boden werden kann, ausgesetzt erscheint, während dies sonst nicht der Fall zu sein pflegt.

²⁾ Das Verfahren von Behörden, bei Erlass von Vorschriften oder ihrer Handhabung in der oben bezeichneten Richtung einen Unterschied, wie er sich nach dem Vorstehenden aus der Natur der Sache ergibt, außer acht zu lassen und die Vorschriften auf Mittelmäßigkeit der Konstruktion und Ausführung zuzuschneiden, müsste jedenfalls für den vorliegenden Fall als durchaus verkehrt bezeichnet werden.

etwas überschritten: 0,417, 0,416, 0,413, 0,409, 0,407, 0,403 gegenüber 0,400.

Es ist mir nicht bekannt geworden, dass die Gefäße der Zusammenstellung 3 bei der Druckprobe oder im Betriebe zu einer Beanstandung Veranlassung gegeben hätten. Allerdings werden solche Gefäße meist nicht mit der höchsten Dampfspannung betrieben, sondern mit einer weit geringeren. Andererseits darf aber auch bei Beurteilung der gemachten Angaben über die zulässige Anstrengung nicht übersehen werden, dass es Kupfer giebt, dessen Festigkeitseigenschaften noch über diejenigen des Kupfers hinausgehen, aus dem die Böden bestanden, für welche die Gleichung ermittelt worden ist. Auch das im letzten Absatz unter *d*, S. 11 und 12, Gesagte ist zu beachten.

Zusammenstellung 3.

größte Betriebsspannung <i>p</i> kg/qcm	Druckprobe- spannung kg/qcm	<i>r</i> cm	<i>s</i> cm	$k = \frac{1}{2} p \frac{r}{s}$ kg/qcm	$2550 - 120\sqrt{\frac{r}{s}}$ kg/qcm	$\frac{1}{2} p \frac{r}{s}$
						$2550 - 120\sqrt{\frac{r}{s}}$
4	6	188,3	1,0	377	908	0,417
4	6	188,3	1,0	376	904	0,416
4	6	187,3	1,0	375	908	0,413
4	6	186,6	1,0	373	911	0,409
4	6	171,0	0,92	372	914	0,407
4	6	147,8	0,8	370	919	0,403
4	6	128,2	0,7	366	926	0,395
4	6	183,2	1,0	366	927	0,395
4	6	188,3	1,05	360	943	0,381
4	6	197,1	1,1	358	943	0,380
4	6	159,1	0,9	354	954	0,371
4	6	175,9	1,0	352	958	0,368
4	6	158,3	0,9	352	959	0,367
4	6	164,4	0,87	348	968	0,359
4	6	188,3	1,1	342	980	0,349
4	6	185,3	1,1	337	992	0,339
4	6	166,8	1,0	334	1002	0,333
.
.
4	7	155,0	1,0	310	1056	0,294
4	7	122,8	0,8	307	1063	0,289
2,5	4,5	191,0	1,0	239	892	0,268
.
2	3	230,8	1,3	178	952	0,187
.
.

B) Kugelförmige Wandungen aus Flusseisenblech.

I. Versuchsmaterial.

1) Aus früherer Zeit liegen hier Versuche mit 3 Böden vor, welche meinerseits vor mehreren Jahren zur Ausführung gebracht worden sind, und über die bereits in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1899 S. 1616 u. f. oder auch im Heft 5 der Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen berichtet worden ist. Diese Böden, dort mit *E*, *F* und *G* bezeichnet, bestanden aus geglühtem Material (im Gegensatz zu den stark gehämmerten Kupferböden) und ließen hinsichtlich Vollkommenheit der Kugelform zu wünschen übrig; sie waren zu Versuchen mit innerem Ueberdruck bestimmt gewesen. Da letzterer etwaige Abweichungen von der Kugelform zu beseitigen sucht (während der äußere Ueberdruck solche Abweichungen zu vergrößern bestrebt ist), so pflegt man bei Herstellung solcher Böden weniger auf Einhaltung der genauen Kugelform bedacht zu sein.

Boden *E*.

$$r = 1010 \text{ mm}, s = 10,2 \text{ mm}, p_0 = 25 \text{ kg/qcm},$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot \frac{101,0}{1,02} = \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot 99,2 = 1238 \text{ kg/qcm}.$$

Boden *F*.

$$r = 897 \text{ mm}, s = 10,8 \text{ mm}, p_0 = 29 \text{ kg/qcm},$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 29 \cdot \frac{89,7}{1,08} = \frac{1}{2} \cdot 29 \cdot 83,06 = 1204 \text{ kg/qcm}.$$

Boden G.

$$r = 886 \text{ mm}, s = 15,9 \text{ mm}, p_0 = 54,5 \text{ kg/qcm},$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 54,5 \cdot \frac{88,6}{1,59} = \frac{1}{2} \cdot 54,5 \cdot 55,72 = 1518,5 \text{ kg/qcm}.$$

Die der Gesetzmäßigkeit Gl. (2) entsprechende Beziehung

$$k_0 = 2380 - 115 \sqrt{\frac{r}{s}} \quad \dots \quad (7)$$

liefert für

den Boden E	$k_0 = 1236 \text{ kg/qcm}$	gegenüber oben	1238 kg/qcm
» » F	$k_0 = 1332$	»	» 1204
» » G	$k_0 = 1522$	»	» $1518,5$

steht also mit dem, was für Boden E und G aus der Beobachtung folgt, in sehr guter Uebereinstimmung, weicht dagegen beim Boden F um $100 \frac{1332 - 1204}{1204} = 10,6 \text{ vH}$ davon ab.

2) In letzterer Zeit durchgeführte Versuche mit zwei weiteren ausgeglühten Flusseisenböden, bei deren Herstellung jedoch mehr auf Vollkommenheit der Kugelform geachtet worden war, und die von einer anderen, einige Jahre später erfolgten Lieferung stammten, also auch aus anderem Material bestanden, ergaben:

Boden I.

$$r = 1000 \text{ mm}, s = 6,9 \text{ mm}, p_0 = 17,5 \text{ kg/qcm},$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 17,5 \cdot \frac{100}{0,69} = \frac{1}{2} \cdot 17,5 \cdot 144,9 = 1268 \text{ kg/qcm}.$$

Boden II.

$$r = 980 \text{ mm}, s = 12,9 \text{ mm}, p_0 = 40 \text{ kg/qcm},$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot \frac{98}{1,29} = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 76 = 1520 \text{ kg/qcm}.$$

Das Nähere über die Untersuchung dieser beiden, sowie weiterer Böden wird bei anderer Gelegenheit zur Veröffentlichung gelangen.

Die in abgerundeten Zahlen aufgestellte Beziehung

$$k_0 = 2600 - 115 \sqrt{\frac{r}{s}} \quad \dots \quad (8)$$

liefert

$$k_0 = 2600 - 115 \sqrt{144,9} = 1215 \text{ kg/qcm} \text{ gegenüber } 1268 \text{ kg/qcm}$$

$$k_0 = 2600 - 115 \sqrt{76} = 1597 \text{ » » } 1520 \text{ » ,}$$

einem Weniger von

$$100 \cdot \frac{1268 - 1215}{1268} = \text{rd. } 4 \text{ vH}$$

bzw. einem Mehr von

$$100 \cdot \frac{1597 - 1520}{1520} = 5 \text{ vH}$$

entsprechend.

3) Eine Braupfanne, welche bei $r = 3300 \text{ mm}$ mit $s = 12 \text{ mm}$ ausgeführt worden war (Zusammensetzung des Kugelbodens aus Blechsegmenten), zeigte unter dem Druck von 4 kg/qcm an den radialen Nähten der Segmente Abflachungen, wie sie der Einbeulung unmittelbar voranzugehen pflegen. Bei längerer Aufrechterhaltung des Druckes würde voraussichtlich Einbeulung eingetreten sein.

Mit $p_0 = 4$ berechnet sich hieraus nach Gl. (1)

$$k_0 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{330}{1,2} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 275 = 550 \text{ kg/qcm}.$$

Diesem Werte würde entsprechen

$$k_0 = 2459 - 115 \sqrt{\frac{r}{s}} \quad \dots \quad (9).$$

Dieses Ergebnis, welches für das ausgeführte Gefäß — dem Konstrukteur unerwartet — zutage trat, steht unter Berücksichtigung aller Verhältnisse in guter Uebereinstimmung mit dem, was die Versuche mit den vorher besprochenen 5 Böden geliefert haben.

Die Zahlenwerte 2380, 2600 und 2459 der Gl. (7) bis (9) liegen in der Nähe der Quetschgrenze, was der Feststellung zu Gl. (3) auf S. 11 (s. auch Fußbemerkung 1 da-

selbst) entspricht. Der kleine Wert 2380 dürfte — wenigstens zu einem Teile — in dem Umstande seine Begründung finden, dass die Kugelform der 3 Böden E, F und G eine vergleichsweise unvollkommene war.

II. Zulässige Belastung der kugelförmigen Flusseisenböden von Braupfannen und ähnlichen Gefäßen.

Aufgrund des unter I Ziff. 1 bis 3 angegebenen Beobachtungsmaterials glaube ich setzen zu dürfen:

1) für geglühte Flusseisenböden, welche aus einem Ganzen bestehen und bei deren Herstellung auf die Erlangung der Kugelform geachtet worden ist,

$$k_0 = 2600 - 115 \sqrt{\frac{r}{s}} \quad \dots \quad (10);$$

2) für Flusseisenböden, welche aus einzelnen Segmenten mit Ueberlappungsnetzung hergestellt werden, wobei mit Sorgfalt auf thunlichste Vollkommenheit der Kugelform geachtet wird,

$$k_0 = 2450 - 115 \sqrt{\frac{r}{s}} \quad \dots \quad (11).$$

Als Materialanstrengung erachte ich unter den bei den Kupferböden erörterten Voraussetzungen (vergl. oben A, IV), jedoch ohne die dort hinsichtlich der Temperatur des Heißdampfes gemachte Beschränkung für zulässig:

gegenüber Druck (gemäß Gl. (1))

$$k = 400 \text{ bis höchstens } 600 \text{ kg/qcm} \quad \dots \quad (12),$$

gegenüber Einbeulung

$$k = 0,25 k_0 \text{ bis höchstens } 0,35 k_0 \quad \dots \quad (13).$$

Hierbei ist berücksichtigt, dass die Flusseisenböden hinsichtlich ihrer Form nicht ganz so sorgfältig ausgeführt zu werden pflegen wie die in guten Werkstätten gehämmerten Kupferböden; ferner wurde berücksichtigt, dass der Wert des Flusseisens weniger in das Gewicht fällt als derjenige des Kupfers. Ebenso ist dem Unterschied in dem Zustande des Materials Rechnung getragen, in welchem das Flusseisen zur Verwendung gelangt.

Bei Wahl von k gemäß der Angabe Gl. (12) ist u. a. im Falle Ziffer 2 (Boden aus einzelnen Segmenten zusammengetet) die Widerstandsfähigkeit der Nietverbindung zu beachten.

Bei Uebertragung der Gl. (10) bis (13) auf Böden von Dampfkesseln wird man den abweichenden Verhältnissen Aufmerksamkeit zu schenken haben.

Im kalten Zustande bearbeitete (gehämmerte) Flusseisenböden werden gegenüber Einbeulung eine größere Belastung vertragen, doch wird vor ihrer Verwendung reiflich zu erwägen sein, ob das Material in dem bezeichneten Zustande noch ausreichende Zähigkeit besitzt.

C) Cylindrische Wandungen aus Flusseisenblech¹⁾.

Hier ist nach Maßgabe der für Flammrohre aufgestellten Gleichung

$$s = \frac{pd}{4k} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{p} \frac{1}{1 + \frac{d}{l}}} \right) + c \quad \dots \quad (14)^2$$

zu verfahren, worin bedeutet

s die Wandstärke in cm,

d den äußeren Durchmesser des Hohlzylinders in cm,

l die Länge desselben, zutreffendenfalls den in betracht

kommenden Abstand der wirksamen Versteifung in cm

(vergl. Fig. 31 und 32; hinsichtlich der letzten Kon-

struktion vergl. das S. 12 und 13 hierüber Bemerkte),

p den äußeren Ueberdruck, d. h. den größten zulässigen

Betriebsüberdruck in kg/qcm,

¹⁾ Ich füge diese Angaben hinzu, weil wiederholt Aeußerung hierüber von mir gewünscht worden ist.

²⁾ s. C. Bach, Maschinenelemente, Gl. (222).

k die zulässige Druckbeanspruchung des Materials,
 a eine Zahl, welche von verschiedenen Umständen beeinflusst wird¹⁾,
 c eine Konstante, die bestimmt ist, etwa vorhandener starker Abnutzung usw. Rechnung zu tragen.

Gegenüber Flammrohren von Dampfkesseln wird in dieser Gleichung gesetzt:

$$k = 500 \text{ kg/qcm},$$

und für den Fall, dass es sich um senkrecht stehende Rohre handelt,

$a = 70$, wenn das Rohr überlappt genietete Längsnähte besitzt,
 $a = 50$, falls es geschweißt oder stumpf gestoßen und überlascht genietet ist.

Mit a unter diese Werte zu gehen, möchte ich nicht empfehlen; dagegen halte ich es für zulässig, bei Braupfannen, welche durch Dampf geheizt werden, die also nicht dem unmittelbaren und häufig einseitigen Einfluss von Feuer gasen wie die Flammrohre ausgesetzt sind, auch nicht den Einwirkungen so starker Temperaturwechsel unterliegen wie diese Rohre, k etwas höher in die Rechnung einzuführen. Doch ist es rätlich, hierbei nicht zu weit zu gehen, da Er-

¹⁾ s. C. Bach, Maschinenelemente, 8. Auflage, S. 198 u. f., S. 209.

höhung von k unter Beibehaltung von a Verminderung der Sicherheit gegen Einbeulung zur Folge hat. Soll die Sicherheit die gleiche bleiben, so muss, vergl. Gl. (14), a in demselben Verhältnis vergrößert werden, wie dies bei k geschieht. Da es nicht zweckmässig sein dürfte, mit einer grossen Zahl von verschiedenen Werten von a zu arbeiten, so schlage ich für Braupfannen vor, unter Beibehaltung der Werte $a = 70$ bzw. 50 , $k = 550 \text{ kg/qcm}$ zu setzen, d. h.

$$s = \frac{p d}{2200} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{p} \frac{1}{1 + \frac{d}{l}}} \right) \quad (15),$$

sofern $c = 0$, was in der Mehrzahl der Fälle zulässig ist.

Schlussbemerkung.

Durch das Vorstehende dürfte eine ausreichend sichere Grundlage gewonnen sein

1) zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit kugelförmiger Wandungen von verhältnismässig geringer Stärke gegenüber äusserem Ueberdruck, gemäss Gl. 2, und damit

2) zur Berechnung der Stärke solcher der Gefahr der Einbeulung (Einknickung) ausgesetzten Wandungen, wenigstens für Kupfer und Flusseisen, gemäss Gl. 3 und 6 bzw. Gl. 10, 11 und 13.

Stuttgart, im Dezember 1901.