



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300713

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



MITTHEILUNGEN

AUS DEM

MECHANISCH-TECHNISCHEN LABORATORIUM

DER

K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE MÜNCHEN.

GEGRÜNDET VON J. BAUSCHINGER.

NEUE FOLGE.

HERAUSGEGEBEN VON

AUGUST FÖPPL.

27

DER GANZEN REIHE SIEBENUNDZWANZIGSTES HEFT.

INHALT:

I. ABHÄNGIGKEIT DER BRUCHGEFAHR VON DER ART DES SPANNUNGSZUSTANDES. — II. PRÜFUNG EINER GUSSEISERNEN SÄULE AUF AUSKNICKEN. — III. DAS ELASTISCHE VERHALTEN DES ERDBODENS. — IV. PROBE BELASTUNG VON DECKEN.

F. Nr. 20 775

MIT 6 ABBILDUNGEN IM TEXT, 4 STEIN- UND 2 LICHTDRUCKTAFELN.



MÜNCHEN

THEODOR ACKERMANN

KÖNIGLICHER HOF-BUCHHÄNDLER.

1900.

S. 16.

22.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315052



J. X. 47/1900

MITTHEILUNGEN

AUS DEM

MECHANISCH-TECHNISCHEN LABORATORIUM

DER

K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE MÜNCHEN.

GEGRÜNDET VON J. BAUSCHINGER.

NEUE FOLGE.

HERAUSGEGEBEN VON

AUGUST FÖPPL.

DER GANZEN REIHE SIEBENUNDZWANZIGSTES HEFT.

INHALT:

I. ABHÄNGIGKEIT DER BRUCHGEFAHR VON DER ART DES SPANNUNGSZUSTANDES. — II. PRÜFUNG EINER GUSSEISERNEN SÄULE AUF AUSKNICKEN. — III. DAS ELASTISCHE VERHALTEN DES ERDBODENS. — IV. PROBE BELASTUNG VON DECKEN.

F. Nr. 20 775



MIT 6 ABBILDUNGEN IM TEXT, 4 STEIN- UND 2 LICHTDRUCKTAFELN.

MÜNCHEN

THEODOR ACKERMANN

KÖNIGLICHER HOF-BUCHHÄNDLER.

1900.

*CG. 16.
22.*



MITTHEILUNGEN

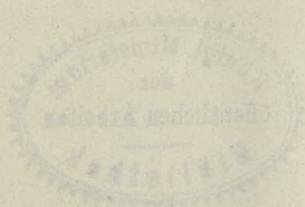
1900

J. X. 47 / 1900



nr inv. 1865

AUGUST 1900



Handwritten number: 277 10 772

1900

I.

Die Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes.

(Ausführliche Mittheilung; auszugsweise wurde über den gleichen Gegenstand schon in einem Vortrage auf der Münchner Naturforscherversammlung berichtet, der im Centralblatt der Bauverwaltung 1899, S. 527, abgedruckt ist.)

§ 1.

Einleitung.

Die Hauptaufgabe der experimentellen Festigkeitslehre besteht in der Entscheidung der Frage, unter welchen verschiedenen Umständen entweder der Bruch oder eine grössere bleibende Formänderung bei den verschiedenen Bau- und Constructionsmaterialien eintritt. Je nach der Art des Kraftangriffes am ganzen Versuchskörper spricht man von dessen Zug-, Druck-, Schub-, Biegungs-, Verdrehungs- oder Knickfestigkeit u. s. f. Davon zu unterscheiden ist dagegen die Festigkeit des Materials selbst, die nur noch von dessen physikalischen Eigenschaften und von der Art des Spannungszustandes, in den es an einer bestimmten Stelle versetzt wird, abhängt, von der Gestalt des ganzen Versuchskörpers und dem Kraftangriffe an ihm dagegen unabhängig ist.

Wie das Bestreben der Physik auf allen Gebieten darauf gerichtet ist, die zusammengesetzten Vorgänge, die uns zunächst bei allen Naturerscheinungen entgegen treten, auf einfachere und zuletzt, wenn möglich, auf „Nahwirkungen“ zurückzuführen, so hat es auch die Festigkeitslehre von jeher als ihre Aufgabe betrachtet, den Vorgang des Bruchs aus dem Zustande an jenem bestimmten, eng umgrenzten Orte zu erklären, an dem der Bruch beginnt. Unsere gesammte Naturerklärung steht und fällt mit der Annahme, dass alles Geschehen in der Natur durch die Wechselwirkung zwischen den kleinsten Elementen geregelt wird. Hiernach erwächst der Forschung einerseits die Aufgabe, den Gesetzen dieser Wechselwirkung oder, wie man in der Physik zu sagen pflegt, den „Elementar-Gesetzen“ nachzuspüren, andererseits aber ganze Erscheinungsgruppen aus solchen Elementarwirkungen entweder aufzubauen oder sie in diese zu zerlegen. Hier soll es sich um die Erforschung des Elementargesetzes handeln, das den Bruchvorgang beherrscht.

Der Bruch eines spröden Körpers, so rasch und plötzlich er auch erfolgen mag, beginnt doch jedenfalls zunächst an der meist beanspruchten oder an der aus anderen Gründen am meisten gefährdeten Stelle, von der aus er sich über die anderen Theile fortpflanzt. Bei Körpern, die grössere bleibende Formänderungen erfahren, bevor sie brechen, wird das erste stärkere Nachgeben zunächst ebenfalls an einer Stelle beginnen, die sich unter den ungünstigsten Bedingungen befindet und sich von da aus weiterhin verbreiten. Für die Beurtheilung der Festigkeit eines ganzen Körpers sind hiernach die drei Unterfragen zu beantworten, an welcher Stelle erstens die Gefahr eines Bruches oder einer bleibenden Formänderung am nächsten liegt, ferner welcher Spannungszustand an dieser gefährlichsten Stelle eintritt und drittens, wie die Bruch- oder Formänderungsgefahr von einem gegebenen Spannungszustande abhängt. Die dritte Unterfrage bezieht sich wieder auf das Elementargesetz, das den Gegenstand unserer Untersuchung bilden soll.

Ein Spannungszustand wird am einfachsten durch Angabe der Grösse der drei Hauptspannungen beschrieben, aus denen er sich zusammensetzt. Wenn der Körper nicht isotrop ist, muss dazu noch eine weitere Angabe über die Richtungen der Hauptspannungen gegenüber dem Gefüge des Körpers treten; wenn sich der Körper nach allen Seiten hin gleich verhält, genügt aber schon die Angabe der Zahlenwerthe für die drei Hauptspannungen völlig, um den Spannungszustand zu kennzeichnen. Stehen in diesem Falle die drei Hauptspannungen σ_1 σ_2 σ_3 zunächst in irgend einem gegebenen Verhältnisse $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ zu einander, so wird man bei proportionaler Steigerung aller drei schliesslich zu einem Zustande gelangen, der den Bruch (oder eine bleibende Formänderung) zur Folge hat. Je nach

den für die Hauptspannungen gewählten Verhältnissen wird man auf diesem Wege verschiedene an der Bruchgrenze liegende Spannungszustände erhalten. Denkt man sich für jeden dieser Grenzzustände die zugehörigen Werthe der $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ in einem passenden Massstabe als Coordinaten eines Punktes in ein rechtwinkliges Coordinatensystem eingetragen, so erhält man eine Fläche, die alle diese Punkte umfasst und die von Hertz als die Festigkeitsfläche bezeichnet wurde. Unsere Aufgabe kommt nun auch, kurz gesagt, darauf hinaus, die Festigkeitsfläche für das betreffende Material zu ermitteln.

Freilich gilt dies nur mit einer Einschränkung. Der physikalische Zustand des Materials, von dem die Bruchgefahr abhängt, wird nämlich nicht in allen Fällen schon durch den Spannungszustand ausreichend gekennzeichnet. Ausser diesem kommt auch noch der mit ihm verknüpfte Formänderungszustand in Betracht und dessen Beschreibung ist im Allgemeinen viel weniger einfach, als die des Spannungszustandes. In den einfacheren Fällen genügt es zwar hierfür ebenfalls, die Werthe der drei Hauptdehnungen zu kennen. Oft ist aber ausserdem zum mindesten noch eine ergänzende Angabe darüber erforderlich, wie gross der elastische und wie gross der unelastische Antheil dieser Hauptdehnungen ist. Aber selbst hiermit reicht man noch nicht unter allen Umständen aus, um den Zustand, in den das Material übergeführt wurde, vollständig zu kennzeichnen. Wegen der Nachwirkungerscheinungen kommt es auch noch auf jene Zustände an, die dem gegebenen vorausgingen, also auf die Vorgeschichte des Materials.

Durch den Formänderungszustand, sofern er nach den bezeichneten Richtungen hin vollständig gegeben ist, wird der Spannungszustand ohne Zweifel mit bestimmt. Umkehren lässt sich dieser Satz aber im Allgemeinen nicht: je nach der Vorgeschichte des Materials können vielmehr zu einem gegebenen Spannungszustande verschiedene Formänderungszustände gehören.

Aus dieser Erwägung geht hervor, dass ein erschöpfender Aufschluss über die Bruchgefahr eher auf Grund der erreichten Formänderung, als auf Grund des bestehenden Spannungszustandes erwartet werden könnte. In der That laufen auch die Ansichten der meisten Forscher, die unsere Frage genauer studirt haben, darauf hinaus, dass die Formänderung auf irgend eine Art den Massstab für die Bruchgefahr abgeben müsse. Unglücklicher Weise ist aber die unmittelbare Beobachtung der Formänderung mit hinreichender Genauigkeit nur schwer und oft auch gar nicht ausführbar. Ausserdem liefert die statische Berechnung zunächst immer nur Kräfte, also Spannungen, und um auf Grund einer der üblichen Festigkeitsberechnungen ein Urtheil über die Bruchgefahr zu erlangen,

ist man daher doch immer wieder darauf angewiesen, auf Grund geeigneter Annahmen über den Zusammenhang zwischen Spannungen und Formänderungen die Bruchgefahr nach dem Spannungszustande zu bemessen, auch wenn man sie als ursprünglich durch den Formänderungszustand bedingt ansieht.

Man umgeht diese Schwierigkeit am einfachsten, indem man sich vorbehält, den Einfluss der Vorgeschichte des Materials auf dessen Eigenschaften gesondert zu untersuchen. Die Frage steht dann einfach so: „Gegeben ist irgend ein Material von beliebiger Vorgeschichte im spannungslosen Zustande. Wenn dieses einem Spannungszustande unterworfen wird, bei dem die drei Hauptspannungen in gegebenen Verhältnissen zu einander stehen, so wird bei hinreichender Steigerung schliesslich der Bruch (bezw. eine grössere bleibende Formänderung, wenn diese den Gegenstand der Untersuchung bildet) eintreten. Es fragt sich nun, wie die Festigkeitsfläche aussieht, die nach dem Ergebnisse solcher Versuche mit Material von dem gleichen Ausgangszustande, aber bei Anwendung verschiedener Spannungszustände erhalten wird.“ Diese Frage lässt immer eine eindeutige Lösung zu. Selbstverständlich kann indessen die Festigkeitsfläche nicht nur bei verschiedenen Materialien von ganz verschiedener Gestalt sein, sondern auch bei demselben Material können sich hierin grosse Unterschiede ergeben, je nach der Vorbehandlung, die das Material etwa vorher erfahren hatte. Durch Ausglühen, Walzen, Hämmern, Strecken u. s. f. können, wie allgemein bekannt ist, die Festigkeitseigenschaften desselben Stoffes oft in sehr weiten Grenzen geändert werden. Vom Standpunkte der Festigkeitslehre sind daher Stoffe derselben Art von verschiedener Vorgeschichte geradezu als verschiedene Materialien anzusehen.

Von der Festigkeitsfläche kennt man selbst bei den am besten untersuchten Materialien bisher im günstigsten Falle nur einige wenige Punkte mit halbwegs ausreichender Genauigkeit. Selbst in Bezug auf ihre ungefähre Gestalt ist man im Uebrigen nur auf ganz ungewisse und sich vielfach widersprechende Vermuthungen angewiesen. Zu einem besser begründeten Urtheile über die wahre Gestalt der Festigkeitsfläche für irgend ein bestimmtes Material wird man nur dadurch gelangen können, dass man ausser den etwa bereits als hinreichend bekannt anzusehenden noch einige weitere Punkte dieser Fläche mit genügender Genauigkeit ermittelt. Diesen Weg habe ich auch selbst einzuschlagen versucht. Wie gross freilich die Schwierigkeiten sind, denen man hierbei begegnet, wird aus dem folgenden noch deutlich genug hervorgehen. Sie sind namentlich darin begründet, dass es nur sehr schwer ge-

lingt, einen Spannungszustand, den man auf seine Wirkung untersuchen möchte, auch wirklich herzustellen.

Einen Festigkeitsversuch kann man nur an einem verhältnissmässig grossen Versuchskörper ausführen, der unter bestimmten äusseren Bedingungen belastet und schliesslich zum Bruche gebracht wird. Um aus dem Ergebnisse eines solchen Versuchs einen Rückschluss auf die Festigkeit des Materials, also auf das Elementargesetz, das uns hier beschäftigt, ziehen zu können, muss man bereits im Stande sein, zum Mindesten ungefähr, den Spannungszustand an der am meisten gefährdeten Stelle anzugeben. Die Erforschung des Elementargesetzes setzt daher bis zu einem gewissen Umfange bereits eine Lösung der anderen der vorher aufgezählten Aufgaben der Festigkeitslehre voraus. Andererseits braucht man aber zugleich zur experimentellen Prüfung jener Lehren, die von der Theorie hierüber aufgestellt sind, bis zu einem gewissen Grade die Kenntniss des Elementargesetzes. In dieser wechselseitigen Verbindung beider Forschungsaufgaben besteht die Schwierigkeit, die sich überall auf diesem Gebiete und selbst schon bei den scheinbar einfachsten Versuchsbedingungen einstellt. Nur durch ganz allmähliches, schrittweises Vorgehen wird man mit der Zeit zum Ziele gelangen können, indem man die jeweils nach der einen Richtung hin gewonnenen Ergebnisse stets sofort wieder dazu benützt, um die nach der anderen Richtung gehenden Erfahrungen oder Anschauungen hiernach zu ergänzen oder zu berichtigen. Auf diese Art wird es wohl mit der Zeit gelingen, zu einer besseren Einsicht in diese Dinge zu gelangen, als wir sie heute besitzen.

Sofort muss ich auch hier vorausschicken, dass man nicht etwa erwarten darf, dass durch die neuen Erfahrungsthatfachen, über die ich auf den folgenden Seiten berichten werde, die Aufgabe ganz oder nahezu gelöst sei. Meine Arbeit beansprucht nur die Bedeutung eines weiteren Schrittes auf dem vorher gewiesenen Wege.

Um die vorausgehenden allgemeinen Ausführungen noch an einem bestimmten Beispiele zu erläutern, erwähne ich die Zugfestigkeit steinartiger Massen. In welche Irrthümer man verfällt, wenn man die Zugfestigkeit solcher Stoffe aus gewöhnlichen Zugversuchen zu bestimmen unternimmt, habe ich im 24. Hefte dieser Mittheilungen und später auch noch an einigen anderen Orten ausführlich nachgewiesen. Meine Ausführungen sind zwar von Herrn Professor v. Bach und einem seiner Schüler scharf angegriffen, aber in keinem einzigen wesentlichen Punkte widerlegt worden. Wie wenig berechtigt diese Angriffe waren, ergibt sich wohl am deutlichsten daraus, dass bei einer von Herrn Professor Grübler auf ganz andere Art durchgeführten Experimental-Untersuchung ganz ähnliche Ergebnisse gewonnen wurden, wie früher

von mir. Herr Grübler sagt in seiner Abhandlung „Versuche über die Festigkeit an Schleifsteinen“ (Zeitschr. d. Ver. D. Ing., 1899, S. 1294) ausdrücklich:

„Als wesentlichstes Ergebniss der angeführten Versuche ist anzusehen, dass die Zugfestigkeit des verwendeten Materials **erheblich grösser** sein muss, als die Zerreißversuche ergeben haben.“

Das stimmt genau mit dem überein, was ich damals fand und was von Herrn v. Bach so lebhaft bestritten wurde.

Bei dem in gewöhnlicher Weise an einem Probekörper aus Stein oder Cement angestellten Zugversuche kann man keineswegs auf eine gleichförmige Vertheilung der Spannungen über den Querschnitt rechnen. Man befindet sich hier vielmehr von vornherein in vollständiger Unkenntniss über den Spannungszustand, der im Augenblicke des Bruches an der gefährdeten Stelle auftritt. Die Festigkeit des Materials kann daher aus einem solchen Versuche keineswegs erschlossen werden. Das hindert natürlich nicht, dass man zum Zwecke von Vergleichen, die an dem ganzen Probestücke ermittelte Bruchlast durch den Querschnitt dividirt und die so gefundene scheinbare Zugfestigkeit („scheinbar“, weil sie auf einer irrigen Annahme über das Vertheilungsgesetz der Spannungen über den Querschnitt begründet ist) mit der nöthigen Vorsicht weiter benutzt. In meinem Laboratorium bestimme ich selbstverständlich, ebenso wie anderwärts, zu praktischen Zwecken die Zugfestigkeit des Cements auf dieselbe Weise, da dies einmal durch die Vereinbarungen über die einheitliche Materialprüfung so festgesetzt ist. Zu ganz irrigen Schlüssen würde man aber sofort gelangen, wenn man diese scheinbare Zugfestigkeit nun mit der wahren Zugfestigkeit des Materials verwechselte und sie als solche der Theorie der Biegefestigkeit von Stein- oder Cement-Balken zu Grunde legen wollte. Das ist freilich oft genug geschehen und geschieht auch heute noch. Man ist dadurch zu der Meinung geführt worden, dass die gewöhnlichen Annahmen der Biegefestigkeitstheorie bei Steinbalken sehr unvollkommen zuträfen und hat andere Theorien zu dem Zwecke aufgestellt, die Ergebnisse von Zug- und Biegeversuchen mit einander zu vereinbaren. Indessen der Fehler lag, wie ich im 24. Hefte nachwies, nur zum kleinsten Theile an der gewöhnlichen Theorie, sondern weit mehr an der mangelhaften Kenntniss des Elementargesetzes, nämlich der wahren Zugfestigkeit des Materials. — So konnte auch in diesem Falle die genauere Erforschung des Elementargesetzes nur in Wechselwirkung mit Untersuchungen über die Spannungsvertheilung am ganzen Körper um einen Schritt weiter gefördert werden.

Eine mir von sehr geschätzter Seite zugegangene briefliche Bemerkung veranlasst mich, den Begriff, den ich mit der Bezeichnung „wahre Zugfestigkeit“ verbinde, noch etwas genauer auseinanderzusetzen. Ich verstehe darunter, kurz gesagt, die Zugfestigkeit des Materials. Weiss man also, dass an jener Stelle, von der der Bruch beginnt, ein Spannungszustand herrscht, bei dem zwei Hauptspannungen gleich Null sind, während die dritte Hauptspannung eine Zugspannung bildet, so gibt jener Werth dieser Zugspannung, der im Augenblicke des Bruches eintritt, die „wahre Zugfestigkeit“ oder auch kürzer die „Zugfestigkeit“ des Materials an. Diese Begriffsabgrenzung gibt an sich kein praktisch ohne Weiteres verwendbares Mittel an, durch das die wahre Zugfestigkeit gefunden werden könnte; sie stellt nur eine Aufgabe, deren Lösung in vielen Fällen schwierig genug ist, die aber von der Forschung angestrebt werden muss. Still-schweigend hat man übrigens, wenn von der Zugfestigkeit eines Stoffes gesprochen wurde, wohl von jeher das gemeint, was ich nun, zum Unterschiede von irrigen Bestimmungen dieser Grösse, als die „wahre“ Zugfestigkeit bezeichne. Man hat sich eben nur oft einer Täuschung darüber hingegeben, was aus dem Versuche, so wie er vorlag, wirklich geschlossen werden konnte. — Aehnlich ist es natürlich auch bei den anderen Beanspruchungsarten, von denen weiterhin die Rede sein wird.

Von einer „wahren“ Biegezugfestigkeit, Verdrehungs-festigkeit oder Knickfestigkeit eines gewissen Materials kann natürlich überhaupt niemals die Rede sein. Diese Bezeichnungen weisen sämmtlich auf den Widerstand eines in bestimmter Art durch äussere Kräfte belasteten, ausgedehnten Körpers und nicht auf eine dem Stoffe, aus dem er besteht, zugehörige Eigenschaft hin. Man gibt zwar öfters die „Biegezugfestigkeit“ von Steinen oder von Guss-eisen an, die nach Biegezugversuchen auf Grund der ge-wöhnlich gebrauchten Biegezugformeln berechnet ist. Eine solche Angabe schliesst aber schon das Eingeständniss in sich, dass man über die in Wirklichkeit eintretende Be-anspruchung an der Bruchstelle unsicher ist, sondern diese nur auf Grund einer mehr oder weniger willkürlichen Annahme eingeschätzt hat. Im anderen Falle würde man nicht von einer Biegezugfestigkeit, sondern von der Zug-festigkeit u. s. f. reden. In der That haben auch alle solche Angaben über die Biegezugfestigkeit nur dann Werth, wenn über die Abmessungen, die Gestalt und die Belastungsweise der Probestücke, an denen sie er-mittelt sind, nähere Angaben beigefügt werden, da ihr Betrag im einzelnen Falle wesentlich davon abhängt. In Wirklichkeit stellen diese Angaben eben gar nicht Festigkeitswerthe des Materials an sich dar, sondern sie beziehen sich nur auf die Festigkeit eines unter

bestimmten äusseren Bedingungen stehenden ganzen Körpers.

Bei Angaben über die Festigkeit eines Materials hat man übrigens zunächst gewöhnlich nur jene einfachste Beanspruchungsart im Auge, bei der von den drei Haupt-spannungen zwei gleich Null sind, so dass die dritte eine einfache Zug- oder Druckbeanspruchung darstellt. Dieser Spannungszustand soll, wie schon in meiner „Festigkeits-lehre“ auch hier als ein „linearer“ bezeichnet werden. Von den übrigen Spannungszuständen findet namentlich die reine Schubbeanspruchung eine öfters wieder-kehrende Erwähnung und Anwendung, also jener Spannungs-zustand, bei dem zwei Hauptspannungen von gleicher Grösse, aber entgegengesetztem Vorzeichen sind, während die dritte gleich Null ist. Diesem Spannungszustande hat man auch von jeher eine mehr selbständige Bedeutung eingeräumt, insofern als man zwar, wie bei allen andern, eine Zurückführung auf die einfache Zug- oder Druck-beanspruchung versuchte, zugleich aber unmittelbare Be-obachtungswerthe für die Schubfestigkeit einführt und diesen im Zweifelsfalle mehr vertraute, als der Zurück-führung auf den linearen Spannungszustand. — Als „wahre Schubfestigkeit“ ist übrigens jene Schubspannung zu bezeichnen, die den Bruch herbeiführt, falls der Spannungs-zustand an der Bruchstelle in einer reinen Schubbean-spruchung (in dem vorher definirten Sinne) besteht. Das Eigenschaftswort „wahr“ ist auch hier gewöhnlich (als selbstverständlich) entbehrlich und es soll nur gebraucht werden, um hervorzuheben, dass aus den Versuchen zu-weilen auf Grund willkürlicher und irriger Annahmen Werthe für die Grösse ausgerechnet werden, die keines-wegs als genau richtig gelten können. Diesem scheinbaren Werthe der Schubfestigkeit tritt dann der Begriff der wahren Schubfestigkeit gegenüber und die Gegenüber-stellung weist in wünschenswerther Deutlichkeit darauf hin, dass man den „scheinbaren“ Werthen im günstigsten Falle nur die Bedeutung von Näherungswerthen beilegen darf.

Eine gewisse Selbständigkeit hat man schliesslich noch jener Beanspruchungsart eingeräumt, die bei den Härteversuchen an jener Stelle auftritt, wo bei spröden Körpern der Bruch beginnt und durch die nach Hertz die Härte als eine besondere Art der Festigkeit gekenn-zeichnet wird. Bei allen anderen Spannungszuständen dagegen, namentlich bei jenen, auf die man bei der Unter-suchung der Festigkeit plattenförmiger Körper und von Gefässen geführt wird, fehlen selbständige Bezeichnungen und unabhängig gewonnene Erfahrungswerthe. Man ist bei ihnen ausschliesslich darauf angewiesen, auf Grund einer passend erscheinenden Annahme die Bruchgefahr mit jener bei den linearen Spannungszuständen zu vergleichen.

In dieser Abhandlung werde ich indessen, worauf ich schon jetzt hinweisen möchte, zwei neue Namen für besondere Beanspruchungsarten einführen, nämlich die „Umschlingungsfestigkeit“ und die „Zerrungsfestigkeit.“ Es zeigt sich nämlich öfters, dass erst nachdem man angefangen hat, eine Sache mit ihrem eigenen Namen

zu nennen, mehr Klarheit in die Untersuchung kommt, als wenn man auf langathmige Umschreibungen angewiesen ist. Desshalb möchte ich auch jenen Forschern, die auf diesem Gebiete später weiter arbeiten werden, den Gebrauch der beiden hier in Vorschlag gebrachten Bezeichnungen empfehlen.

§ 2.

Aeltere Annahmen und frühere Versuche.

Darüber, wie in den vorher aufgeführten Fällen und überhaupt beim allgemeinsten Spannungszustande die Bruchgefahr zu bemessen sei, gehen die Meinungen heute zum Theile noch recht weit auseinander. Von den drei älteren Annahmen, die hierüber gemacht wurden, setzte die erste voraus, dass es nur auf die grösste Hauptspannung, ohne Rücksicht auf die beiden übrigen, ankomme, während man nach der zweiten die grösste, in irgend einer Richtung erfolgende spezifische Dehnung und nach der dritten die grösste Schubspannung als massgebend für die Bruchgefahr erachtete. Auch die dritte (zuerst von Coulomb aufgestellte, später von Tresca vertretene und neuerdings wohl allgemein verlassene) Ansicht lässt sich übrigens, ebenso wie die zweite, auf den Formänderungszustand beziehen, da wenigstens bei isotropen Körpern die grösste elastische Aenderung eines ursprünglich rechten Winkels der zugehörigen Schubspannung unmittelbar proportional ist.

Eine gewisse Uebereinstimmung bei der Beurtheilung der Bruchgefahr hat sich nun zwar insofern eingestellt, als man sich in technischen Kreisen — in Deutschland vorwiegend unter dem Einflusse von Grashof — ziemlich allgemein für die zweite der aufgezählten Annahmen entschied, wonach die Bruchgefahr von der grössten spezifischen Dehnung abhängen soll. Es ist indessen sehr bezeichnend, dass jene wenigen Forscher, die überhaupt in neuerer Zeit selbst eingehende Untersuchungen über diese Frage angestellt haben, zu ganz entgegengesetzten Schlüssen gelangt sind.

In dieser Hinsicht erinnere ich zunächst an die Theorie von Herrn Prof. Mohr (Civil-Ingenieur Bd. XXVIII, S. 113, 1882). Auf Grund der ihm vorliegenden Versuchsergebnisse, namentlich jener von Bauschinger, schloss Mohr, dass die herrschende Annahme über die Abhängigkeit der Bruchgefahr von der grössten Dehnung, ohne Rücksicht auf die daneben in den Querrichtungen auftretenden Dehnungen, zu verwerfen sei. Der Schluss gründete sich auf den Vergleich der Schubfestigkeit mit der Zug- und Druckfestigkeit, indem die experimentell dafür ermittelten Werthe mit jenen Annahmen nicht in Einklang gefunden wurden. Mohr setzte daher eine andere Annahme an deren Stelle, die an sich allgemeiner

gehalten ist. Jede Beanspruchungsart wird nämlich auf sehr sinnreiche Weise in einer Zeichnung durch einen bestimmten Kreis wiedergegeben und die Bruchgrenze wird durch eine Curve dargestellt, die aus den Versuchen zu ermitteln ist, so dass alle Spannungszustände, deren Kreise die Grenz-Curve nicht erreichen, auch keinen Bruch herbeiführen. Hiernach würde die Bruchgefahr gleichzeitig von der grössten und der kleinsten Hauptspannung (bezw. Hauptdehnung) abhängen, während der Werth der mittleren gleichgültig bliebe. — Leider reichen die für die Prüfung der Mohr'schen Theorie verwertbaren Beobachtungsergebnisse einstweilen keineswegs aus, um schon jetzt eine Entscheidung für oder gegen sie herbeizuführen.

Wie schon in der Einleitung hervorgehoben und bereits von Mohr in seiner Arbeit ausführlich und durchaus zutreffend begründet wurde, wird die experimentelle Erforschung dieser Dinge durch den Umstand gehemmt, dass es nur in wenigen Fällen möglich ist, einen Spannungszustand, der auf seine Wirkung untersucht werden soll, in einwandfreier Weise herzustellen. Mohr wies dies namentlich in Bezug auf Druckversuche nach und zeigte in überschläglicher Rechnung, wie gross der Einfluss der Reibung zwischen Probestücken und Druckplatten, der zu einer unregelmässigen, von der beabsichtigten wesentlich abweichenden Art der Spannungsvertheilung führt, unter Umständen zu werden vermag. Aber auch die Bedenken gegen den Zugversuch mit spröden Stoffen sind eingehend von ihm beleuchtet worden. Von der Bestätigung dieser Bedenken durch die Grübler'schen und meine eigenen Versuchsergebnisse über die wahre Zugfestigkeit steinartiger Massen war schon vorher die Rede; es mag aber hier noch darauf hingewiesen werden, dass nach der neuesten Arbeit von Professor Rudeloff, die kürzlich in der „Baumaterialienkunde“, IV. Jahrgang, Heft 6/7, 1899 erschien, eine ungleichförmige Vertheilung der Zugspannungen über den Querschnitt nicht nur bei spröden Stoffen, sondern selbst bei Zugversuchen mit dehnbaren Metallen eine wichtige Rolle spielt.

Gegen die herrschende Anschauung, wonach ein Zug in einer Querrichtung eine Herabminderung der durch Zug in der Längsrichtung hervorgerufenen Bruchgefahr bewirken soll, wendet sich eine Arbeit des Herrn Professor

Wehage, die aus dem Charlottenburger Laboratorium hervorgegangen ist. (Mitth. der techn. Versuchsanstalten zu Berlin, 6. Jahrgang, S. 89, 1888.) Nach Herrn Wehage wäre dieser Satz vielmehr geradezu in sein Gegentheil umzukehren. Herr Wehage zieht seine Schlüsse aus Biegungsversuchen mit kreisförmigen Platten (wobei er sich gelegentlich auch auf andere Erfahrungen bezieht) und gelangt dabei zu den in den folgenden Sätzen ausgedrückten Ergebnissen:

„Wenn ein schmiedeiserner Körper zugleich nach zwei zu einander senkrechten Richtungen gleich stark auf Zug oder Druck beansprucht wird, so wird die Elasticitätsgrenze schon bei einer Dehnung erreicht, welche kleiner ist als 0,78 von derjenigen Dehnung, welche der Elasticitätsgrenze im Falle eines einfachen Zuges entspricht.“

Und weiterhin folgt für den Fall des Bruches:

„Wenn ein schmiedeiserner plattenförmiger Körper an einer Stelle (wie die untersuchten Platten in der Mitte) zugleich nach zwei zu einander senkrechten Richtungen (mithin auch nach allen anderen Richtungen) gleich stark beansprucht wird, so tritt der Bruch schon bei einer Dehnung ein, welche nach jeder der beiden Richtungen etwa halb so gross ist, als die Bruchdehnung im Fall eines einfachen Zuges.“

Auch die folgenden Sätze mögen hier noch zur Anführung gelangen, da die ganze Arbeit, wie es scheint, bisher nicht viel Beachtung gefunden hat.

„Als feststehend wird nach diesen Untersuchungen anzusehen sein, dass die bisher übliche Beurtheilung der Inanspruchnahme eines zugleich nach zwei Richtungen gezogenen oder gedrückten Körpers nach der grössten positiven oder negativen Dehnung allein nicht zulässig ist. Die Inanspruchnahme auf Zug, welche eine cylindrische Wand in tangentialer Richtung durch den Druck einer gepressten Flüssigkeit auf die Innenfläche erleidet, wird also durch einen gleichzeitig ausgeübten axialen Zug nicht vermindert, wie es nach der üblichen Annahme sein müsste, sondern vermehrt.“

Freilich heisst es zuletzt nach einigen in ähnlicher Richtung gehenden Bemerkungen:

„Doch sind jedenfalls noch weitere Versuche zur Klarlegung dieses Verhaltens erforderlich.“

Werthvolles Versuchsmaterial für die Entscheidung unserer Frage ist ferner in den letzten Jahren von Professor Voigt in Göttingen beigebracht worden (Wiedemanns Annalen d. Phys., Bd. 53, S. 43, 1894 und Bd. 67, S. 452, 1899). Bei den zuerst von Voigt begonnenen und dann von einem seiner Schüler fortgesetzten Versuchen wurden aus Stoffen von geringer Zugfestigkeit (zunächst Steinsalz) Zugproben zuerst in Luft und dann in einem mit Kohlensäure unter hohem Drucke gefüllten Gefässe vorgenommen. Dabei ergab sich, dass die durch eine Feder angezeigte Zugkraft für den Bruch in der Luft ebenso gross war, als in dem mit Gas von hoher Spannung beschickten Raume. Durch Verwendung von Probekörpern mit geringer Zugfestigkeit, die aus einer Mischung von Stearin- und Palmitinsäure hergestellt waren, gelang es sogar, die Körper abzureissen, bevor die Zugkraft ausreichte, den allseitig wirkenden Gasdruck in der Zugrichtung aufzuheben. Im Augenblicke des Bruches müssen daher im Bruchquerschnitte noch Druckspannungen bestanden haben, so dass der Bruch nur durch den in den Querrichtungen überwiegenden Druck hervorgebracht worden sein kann, obschon der Bruch selbst so wie ein gewöhnlicher Zugbruch erfolgte. Herr Voigt fasst die Ergebnisse der von ihm ausgeführten und veranlassten Versuche dahin zusammen, dass

„die Differenz zwischen den gleichsinnig gerechneten Spannungen normal und parallel zur Zerreihsungsfläche eine der Substanz individuelle, für den Moment des Zerreihsens charakteristische Constante ist.“

Das Resultat von Voigt würde sich übrigens, wie hier eingeschaltet werden mag, als Stütze für die zuvor angeführte Coulomb-Tresca'sche Ansicht verwerthen lassen, wonach die Bruchgefahr von der erreichten grössten Schubspannung abhängen sollte. Leider lässt sich die Voigt'sche Versuchsanordnung für die Untersuchung von Körpern mit höherer Zugfestigkeit, namentlich der Metalle, kaum verwenden. Zu wünschen wäre dagegen eine Ausdehnung auf Versuche mit Cementkörpern, die mit dem Voigt'schen Apparate ohne Weiteres möglich sein dürfte. Hierauf werde ich in der Folge noch einmal zurückkommen.

§ 3.

Versuche über die Wirkung eines allseitig gleichen Druckes.

Den vorher angeführten Resultaten, die wenigstens in dem einen Punkte übereinstimmen, dass sie der herrschenden Anschauung widersprechen, steht meines Wissens keine einzige direkte Bestätigung für die in der Technik übliche Bemessung der Bruchgefahr in irgend einem be-

stimmten und eigens zu diesem Zwecke genauer untersuchten Falle gegenüber. Da sich diese Resultate ferner auch selbst nicht miteinander vereinigen lassen, muss die Frage bis auf Weiteres als eine offene betrachtet werden.

Unter diesen Umständen, angeregt namentlich durch die Voigt'schen Versuchsergebnisse, entstand bei mir der Wunsch, womöglich selbst einige Erfahrungen zu sammeln, die für die Entscheidung der Frage von Nutzen sein könnten. Ich habe daher eine grössere Zahl von Versuchen ausgeführt, über die ich hier näher berichten will. Reichen ihre Ergebnisse auch noch keineswegs aus, um die Frage irgendwie endgültig zu entscheiden, so führten sie doch zu einer Anzahl neuer Erfahrungsthat-sachen von hinreichender Bedeutung, um sie jetzt schon zu veröffentlichen; zumal ich auch kaum die Hoffnung hegen kann, schon in absehbarer Zeit durch weitere Funde zu einem abschliessenden Ergebnisse zu gelangen.

Bei der Aufzählung der Versuche werde ich mich übrigens nicht an die Reihenfolge binden, in der sie — mit einer einzelnen Ausnahme sämmtlich im Laufe des letzten Jahres — vorgenommen wurden; sondern ich werde sie so anordnen, wie mir dies für einen klaren Ueberblick am besten geeignet erscheint. Ich beginne daher mit den Versuchen über die Wirkung eines allseitig gleichen Druckes, der von einer unter hohem Drucke stehenden Flüssigkeit auf die Probekörper ausgeübt wurde.

Die Herstellung des hohen Flüssigkeitsdruckes, der seither bis zu etwa 3500 atm. gesteigert wurde und der wohl auch noch etwas erhöht werden könnte, wenn ich mich nicht scheute, den neuen Apparat zu verderben, erfolgte stets in einem starken Gefässe durch Eintreiben eines Stempels. Anfänglich benutzte ich dazu zwei schon im Laboratorium vorhandene Apparate, von denen indessen der eine nur einen Flüssigkeitsdruck bis zu 1000 atm. zu erreichen gestattete, während der andere im Laufe der Versuche bei 1850 atm. platzte. Ich begnüge mich daher mit der Beschreibung des bei den letzten und wichtigsten Versuchen benutzten neuen Apparates, der auf Tafel I, Abb. 8 dargestellt ist. Von einer Welle aus Bessemer-Stahl, die früher einmal im Laboratorium auf Biegung geprüft worden war, wurde ein Abschnitt durch Ausbohren eines Loches von 41,5 mm Durchmesser in einen starkwandigen Mörser umgestaltet. In die Oeffnung des Mörsers A wird ein Stahl-Stempel B durch eine Festigkeitsmaschine eingetrieben. Der Hohlraum des Mörsers wird mit den Probestücken C besetzt und im Uebrigen durch eine Flüssigkeit ausgefüllt. Zur Dichtung dient eine Metallkappe D, die in Abb. 7 im Schnitt in natürlicher Grösse gezeichnet ist. Diese Dichtung hat sich sehr gut bewährt; der Vorschlag dazu ging von Herrn Assistent C. Klebe aus. Der einzige Nachtheil der Einrichtung besteht darin, dass bei jedem Versuche eine neue Kappe gebraucht wird.*) Nach Herausziehen

des Stempels muss man nämlich die Kappe anbohren, um sie aus dem Cylinder zu entfernen. Die Kappen werden von einer Metalldrückerei bezogen, müssen aber dann noch abgedreht und genau justirt werden, so dass das Opfer einer neuen Kappe für jeden Versuch immerhin nicht ganz leicht empfunden wird. Namentlich anfänglich, als es noch mehr Schwierigkeiten machte, eine dicht haltende Kappe herzustellen, ging man aus diesem Grunde nur mit Zögern an einen neuen Versuch. Jetzt sind aber die Angestellten meines Laboratoriums in der Justirung der Dichtungskappen so geübt, dass nicht mehr leicht ein Versagen vorkommt.

Der Mörser hat sich bisher, wie bereits erwähnt, gut gehalten. Dagegen gehört jetzt schon der dritte Stempel, der in Abb. 8, Taf. I im Massstabe gezeichnet ist, zu dem Apparate. Der erste Stempel war aus Stahl, aber höher als der jetzige. Als ein Druck von 3455 atm. in der Flüssigkeit und damit auch im Stempel erreicht worden war, womit jedenfalls die Proportionalitätsgrenze des verwendeten Stahles überschritten wurde, trat eine Art Ausknicken des aus dem Mörser herausragenden, ziemlich langen Stempeltheiles ein, der dadurch S-förmig gekrümmt und unbrauchbar gemacht wurde. Um möglichst schnell Ersatz zu erhalten, liess ich hierauf einen Stempel von geringerer Höhe (so wie in der Abbildung gezeichnet) aus Schmiedeisen herstellen. Dieser wurde nur bis zu 3000 atm. beansprucht; er wurde aber, wie freilich nicht anders zu erwarten war, bei dieser Last gestaucht und auch noch ein klein wenig verbogen. Er konnte indessen nach dem Versuche durch Abschlichten wieder in gebrauchsfähigen Zustand gesetzt werden, wird aber seitdem nur in Reserve gehalten. Jetzt wird ein Stempel aus bestem Werkzeug-Stahl von denselben Abmessungen wie der schmiedeiserne benutzt, der wenigstens bis zu Lasten von 3000 atm. nicht die geringsten Schwierigkeiten verursacht. Da man hoffen darf, bei diesem immerhin schon sehr beträchtlichen Flüssigkeitsdrucke noch manche neue Erfahrungen zu machen und da es wünschenswerth ist, einen stets gebrauchsfertigen Apparat zur Hand zu haben, der die Erzielung eines solchen Druckes jederzeit ohne Weiteres gestattet, habe ich mich dafür entschieden, den Apparat einstweilen nicht über 3000 atm. zu beanspruchen. Im Uebrigen glaube ich, dass es unter Verwendung besonderer Stahlarten für Cylinder und Stempel auf demselben Wege möglich sein dürfte, noch beträchtlich über 3000 atm. (bezw. 3455 atm.) hinaus zu kommen, vielleicht bis zu 6000 atm. Ehe die Erscheinungen bis zu 3000 atm. nach allen Seiten hin genauer untersucht sind, hat es aber kaum einen Zweck, die Lasten durch Aufwendung

*) Neuerdings ist es jedoch gelungen, den Apparat so zu verbessern, dass dieselbe Kappe wiederholt gebraucht werden kann.

grösserer Mittel sofort noch um so viel höher hinaufzutreiben.

In Bezug auf die Berechnung des Flüssigkeitsdruckes bemerke ich noch, dass hierbei die Reibung an der Dichtung nicht berücksichtigt ist. Als Flüssigkeitsdruck betrachte ich daher (angenähert) die Gesamtlast des Stempels, dividirt durch die Querschnittsfläche. Zunächst kam bei den mehr orientirenden Versuchen, um die es sich hier handelte, überhaupt nicht viel darauf an, ob der Druck etwas grösser oder kleiner war. Ausserdem glaube ich aber auch, dass die Reibung in der Dichtung in der That sehr gering ist, wenn als Flüssigkeit Ricinusöl verwendet wird, wie dies bei meinen späteren Versuchen stets geschehen ist. Die Abwärtsbewegung des Kolbens beim Zusammendrücken erfolgt nämlich nur sehr langsam; dabei ist immerhin eine dünne Oelschicht zwischen der Dichtungskappe und der Mörserwand vorhanden. Man weiss aber aus den Erfahrungen mit den von Amsler gebauten Festigkeitsmaschinen, dass die Reibung bei den im Oel schwimmenden, sehr langsam vorwärts bewegten Kolben sehr gering ist. Ausserdem würde auch eine grössere Reibungskraft zwischen Kappe und Mörserwand, die auf die Unterfläche des Stempels übertragen werden müsste, jedenfalls bleibende Formänderungen an der Kappe hervorrufen, von denen nichts wahrgenommen werden konnte. — Der Stempel selbst ist in die Bohrung des Mörsers eingeschliffen, aber so, dass er leicht darin geht. Es mag also immerhin ein Spielraum zwischen beiden, der mindestens nach einigen Tausendsteln, vielleicht auch nach Hundertsteln Millimeter zählt, vorhanden sein und jedenfalls wäre ohne Verwendung der Dichtungskappe die Erzielung von so hohen Drücken ganz ausgeschlossen.

Bei den ersten Versuchen verwendete ich als Flüssigkeit Wasser, gelegentlich auch einmal Quecksilber, später aber stets Ricinusöl. Abgesehen von dem schon zuvor erwähnten Vortheile der Verminderung der Kolbenreibung, kommt noch in Betracht, dass man dadurch ein Rosten des Apparats vermeidet. Ferner ist anzunehmen, dass das zähe Ricinusöl aus einer ihm etwa gebotenen kleinen Oeffnung in der Dichtung viel langsamer ausfliesst, als Wasser; vielleicht kommt noch hinzu, dass es ebenso auch langsamer in die Poren der Versuchskörper eindringt, obschon ich besondere Versuche, um dies aufzuklären, nicht unternommen habe.

Der Hub des Stempels bis zur Erreichung eines Druckes von 3000 atm. beträgt gewöhnlich einige cm. Er hängt natürlich von den besonderen Bedingungen des einzelnen Versuches ab, da er sich aus folgenden Posten zusammensetzt: 1) Zusammendrückung der Flüssigkeit, 2) Ausdehnung des Gefässes, 3) Zusammendrückung der beim Aufsetzen der Kappe mit eingeschlossenen Luftmenge,

4) Zusammendrückung der Probekörper und Eindringen der Flüssigkeit in deren Poren, 5) Entweichen geringer Flüssigkeitsmengen durch die Dichtung. Wenn die Last wieder entfernt wird, bewegt sich der Kolben wieder um ein gewisses Stück nach aussen; diese Bewegung setzt sich im Wesentlichen aus der Umkehrung der vorher unter 1) bis 3) aufgeführten Posten zusammen, obschon natürlich auch der Posten 4) mehr oder weniger daran betheiligt sein kann. Besondere Messungen des Kolbenhubs wurden gewöhnlich nicht vorgenommen; man achtete nur darauf, dass der Kolben nicht so tief eindringen durfte, um in Berührung mit der Beschickung des Cylinders zu kommen. In einem Falle wurden indessen die Eindringungstiefen gemessen. Der Stempelhub betrug hierbei zwischen 0 und 1500 atm. Flüssigkeitsdruck im Gefässe 28,5 mm und zwischen 1500 und 3000 atm. 9,1 mm, im Ganzen also für 3000 atm. 37,6 mm. Beim Zurückgehen auf 0 wurde der Stempel wieder um 24,1 mm nach aussen getrieben. Der Hohlraum des Mörsers von 300 mm Höhe war bei diesem Versuche fast ganz mit Flüssigkeit angefüllt, so dass die obere Fläche der Kappe bei Beginn des Versuches ungefähr in gleicher Ebene mit der Begrenzungsfläche des Mörsers lag. Beschickt war der Cylinder mit einem Holzwürfel, einem Sandsteinwürfel, einem Cementwürfel, die alle stark beschädigt und mit Flüssigkeit getränkt wurden, sowie einigen kleineren Krystallen.

Ich schicke zunächst zur Uebersicht einige allgemeine Bemerkungen über die Ergebnisse der Versuche voraus und lasse dann eine Zusammenstellung der an den einzelnen Probekörpern beobachteten Erscheinungen folgen. Zunächst führe ich jene Körper an, die durch den hohen Flüssigkeitsdruck nicht zerbrochen wurden. Zu erwähnen sind hier vor allem Krystalle aus Steinsalz, Kalkspath, Flussspath, Baryt und Quarz, die im Beisein von Herrn Prof. Groth, dem Mineralogen der hiesigen Universität, geprüft wurden. Selbst im optischen Verhalten trat durch den hohen Flüssigkeitsdruck, wie Herr College Groth fand, nicht die geringste nachweisbare Aenderung ein, obschon die Krystalle bei einseitigem Drucke in dieser Hinsicht zum Theile ausserordentlich empfindlich sind. Nicht zerbrochen wurden ferner Kugeln aus Glas und Kalkstein (die in manchen Gegenden Deutschlands unter der Bezeichnung „Schusser“ bekannten Spielkugeln der Kinder), Würfel aus Alabaster, Aragonit, Granit und, was sehr bezeichnend ist, Würfel aus Cement, die aus dem Innern grösserer Stücke herausgearbeitet waren, die bei Anstellung des Versuchs schon mehrere Jahre alt waren.

Hieran reihen sich Versuche mit Metallwürfeln an, die natürlich ebenfalls nicht zerbrochen, aber in einzelnen Fällen deutlich nachweisbar, bleibende Zusammendrück-

ungen erfahren hatten. Bei Würfeln aus Gusseisen konnten, wie hier gleich vorausgeschickt werden mag, überhaupt keine bleibenden Zusammendrückungen, bei Walzkupfer und Zinn solche in einem die Beobachtungsfehler nur wenig überschreitenden Masse festgestellt werden. Dagegen wurde der Bleiwürfel recht merklich und der Würfel aus Aluminium verhältnissmässig stark, nämlich im Mittel aus den drei Kanten um etwa $\frac{1}{400}$ der ursprünglichen Kantenlänge zusammengedrückt, während die Beobachtungsfehler bei diesen mit einer Mikrometerschraube vorgenommenen Messungen auf etwa $\frac{1}{10000}$ der Kantenlänge zu schätzen sind.

Holzwürfel werden der Quere nach, d. h. senkrecht zur Richtung der Fasern, stark zusammengedrückt, während sie in der Längsrichtung eher ein wenig verlängert erscheinen. Im Uebrigen sind diese Formänderungen je nach dem Verlaufe der Fasern (oder der Jahresringe) im Probestücke ganz unregelmässig, so dass der Körper nachher oft kaum noch an die vormals regelmässige Gestalt erinnert.

Unter niedrigeren Drücken kam es übrigens vor, dass ein Würfel aus Fichtenholz nur wenig zusammengedrückt war, während ein anderer, der diesem sonst völlig gleich, dessen Oberfläche aber mit einer dicken Lackschicht überzogen war, bei dem gleichen Drucke stark deformirt wurde. Nach dem Versuche wird diese Formänderung im Laufe der Zeit zum Theile wieder rückgängig; diese Nachwirkungen nehmen zu ihrem Ausgleich mindestens einige Tage in Anspruch.

Sandsteine mit erkennbarer Schichtung (andere wurden bisher kaum untersucht) werden durch den Flüssigkeitsdruck zersprengt. Die Würfel werden durch Bruchflächen, die parallel zum Lager verlaufen, in zwei oder mehr Platten gespalten. Manchmal, allerdings nur bei niedrigeren Drücken, waren auch nur Risse wahrzunehmen, die nicht ganz durch den Probekörper hindurchreichten, so dass dieser noch zusammenhing.

Probekörper aus reinem Cement wurden bei Drücken, die bis 3000 atm hinaufreichten, fast ausnahmslos zerbrochen. Nur dann, wenn die Probewürfel aus der Mitte grösserer Stücke, die schon längere Zeit vorher angefertigt waren, entstammten, trat, wie bereits früher betont wurde, niemals eine Zerstörung ein. Man erkennt daraus, dass es nur die verschiedene Beschaffenheit eines Cementwürfels in der Nähe der Oberfläche und im Innern ist, die den Bruch bedingt. Zugleich aber zeigt sich hieraus, dass diese Unterschiede lange Jahre hindurch bestehen bleiben. Für die Prüfung auf Volumenbeständigkeit in dem bekannten Taster-Apparate waren vor etwa 7 Jahren Cementprismen quadratischen Querschnitts an-

gefertigt worden, von denen nun Würfel zur Prüfung abgeschnitten wurden. Vier oder fünf von den Seitenflächen des Würfels bildeten Bestandtheile der Mantelfläche des lange aufbewahrten Cementprismas. Diese Würfel wurden durch den hohen Flüssigkeitsdruck sämmtlich zerstört. Die Zerstörung erfolgte im Wesentlichen durch das Absprengen der Ecken. Sehr oft schlossen sich die um vier benachbarte Ecken verlaufenden Bruchlinien auf der Seitenfläche des Würfels, die durch diese Ecken ging, zu einer recht regelmässigen Kreislinie aneinander. Der Kreis berührte die Kanten, bildete also einen in das Quadrat eingeschriebenen Kreis. Ganz so regelmässig verlief der Bruch natürlich nicht an allen Stellen oder an allen Probestücken; jedenfalls blieb aber niemals eine der acht Ecken ganz unbeschädigt an dem Würfel haften. Der nach Absprengen der Ecken übrig bleibende Kern hatte öfters eine bemerkenswerth regelmässige, entweder mehr cylindrische oder mehr kugelförmige Gestalt.

Cementcylinder, die durch Einstampfen in ein Glasrohr frisch angefertigt waren, wurden nach 7 tägiger Erhärtung geprüft. Auch diese zerbrachen, aber in weniger regelmässiger Weise. Einmal trat eine Bruchfläche auf, die parallel zu den Grundflächen verlief, ein andermal wurde der Cylinder ungefähr längs einer Durchmesser-Ebene aufgesprengt und ein drittes Mal wurden durch schief verlaufende Bruchflächen kleinere Bruchstücke an den Umrisslinien der Grundflächen abgedrückt. In manchen Fällen wurden die Oberflächen dieser Probekörper mit einem Schellackfirnis angestrichen und es scheint, dass die Brüche in diesem Falle schon bei etwas geringeren Lasten eintreten, als bei nackter Oberfläche. Bemerkenswerth ist noch, dass die Grundflächen bei lackirten Cementcylindern nach dem Versuche mehrmals ganz deutlich hohl gekrümmt erschienen.

Ich möchte nicht zu erwähnen unterlassen, dass mir eine weitere systematische Untersuchung dieser Erscheinungen noch manche Aufschlüsse, die für die Cementprüfung von Wichtigkeit werden könnten, zu versprechen scheint. Da ich selbst andere Ziele bei dieser Arbeit verfolgte, musste ich mich aber, um nicht zu weit abgelenkt zu werden, mit diesen allgemeinen Feststellungen begnügen.*)

Merkwürdig, aber wiederholt unzweifelhaft festgestellt ist die Thatsache, dass Probekörper aus Steinen oder Cement, die bei den Versuchen nicht zerbrachen, keineswegs bleibend zusammengedrückt wurden, sondern im Gegentheile ihre Volumen vergrösserten. Diese Erscheinung wird jedenfalls durch die Flüssigkeitsaufnahme verursacht, die unter dem hohen Drucke erfolgt. Wahr-

* Neuerdings habe ich jedoch Versuche eingeleitet, durch die diesen Erscheinungen weiter nachgegangen werden soll.

scheinlich kommt die Ausdehnung der Probekörper nicht schon während des hohen Druckes selbst zu Stande, sondern erst während der darauf erfolgenden Entlastung.

Die an der Oberfläche mancher Probekörper aufgebraachte Lackschicht sollte natürlich den Zweck haben, das Eindringen der Flüssigkeit in die Poren nach Möglichkeit zu verhindern. Aus Wägungen, die mit einer Anzahl von Probestücken vor und nach dem Versuche vorgenommen wurden, geht aber hervor, dass dies niemals vollständig erreicht wurde.

Das Gewicht der Metalle blieb (bei nicht lackirter Oberfläche) während des Versuches konstant, soweit wenigstens als die Genauigkeit der Beobachtung reicht. Auch die Krystalle haben, wie aus der Durchsichtigkeit zu schliessen war, während des Versuchs keine Flüssigkeit aufgenommen, obschon hier keine besondere Wägung vorgenommen wurde. Sandstein, Cement, Ziegelsteine und Holz nehmen, wie nicht anders zu erwarten war, viel Flüssigkeit auf; durch Lakiren der Oberfläche lässt sich diese Flüssigkeitsaufnahme zwar beschränken, aber nicht verhindern. Granitwürfel verschlucken auch unter hohem Drucke nur wenig Flüssigkeit.

Durch den hohen Druck wird die Wasseraufnahme eines Steins gegenüber den gewöhnlich vorliegenden Verhältnissen gesteigert. Einige Probekörper, die vor dem Versuche schon längere Zeit unter Wasser gelegt waren und dadurch mit Wasser ziemlich gesättigt erschienen, nahmen unter dem hohen Drucke noch recht erhebliche Mengen Wasser oder Quecksilber auf. Von der Oelaufnahme gilt dies gleichfalls.

Es wird sich empfehlen, hier noch mit einigen Worten auf die wahrscheinlichen Ursachen der beobachteten Brucherscheinungen einzugehen. Man kann zunächst vermuthen, dass der Bruch mit dem Eindringen der Flüssigkeit in die Poren zusammenhänge und als Stütze für diese Erklärung lässt sich anführen, dass nur solche Probekörper zerbrachen, die in der That Flüssigkeit verschluckten. Auch die zuvor erwähnte Ausdehnung der Probekörper in Folge der Flüssigkeitsaufnahme würde damit in Uebereinstimmung stehen. Gegen die Erklärung scheinen mir aber die mit den Cementproben gemachten, vorher schon beschriebenen Erscheinungen zu sprechen. Ich habe mich daher zunächst mehr der anderen Vermuthung zugeneigt, dass eine ungleichförmige Beschaffenheit der Probekörper — sei es in verschiedenen Theilen (Mangel an Homogenität), sei es nach verschiedenen Richtungen hin (Mangel an Isotropie) — an sich schon und unabhängig von dem Eindringen der Flüssigkeit zur Herbeiführung des Bruches ausreiche. In meinem Vortrage auf der Naturforscher-Versammlung in München stellte ich für den Bruch der Sandsteinwürfel den folgenden Erklärungsversuch auf:

Man weiss nämlich, dass bei Sandsteinen die auf gewöhnliche Weise ermittelte Druckfestigkeit gewöhnlich etwas verschieden je nach der Richtung des Druckes zum Lager ausfällt. Die etwas grössere Druckfestigkeit senkrecht zum Lager möge mit x , die parallel zum Lager mit y bezeichnet sein. Es könnte nun sein, dass ein Druck senkrecht zum Lager, verbunden mit einem Drucke ringsum parallel zum Lager sich in Bezug auf die Bruchgefahr gegenseitig aufheben, wenn beide in einem bestimmten Verhältnisse, vielleicht also etwa im Verhältnisse $x:y$ zu einander ständen. Bei einem allseitig gleichen Drucke p würde dann offenbar eine Bruchgefahr bestehen. Denn von dem Drucke p parallel zum Lager würde dann nur der Antheil $p \frac{y}{x}$ durch den gleichzeitig bestehenden Druck p senkrecht zum Lager ausgeglichen. Es bliebe also ein unausgeglichener Antheil von der Grösse

$$p \frac{x - y}{x}$$

übrig, der die Zerstörung möglicher Weise ebenso herbeiführen könnte, als wenn der sich gegenseitig ausgleichende Antheil des Spannungszustandes überhaupt nicht vorhanden wäre.

Von vornherein habe ich diese Andeutungen nur mit allem Vorbehalte einer späteren Nachprüfung ausgesprochen. Bestärkt wurde ich anfänglich in meiner Vermuthung durch den Umstand, dass die Brüche der Sandsteinwürfel in ganz gleicher Weise wie bei den später zu beschreibenden Versuchen über die Umschlingungsfestigkeit erfolgten. Durch die seitdem vorgenommenen Versuche mit den Krystallen, deren Festigkeit ebenfalls in sehr ausgesprochener und regelmässiger Weise von der Richtung der Kraft gegenüber den Krystall-Axen abhängt und die trotzdem nicht zerdrückt wurden, bin ich aber wieder zweifelhaft geworden, ob die versuchte Erklärung überhaupt richtig sein kann. Es ist auch nicht recht einzusehen, weshalb sich der Bruch immer nur auf verhältnissmässig wenige — allerdings meist recht regelmässig verlaufende — Bruchflächen erstreckte und nicht zu einer noch weiter fortschreitenden Zertrümmerung führte. — Jedenfalls ist in dieser Sache das letzte Wort noch nicht gesprochen.

Ich lasse jetzt die näheren Angaben über die bei den Versuchen gemachten Einzelbeobachtungen folgen. Die Probekörper, über die Eintragungen in das Beobachtungsheft gemacht wurden, sind mit fortlaufenden Nummern versehen, unter denen ich sie hier aufführe; dabei werde ich mich indessen darauf beschränken, nur eine Auswahl mitzutheilen, indem ich solche, bei denen überhaupt nichts Bemerkenswerthes gefunden wurde oder bei denen nach-

her ein Zweifel über die Zuverlässigkeit der Beobachtung nach irgend einer Richtung hin aufkam, fort lasse.

Von einer Anzahl Probekörper sind photographische Aufnahmen gemacht, die auf Tafel II wiedergegeben sind.

§ 4.

Zusammenstellung der Beobachtungsergebnisse bei den Versuchen mit allseitig gleichem Flüssigkeitsdrucke.

Nr. 2.

Granitwürfel, vorher längere Zeit im Wasser gelagert, wiegt vor dem Versuche in Luft 41,246 gr, unter Wasser 26,461 gr, wird dann unter Wasser einem Drucke von **1000 atm** ausgesetzt und wiegt nachher in Luft 41,254 gr, unter Wasser 26,471 gr. Wasseraufnahme durch den Druck 0,008 gr; die Milligramme sind indessen nicht sicher.

Nr. 4.

Grauer Sandstein von St. Margareth, Trockengewicht 61,036 gr, hierauf 16 Stunden unter Wasser aufbewahrt, Gewicht in Luft 62,150 gr, unter Wasser 36,935 gr. Dann mit **1000 atm** unter Quecksilber gedrückt und wieder gewogen: in Luft 73,07 gr, unter Wasser 47,76 gr. Dann nochmals abgetrocknet und abermals gewogen: in Luft 72,965 gr, unter Wasser 47,750 gr. Aufnahme von Quecksilber durch den Druck 10,815 gr.

Nr. 5.

Parallelepiped aus Sandstein, Gewicht trocken vorher 19,445 gr; eine durch eingesetzte Marken kenntlich gemachte Strecke ergab mit der Mikrometerschraube gemessen eine Länge von 20,400 mm. Hierauf belastet mit **360 atm** in Ricinusöl, Gewicht 20,495 gr; Zunahme = 1,050 gr; Messstrecke = 20,408 mm, Zunahme = 0,008 mm. Hierauf nochmals belastet mit **2000 atm**; Gewicht 20,750 gr, weitere Zunahme = 0,255 gr; Messstrecke = 20,448 mm, weitere Zunahme 0,040 mm. Genauigkeit der Messungen auf etwa 0,002 bis 0,003 mm zu schätzen.

Nr. 6.

Parallelepiped aus Ziegelstein, Gewicht trocken 19,670 gr, eine Messstrecke 22,302 mm. In Ricinusöl belastet mit **360 atm**, Gewicht 21,975 gr, Oelaufnahme 2,305 gr. Messstrecke 22,308 mm, Zunahme 0,006 mm. Nochmals belastet mit **2000 atm**, Gewicht 22,665 gr, weitere Oelaufnahme 0,690 gr, Messstrecke 22,343 mm, weitere Zunahme 0,035 mm.

Nr. 7.

Würfel aus Granit, Gewicht 41,135 gr, Messstrecke 21,387 mm. Gedrückt mit **360 atm**, Gewicht 41,150 gr, Oelaufnahme 0,015 gr, Messstrecke 21,388 mm, Zunahme 0,001 (liegt unter der wahrscheinlichen Fehlergrenze). Nochmals belastet mit **2000 atm**. Gewicht 41,158 gr, weitere Oelaufnahme 0,008 gr, Messstrecke 21,388 mm (unverändert).

Im folgenden Verzeichnisse sind jene Nummern, zu denen eine Darstellung auf Tafel II gehört, durch Beisetzen eines Sterns hervorgehoben.

Nr. 8.

Cementwürfel, Gewicht 22,636 gr, Messstrecke 24,178 mm. Gedrückt mit **360 atm**. Gewicht 26,210 gr, Oelaufnahme 3,574 gr, Messstrecke 24,178 mm (unverändert). Nochmals gedrückt mit **2000 atm**. Gewicht 27,020 gr, weitere Oelaufnahme 0,810 gr, Messstrecke 24,263 mm, Zunahme 0,085 mm. Nachträglich bemerkt man unter dem Mikroskop feine Risse an mehreren Seitenflächen, die mit dem blossen Auge nicht wahrzunehmen sind.

Nr. 9 und 10.

Proben aus Kupfer und Blei, die ebenso behandelt wurden, wie die vorausgehenden, ohne dass sich deutliche Aenderungen von Gewicht oder Messstrecke gezeigt hätten.

Nr. 11*.

Parallelepiped aus Sandstein wird unter einem Drucke von **2000 atm** zersprengt. Ein Riss geht durch die Hälfte des Probestücks, das im Uebrigen noch zusammenhängt; bei Fortsetzung des Risses würde das Stück in zwei ungefähr gleiche Hälften zerfallen. Die Aenderungen von Gewicht und Messlänge haben beim Entstehen von Rissen oder beim vollständigen Bruch keine Bedeutung mehr; die darauf bezüglichen Angaben werden daher in solchen Fällen hier und in der Folge ganz weggelassen.

Nr. 12a und 12b.

Zwei Parallelepipede aus Ziegelstein, von denen 12a mit Firniss angestrichen ist, während 12b mit nackten Oberflächen gelassen wird. Unter einem Drucke von **2000 atm** wird Stück 12b durch einen feinen, ungefähr längs einer Diagonal-Ebene verlaufenden und sich über etwa die Hälfte des Stückes hinziehenden Riss aufgesprengt, während 12a keine Beschädigung erkennen lässt. Gewicht von 12a vorher 11,415 gr, eine Messstrecke 16,650 mm, nach dem Drucke Gewicht 13,985 gr, Oelaufnahme daher 2,570 gr, Messstrecke 16,680 mm, Zunahme 0,030 mm.

Nr. 13a* und 13b.

Zwei Parallelepipede aus Buchenholz, 13a mit lackirten, 13b mit nackten Oberflächen, einem Drucke von **2000 atm** ausgesetzt. Stück 13a Gewicht vorher 6,235 gr, Länge 18,816 mm, Breite 23,515 mm; nachher Gewicht 8,065 gr, Oelaufnahme daher 1,830 gr, Länge 18,890 mm, Zunahme 0,074 mm, Breite 20,518, Abnahme 2,997 mm. Stück 13b Gewicht vorher 7,400 gr, Länge

22,048 mm, Breite 22,323 mm; nachher Gewicht 11,320 gr, Oelaufnahme daher 3,920 gr, Länge 22,093, Zunahme 0,045 mm, Breite 22,172 mm, Abnahme 0,151 mm. Beachtenswerth ist hier das verschiedene Verhalten des lackirten und des nicht lackirten Stücks.

Nr. 14a* und 14b*.

Zwei Cementwürfel, einer mit lackirten, einer mit nackten Oberflächen. Unter einem Drucke von **2000 atm** werden beide zersprengt. An beiden sind die Ecken abgedrückt, so dass ein Kern von ungefähr kugelförmiger Gestalt übrig bleibt.

Nr. 15*.

Würfel aus Fichtenholz mit Schellacklösung überzogen, Gewicht vorher 3,550 gr, nach dem Drucke von **2000 atm** stark deformirt, Gewicht 3,910 gr, Oelaufnahme 0,360 gr.

Nr. 16*.

Würfel aus Buchenholz, ebenso lackirt, Gewicht vorher 7,480 gr; nach dem Drucke von **2000 atm** stark deformirt. Gewicht 8,105 gr, Oelaufnahme 0,625 gr.

Nr. 17 und 18*.

Zwei Cementwürfel, lackirt, beide durch **2000 atm** zersprengt.

Nr. 19.

Sandstein, lackirt, Gewicht 25,565 gr; durch den Druck von **2000 atm** nicht beschädigt, Gewicht nachher 25,610 gr, Oelaufnahme 0,045 gr.

Nr. 20.

Kalkstein, lackirt, Gewicht 10,730 gr; durch den Druck von **2000 atm** nicht beschädigt, Gewicht nachher 11,125 gr, Oelaufnahme 0,395 gr.

Nr. 21 a und 21 b.

Zwei Ziegelstücke, beide lackirt, durch den Druck von **2000 atm** nicht beschädigt. Stück a Gewicht vorher 9,855 gr, nachher 10,740 gr, Oelaufnahme 0,885 gr; Stück b Gewicht vorher 11,650 gr, nachher 13,465 gr, Oelaufnahme 1,815 gr.

Nr. 22 a und 22 b.

Zwei Würfel aus gelbem feinkörnigem Sandstein, 22b lackirt und 22a unlackirt. Die Druckfestigkeit war vorher auf gewöhnliche Art an zwei andern kleinern Würfeln zu 322 atm und 328 atm, im Mittel zu 325 atm ermittelt. Dann beide einem Drucke von **1850 atm** ausgesetzt. Stück 22a Gewicht ursprünglich 28,32 gr, dann nach längerem Lagern in Oel (ohne Druck) 28,93 gr. Nach dem Drucke 29,78 gr, Oelaufnahme durch den Druck 0,85 gr, bleibt unbeschädigt. Stück 22b Gewicht ursprünglich 26,97 gr, nach Lagern in Oel 27,105 gr, erhält unter dem Drucke einen Riss, der ungefähr in der Mitte, etwa

halb durch den Würfel reicht, Gewicht 29,530 gr; wegen des Risses ist diese Ziffer aber nicht brauchbar.

Nr. 23* und 24*.

Zwei Cylinder aus reinem Cement, 7 Tage vorher angefertigt, Nr. 24 lackirt, Nr. 23 nicht lackirt. Beide werden unter einem Drucke von **1850 atm** in ähnlicher Weise durch Absprennen kleiner Stücke beschädigt. Die vorher ebenen Grundflächen des lackirten Cylinders sind deutlich concav gekrümmt, die des nicht lackirten sind eben geblieben.

Nr. 25 und 26.

Zwei Würfel aus Lagermetall bleiben unter einem Drucke von **1850 atm** unverändert.

Nr. 29*.

Ein Würfel von demselben Sandstein wie 22a und 22b, mit Lacküberzug, nach dem Lackiren 29,825 gr schwer, nimmt beim Lagern im Oelbad während mehrerer Stunden auf 30,590 gr zu, wird durch **2500 atm** längs einer Lagerschicht vollständig aufgespalten.

Nr. 30 und 31.

Zwei Würfel aus Cement, aus der Mitte eines grösseren, mehrere Jahre alten Stückes herausgearbeitet, Nr. 30 lackirt, Nr. 31 unlackirt. Beide bleiben unter einem Drucke von **2500 atm** unbeschädigt. Stück Nr. 30 vorher 24,345 gr schwer, nach Lagern im Oelbade 24,363 gr, Oelaufnahme 0,018 gr; nach dem Drucke 24,480 gr, Oelaufnahme durch den Druck 0,117 gr. Stück Nr. 31 vorher 26,375 gr schwer, nach dem Oelbade 26,490 gr, Oelaufnahme 0,115 gr; nach dem Drucke 26,820 gr, Oelaufnahme durch den Druck 0,330 gr.

Nr. 32* und 33.

Zwei Würfel aus einem ganz schwach gebrannten Mauerziegel, Nr. 32 lackirt, Nr. 33 unlackirt, Druckfestigkeit vorher durch zwei Versuche zu 27,6 und 31 atm im Mittel 29 atm. ermittelt. Das lackirte Stück wird unter **2500 atm** durch einen schief verlaufenden Riss in zwei Theile getrennt; das nicht lackirte bleibt unbeschädigt. Gewicht desselben ursprünglich 16,420 gr, nach dem Oelbade 20,450 gr, Oelaufnahme 4,030 gr, nach dem Drucke 21,51 gr, Oelaufnahme durch den Druck 1,06 gr.

Nr. 34* und 35*.

Zwei Cylinder aus Cement gegossen, 7 Tage alt, Nr. 34 lackirt, Nr. 35 nicht lackirt. Der lackirte Cylinder wird durch den Druck in einer parallel zu den Grundflächen verlaufenden Bruchfläche zersprengt, Grundflächen etwas concav. Der nicht lackirte erhält einen Riss, der ungefähr längs einer Durchmesserenebene (oben etwas schief) verläuft. Die Stücke haften nach dem Versuche noch aneinander, doch lässt sich der Körper mit der Hand auseinander reissen. Wägungen ohne Zweck.

Nr. 38* und 39*.

Zwei Sandsteinwürfel von derselben Sorte wie 22a und 22b, beide unlackirt, werden einem Drucke von **3000 atm** ausgesetzt und zerbrechen beide durch Bruchflächen, die parallel zum Lager laufen. Nr. 38 wog ursprünglich 20,61 gr und nach dem Oelbade 21,10 gr, Nr. 39 vorher 20,05 gr, nach dem Oelbade 20,60 gr. Wägung nach dem Bruch zwecklos.

Nr. 40 und 41.

Zwei Würfel aus Alabaster, bleiben beim Drucke von **3000 atm** ganz unbeschädigt; auch Gewichtszunahme entweder Null oder kaum messbar.

Nr. 43 und 44*.

Zwei Cementwürfel, davon Nr. 43 aus dem Innern eines grösseren Stücks entnommen, Nr. 44 Abschnitt eines Parallelepiped, dessen Querschnitt mit der Würfelseite übereinstimmte, beide Stücke mehrere Jahre alt. Unter einem Drucke von **3000 atm** bleibt Nr. 43 ganz unbeschädigt, während Nr. 44 vollständig zersprengt wird. In diesem Falle sind nämlich nicht nur die Ecken abgedrückt, sondern das Stück ist auch durch die Mitte gespalten und von dieser Bruchfläche gehen noch weitere Risse aus.

Nr. 45.

Buchenholzwürfel, Gewicht ursprünglich 5,96 gr, nach dem Oelbade 6,14 gr; wird durch **3000 atm** in der Querichtung stark zusammengedrückt und nimmt zugleich 2,36 gr Oel auf.

Nr. 46 und 47.

Zwei Glaskugeln, die unter einem Drucke von **3000 atm** keine erkennbare Aenderung erleiden.

Nr. 48* und 49*.

Zwei Sandsteinwürfel (wie 22a und 22b); Nr. 48 unlackirt, Gewicht 27,26 gr, nach dem Oelbade 28,72 gr, Oelaufnahme 1,46 gr; Nr. 49 lackirt, Gewicht 29,05 gr, nach dem Oelbade 29,25 gr, Oelaufnahme 0,20 gr. Beide werden einem Drucke von **3455 atm** ausgesetzt und dabei zersprengt. Der nicht lackirte zerfällt durch zwei in der Lagerichtung verlaufende Bruchflächen in drei ziemlich gleich dicke Platten. Der lackirte erhält unregelmässig vertheilte Risse, die zum Theil in der Richtung des Lagers, zum Theil auch senkrecht und schief dazu verlaufen. Ein Stück ist ganz abgesprengt, das übrige hängt noch zusammen, wobei einer der Risse etwa $\frac{3}{4}$ mm weit aufklafft.

Nr. 52 und 53*

Zwei Cementwürfel, Nr. 52 aus dem Innern eines grösseren Stücks entnommen, Nr. 53 Abschnitt eines Parallelepiped (ganz wie bei Nr. 43 und 44). Unter einem Drucke von **3455 atm** bleibt wiederum der aus dem Innern entnommene (Nr. 52) unbeschädigt, während der andere zerdrückt wird. Nr. 52 Gewicht ursprünglich

22,75 gr, nach dem Oelbade 23,04 gr, Oelaufnahme 0,29 gr, weitere Oelaufnahme durch den Druck 1,49 gr. Nr. 53 Gewicht ursprünglich 21,86 gr, nach dem Oelbade 21,96 gr, Oelaufnahme 0,10 gr.

Nr. 54.

Würfel aus Mauerziegel (wie Nr. 32 und 33), Gewicht 16,72 gr, nach dem Oelbade 20,74 gr, zeigt nach dem Drucke von **3455 atm** keine Beschädigung, aber eine Gewichtszunahme von 1,08 gr.

Nr. 55*.

Würfel aus Buchenholz, Kantenlänge ursprünglich je 21,3 mm, Gewicht 6,05 gr, nach dem Oelbade 6,25 gr. Nach dem Drucke von **3455 atm** Kantenlänge 20,0; 21,0 und 21,3 mm, Oelaufnahme 2,50 gr.

Nr. 58.

Würfel aus Kupfer (Material aus einem früher geprüften Probestabe entnommen und bei dessen Prüfung in Mitleidenschaft gezogen). Die von einem Eckpunkte ausgehenden Kanten werden mit Hilfe einer Mikrometerschraube vor und nach dem Drucke von **3000 atm** gemessen, Genauigkeit dieser Messung auf 0,002 bis 0,003 mm zu veranschlagen.

Es betragen			
die Messstrecken	1	2	3
vor dem Drucke	23,390	23,445	23,407 mm
nach dem Drucke	23,385	23,443	23,405 mm

Daher eine kleine bleibende Zusammendrückung des Würfels, die sich nicht näher beziffern lässt, da sie die Beobachtungsfehler kaum überschreitet.

Nr. 59.

Würfel aus Aluminium, aus Gussbarren herausgearbeitet, ebenso behandelt wie der vorige. Man fand

die Messstrecken	1	2	3
vor dem Drucke	22,287	22,783	23,587 mm
nach dem Drucke	22,220	22,728	23,557 mm
Zusammendrückung	0,067	0,055	0,030 mm

Zusammendrückung im Mittel für die drei Kanten 0,0507 mm oder $22,1 \cdot 10^{-4}$ der ursprünglichen Kantenlänge.

Nr. 66.

Würfel aus Blei (gegossen), ebenso behandelt wie der vorige.

Messstrecken	1	2	3
vor dem Drucke	23,450	23,578	23,442 mm
nach dem Drucke	23,438	23,563	22,440 mm
Zusammendrückung	0,012	0,015	0,002 mm

Mittel für die 3 Kanten 0,0097 mm oder $4,1 \cdot 10^{-4}$ der ursprünglichen Kantenlänge; auf den Seitenflächen sind an einigen Stellen kleine Gruben entstanden, die auf das Eindringen von Gussblasen zurückzuführen sind.

Nr. 61.

Würfel aus gegossenem Zinn, ebenso behandelt.

Messstrecken	1	2	3
vor dem Drucke	23,252	23,102	23,220 mm
nach dem Drucke	23,250	23,102	23,213 mm
Zusammendrückung	0,002	0,000	0,007 mm

Daher kleine bleibende Zusammendrückung, die die Beobachtungsfehler nur wenig überschreitet; an den Seitenflächen sind einzelne Grübchen wahrzunehmen, ähnlich wie beim Bleiwürfel.

Nr. 62.

Würfel aus Gusseisen, ebenso behandelt.

Messstrecken	1	2	3
vor dem Drucke	20,671	20,064	20,263 mm
nach dem Drucke	20,671	20,064	20,263 mm

Daher überhaupt keine Aenderung wahrnehmbar. (Die genaue Uebereinstimmung der drei Werthe vor und nach dem Drucke ist zufällig, da, wie schon erwähnt, bei öfters wiederholten Messungen der gleichen Strecke Unterschiede von 2 bis 3 Einheiten der letzten Stelle nicht selten vorkamen. Im Uebrigen sind freilich die vorausgehenden Zahlen sämtlich Mittelwerthe aus mehreren Messungen, so dass die wahrscheinliche Genauigkeit entsprechend grösser ist.)

Eine Anzahl weiter folgender Versuche mit 3000 atm an Proben aus Cement, Sandstein und Holz, die nur eine Bestätigung der bereits angeführten Versuche lieferten, seien der Kürze halber fortgelassen.

§ 5.

Umschlingungsfestigkeit und Zerrungsfestigkeit.

Bei einer anderen Reihe von Versuchen suchte ich die Probekörper einem Spannungszustande auszusetzen, bei dem zwei Hauptspannungen Druckspannungen von gleicher Grösse, die dritte Hauptspannung aber gleich Null sein sollten. Der kürzeren Ausdrucksweise wegen möge die Festigkeit bei dieser Art der Beanspruchung als die Umschlingungsfestigkeit des Körpers bezeichnet werden. Die Bezeichnung „Druckfestigkeit“ muss nämlich, um jede Verwechslung auszuschliessen, unter allen Umständen auf den Fall beschränkt werden, dass zwei Hauptspannungen gleich Null sind.

Zugleich sei für den Fall, dass der Bruch durch zwei Hauptspannungen herbeigeführt wird, die beide Zugspannungen von gleicher Grösse sind, während die dritte Hauptspannung gleich Null ist, die Bezeichnung Zerrungsfestigkeit vorgeschlagen. Mit dieser habe ich mich bei meinen bisherigen Untersuchungen nur wenig beschäftigt. Ich möchte daher gleich an dieser Stelle anführen, was ich in dieser Hinsicht, freilich ohne be-

Schliesslich liess ich noch aus Bruchstücken von Kalksteinen und Sandsteinen, die früher im Laboratorium auf Frostbeständigkeit geprüft worden und dabei zerfroren waren, einige kleine Würfel herstellen und prüfte sie mit einem Flüssigkeitsdrucke von 3000 atm. Die Vermuthung lag nämlich nahe, dass besonders solche Steine, die bei der Frostprobe zerspringen, auch bei diesen Versuchen mehr gefährdet seien. Namentlich dann, wenn man von der Annahme ausgeht, dass der Bruch durch das Eindringen der Flüssigkeit bewirkt werde, liegt eine solche Vermuthung nahe, da beim Frostversuche durch die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren das Zersprengen herbeigeführt wird. Zum Versuche wurden zwei Kalksteinsorten verwendet, die beim vorangegangenen Frostversuche starke Zerstörungen durch Aufsprengen erfahren hatten und eine Sandsteinsorte, die durch sehr starkes Absanden gelitten hatte. Eine der Kalksteinsorten und die Sandsteinsorte, von denen mehrere Würfel geprüft wurden, blieben indessen unter dem Drucke von 3000 atm ganz unbeschädigt. Die andere, sehr weiche, Kalksteinsorte wies kleine Beschädigungen auf, die durch feine, netzartig auf der Oberfläche verlaufende, kurze Risse, die sich aber nur wenig in die Tiefe erstreckten, gebildet wurden. — Dieses Ergebniss scheint mir ebenfalls darauf hinzuweisen, dass das Eindringen der Flüssigkeit nicht die unmittelbare Ursache des Bruches bildet. Als wahrscheinlichste Bruchursache dürfte nach alledem einstweilen die inhomogene Beschaffenheit der Probekörper anzusehen sein.

sonderen Erfolg, gethan habe. Zunächst liess ich zwei Stücke eines Bleirohrs, die an einem Ende geschlossen, mit dem andern an eine Pumpe angeschlossen wurden, durch Wasserdruck zersprengen und zugleich Bleistreifen, die aus dem Material der Röhre hergestellt waren, durch einen Zugversuch abreißen. Die Rohrwand wird nun freilich bei dem Wasserdruckversuche nicht auf Zerrungsfestigkeit beansprucht, da die in der Rohrxaxe auftretende Hauptspannung nur halb so gross ist, als die Ringspannung. Immerhin würde ein einwandfreier Versuch dieser Art einen gewissen Rückschluss darauf zulassen, wenigstens insofern ob die Zerrungsfestigkeit als grösser oder als kleiner wie die Zugfestigkeit einzuschätzen sei. Mit Rücksicht auf die mit der herrschenden Anschauung im Widerspruche stehenden Resultate von Wehage würde es ja auf die weitere Prüfung und Entscheidung gerade dieser Frage in erster Linie ankommen. Die nur nebenbei ausgeführten und von mir selbst aus Zeitmangel nicht weiter verfolgten Versuche sind jedoch nach mehreren Richtungen nicht

ganz einwandfrei, vor Allem auch nicht zahlreich genug und sie lassen sich daher zu zuverlässigen Schlüssen nicht verwerthen. Ich erwähne sie hier auch nur, weil es mir recht wohl möglich erscheint, bei weiterer Verfolgung dieses Weges zu brauchbaren Ergebnissen zu gelangen. Vorzuziehen wäre hierbei allerdings, wenn sich dies praktisch hinreichend gut verwirklichen liesse, die Prüfung kugelförmiger Gefässe, weil man dann unmittelbar die Zerrungsfestigkeit erhielte. Natürlich müsste man sicher sein, dass die Probestreifen, die zum Vergleiche auf Zugfestigkeit geprüft werden müssten, aus Material von genau gleicher Beschaffenheit beständen. — Vielleicht kommt man mir von anderer Seite durch Aufgreifen und Ausführung dieses Versuchsplans zu Hülfe.

Ferner hatte ich auch ebenso wie Herr Wehage Versuche über die Festigkeit kreisförmiger Platten, die in der Mitte belastet wurden, zur Prüfung der Zerrungsfestigkeit in Aussicht genommen und einige auch ausgeführt. Es schien mir hier am besten, einen spröden Körper zu nehmen, der gegen Zug weit empfindlicher ist, als gegen Druck und die Festigkeit der Platten mit der von Streifen zu vergleichen, die als Balken angelagert und durch eine Belastung in der Mitte zerbrochen wurden. Das beste Material für diesen Zweck schien mir Glas zu sein, und ich habe daher auch eine Anzahl von Versuchen mit solchen Scheiben, die aus gewöhnlichem Fensterglas geschnitten waren, ausgeführt. Es zeigte sich aber bald, dass die Festigkeit solcher Glasscheiben von einem Stücke zum andern sehr grossen Schwankungen unterliegt. Wegen dieser von reinen Zufälligkeiten abhängigen grossen Unterschiede war es nicht möglich, irgendwie brauchbare Mittelwerthe zu gewinnen. Die Benutzung von Spiegelglasplatten würde diesem Uebelstande wahrscheinlich abgeholfen haben; Rücksichten auf den Kostenpunkt haben aber neben dem Zeitmangel diese weitere Ausdehnung der Versuche bisher verhindert.

Zuverlässige Zahlenwerthe für die Umschlingungsfestigkeit im Vergleiche mit der Druckfestigkeit oder für die Zerrungsfestigkeit im Vergleiche mit der Zugfestigkeit bei demselben Materiale würden ein vorzügliches Mittel zur Prüfung der verschiedenen, bisher aufgestellten Ansichten über die für die Bruchgefahr massgebenden Bedingungen bilden. Voraussetzung wäre dabei natürlich, dass man in jedem Falle die „wahren Werthe“ der Festigkeit in dem früher erörterten Sinne vor sich hätte. Man kann z. B. sehr leicht, wie ich später noch näher darlegen werde, einen Würfel durch gleich grossen Druck auf vier Seiten, also durch „Umschlingen“ zum Bruche bringen. Die Schwierigkeit fängt erst an, wenn es sich um die Frage handelt, ob und wie dafür gesorgt werden kann, dass der beabsichtigte Spannungszustand auch

wirklich in allen Theilen gleichmässig im Probewürfel zu Stande kommt. Während nämlich, wie schon früher dargelegt wurde, die Reibung der Probekörper an den Druckplatten schon bei einem gewöhnlichen Druckversuche von sehr bedeutendem Einflusse auf das Ergebniss des Versuches zu werden vermag, so gilt dies bei einem Umschlingungsversuche in noch viel höherem Grade, weil sich hier die Reibung auf 4 Druckflächen geltend machen kann. Nun fand ich zwar, dass man durch eine geeignete Schmierung der Druckflächen die Reibung ganz bedeutend vermindern kann, so dass sie kaum noch eine Rolle zu spielen vermag. Dabei treten aber andere Bedenken auf, die in der Folge noch ausführlich zu besprechen sein werden.

Um ein Probestück auf Umschlingen zu beanspruchen, kann man verschiedene Versuchsanordnungen ersinnen. Zunächst kann man sich hierzu für Körper von geringer Festigkeit des in der Einleitung besprochenen Voigt'schen Apparates bedienen. Durch Anspannen einer Feder müsste man den im Gefässe herrschenden Gas- oder Flüssigkeitsdruck nach einer Richtung hin für das Probestück jederzeit aufheben und im Uebrigen den Druck im Gefässe so lange steigern, bis der Bruch erfolgt. Gegebenen Falles führt die Voigt'sche Versuchsanordnung schon ohne jede Aenderung zur Kenntniss der Umschlingungsfestigkeit, nämlich immer dann, wenn der Flüssigkeitsdruck im Gefässe schon von vornherein zufällig gleich der Umschlingungsfestigkeit ist.

Unter der Voraussetzung, dass ein solcher Versuch bei Cementproben zu ähnlichen Ergebnissen führte, wie bei den von Voigt bisher untersuchten Körpern, die für die Technik nur von geringem Interesse sind, würde man hierbei zu dem merkwürdigen Schlusse gelangen; dass die Umschlingungsfestigkeit so hoch wie die wahre Zugfestigkeit des Cements sein müsse, d. h. jedenfalls weit niedriger als die Druckfestigkeit. Auf Grund meiner Befunde betrachte ich indessen diese Folgerung als ganz unwahrscheinlich und schon aus diesem Grunde würde ich die Ausdehnung der Voigt'schen Versuche auf Probekörper aus Cement freudig begrüssen. Als eine wünschenswerthe Ergänzung der Voigt'schen Versuche wäre es wohl auch zu betrachten, wenn festgestellt würde, ob der Ersatz des gasförmigen Körpers in dem Gefässe durch eine tropfbare Flüssigkeit keine Aenderung herbeiführt. Da Herr Voigt bereits im Besitze des von ihm so gut ausgedachten Apparates ist, mit dem sich diese ferneren Versuche ohne irgendwie schwierige Vorbereitungen sofort ausführen lassen dürften, habe ich natürlich nicht daran gedacht, sie meinerseits in Angriff zu nehmen. Ich glaube vielmehr hoffen zu dürfen, dass man hierüber von Göttingen her in nicht zu ferner Zeit Näheres hören wird.

Nahe verwandt mit der Voigt'schen Versuchsanordnung ist eine andere, die von Herrn Kreisbauinspektor Moormann in Geestemünde ausgedacht und mir vor einigen Jahren brieflich von ihm mitgeteilt wurde. Ich habe sie daraufhin auch selbst angewendet, freilich ohne zum gewünschten Ziele zu gelangen. Immerhin wird eine kurze Beschreibung der Versuchseinrichtung hier am Platze sein. Während bei der Voigt'schen Anordnung der Körper ganz in die unter Druck stehende Flüssigkeit eintaucht und dabei zugleich einer besonders angebrachten Zugkraft ausgesetzt wird, lässt man bei der Moormann'schen Anordnung den Flüssigkeitsdruck nur auf die Mantelfläche eines Cylinders wirken. Die beiden Grundflächen des Cylinders bleiben frei von Druck, was man dadurch erreicht, dass beide Cylinder-Enden durch Stopfbüchsenpackungen aus dem Gefässe, in dem der Cylinder sonst steckt, heraus reichen. Man erhält aus einem solchen Versuche, unter der Voraussetzung, dass er einwandfrei durchgeführt werden kann, unmittelbar die Umschlingungsfestigkeit. Die Schwierigkeit für die Ausführung liegt aber hier natürlich in der Stopfbüchsenpackung, die man wenigstens nach dem, was ich auf Grund meiner eigenen Erfahrungen annehmen muss, schwerlich so ausbilden kann, dass sie allen an sie zu stellenden Anforderungen genügt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt den Apparat in der Ausführung, die ich ihm geben liess, im Schnitte. *G* ist das cylindrische Gefäss, das durch Vermittelung des Stutzens *S* mit einer Hochdruckwasserleitung oder mit einer Pumpe in Verbindung gesetzt werden kann. Neben an ist der Cementcylinder *C* besonders dargestellt, der in das Gefäss geschoben wird und in die beiden Stopfbüchsen *D* hineinreicht. Am oberen und unteren

Ende wird der Umfang des Cementcylinders mit einem Mantel *E* aus dünnem Messingblech armirt, das schon beim Einstampfen des Cementbreies in die Form gelegt wird und sich nach dem Erhärten des Cements mit diesem fest verbindet. Die Dichtung in der Stopfbüchse wurde

durch mit Talg getränkte Hanfzöpfe bewirkt, die durch Anziehen der Schrauben zum Anliegen gebracht wurden.

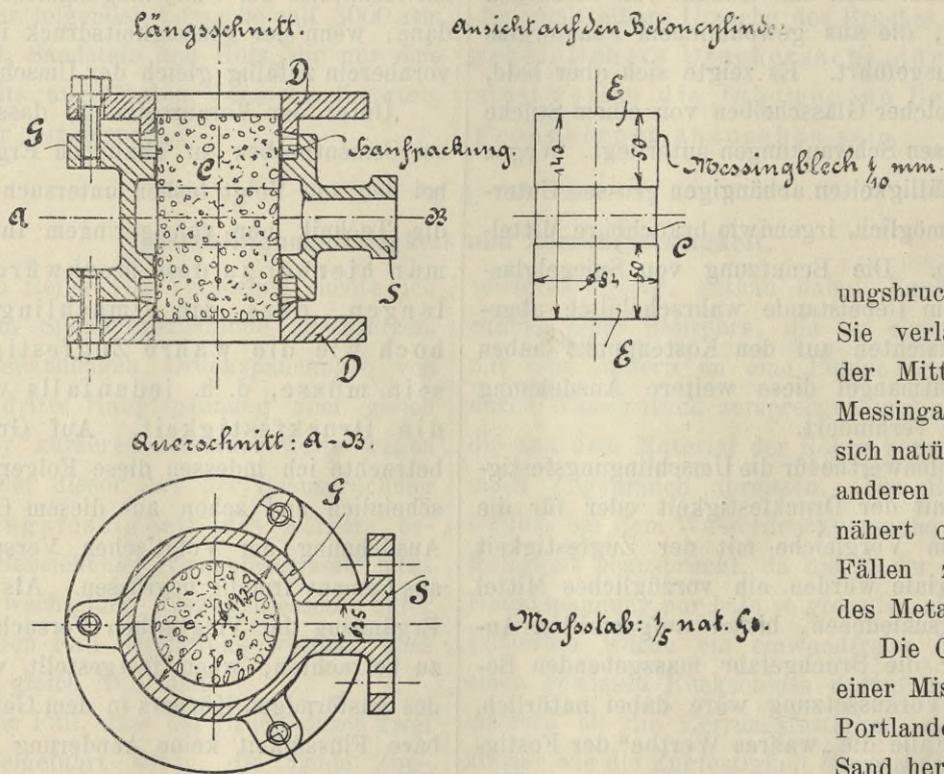
Zu Beginn eines Versuches wurde zunächst die Reibung in beiden Stopfbüchsen bestimmt durch Auflage einer Last auf den Cylinder, die diesen grade zum Verschieben brachte. Man zog natürlich, um die Reibung gering zu erhalten, die Schrauben an den Stopfbüchsen nur so viel an, als unbedingt nöthig war, um eine ausreichende Dichtung herbeizuführen. Die Reibung betrug dann gewöhnlich ungefähr 40 kg für beide Stopfbüchsen. In einem Falle war sie zuerst zu 13 kg gefunden; wegen zu grossen Wasserverlustes mussten aber die Schrauben etwas stärker angezogen werden, womit die Reibung auf 25 kg und nach späterem nochmaligem Anziehen auf 38 kg stieg; der grösste bei allen Versuchen beobachtete Betrag der Reibung stellte sich auf 45 kg. Gegenüber der Festigkeit des Cylinders spielte jedenfalls die Reibung keine besondere Rolle, denn auf eine Stopfbüchse würde nach diesen Beobachtungen eine Reibung von 20 kg oder höchstens 22,5 kg kommen, während der Querschnitt des Cementcylinders 54,1 qcm betrug.

Der Bruch des Cementcylinders erfolgt nach Einlassen des Druckwassers stets schon bei verhältnissmässig niedrigen Lasten, die aber sehr weit von einander abweichen. Die

Bruchfläche geht ungefähr parallel zu den Grundflächen, wie man es bei einem Umschlingungsversuche (aber auch bei einem Biegebrüche!) zu erwarten hat. Sie verläuft gewöhnlich in der Mitte zwischen beiden Messingarmierungen, wobei sie sich natürlich der einen oder anderen gelegentlich mehr nähert oder auch (unter 9 Fällen zweimal) innerhalb des Metallbandes.

Die Cylinder waren aus einer Mischung von 1 Theil Portlandcement und 3 Theilen Sand hergestellt und wurden im Alter von 9 bis 10 Tagen

geprüft. Bei 9 Versuchen betrug der Wasserdruck im Gefässe, der den Bruch des Cylinders herbeiführte: 11,0; 3,8; 12,0; 6,4; 15,0; 26,0; 7,0; 3,0; 2,0 atm. Diese Zahlen weichen so ausserordentlich stark von einander ab — ganz abgesehen davon, dass sie ganz unwahr-



Maßstab: 1/2 nat. Gr.

scheinlich niedrig sind —, dass man zu dem Schlusse geführt wird, dass jedenfalls andere Einflüsse als die eigentlich beabsichtigten den Anlass zum Bruche gaben. Wahrscheinlich wurden die Cylinder durch Verschiebungen der Hanfzöpfe in den Dichtungen in Verbindung zugleich mit den elastischen Formänderungen der Gefässwand unter der Einwirkung des Druckes auf Verbiegen beansprucht. In Wirklichkeit dürfte es sich daher gar nicht um eine Beanspruchung auf Umschlingungsfestigkeit, sondern — oder wenigstens in Verbindung mit ihr — um eine Beanspruchung auf Biegung gehandelt haben. Eine Ver-

besserung des Apparates, die hinreichte, um solche fremde Einflüsse auszuschliessen, scheint mir schwer möglich zu sein; man wendet sich vielmehr anstatt dessen besser der Voigt'schen Versuchsanordnung zu, falls man überhaupt an dem Flüssigkeitsdrucke zur Herbeiführung des gewünschten Spannungszustandes festhalten will. Dies ist aber natürlich nicht nöthig; ich werde vielmehr jetzt zur Beschreibung eines Apparates übergehen, den ich dazu konstruirt habe, den beabsichtigten Zweck auf andere Art zu erreichen.

§ 6.

Umschlingungsversuche mit dem Druckkreuze.

Eine der nächstliegenden und aussichtsreichsten Methoden zur Prüfung auf Umschlingungsfestigkeit ist jene, die dem gewöhnlichen Druckversuche nachgebildet ist. Anstatt einen Würfel zwischen zwei Platten zu zerdrücken, kann man ihn leicht auch zwischen vier Platten, die sämtlich gleich belastet sind, zum Bruche bringen. Bei den Kanten, an denen zwei Platten aneinander grenzen, muss man natürlich einen kleinen Spielraum — der übrigens 1 mm nicht zu übersteigen braucht, obschon er ohne Schaden auch doppelt so gross gewählt werden kann — frei lassen, damit zwei gegenüber liegende Druckplatten nicht durch die dazwischen liegenden abgestützt werden, so dass die Last gar nicht mehr auf das Probestück übertragen wird. Anfänglich lässt sich dies stets vermeiden. Sobald aber der Bruch des Probestückes begonnen hat, rücken die 4 Platten gegeneinander, stützen sich dann gegenseitig und machen so die weitere Fortführung des Versuchs unmöglich. Dies bezieht sich namentlich auf den Fall, dass der Bruch des Würfels auf einer der beiden freien Seiten oder ganz in deren Nähe beginnt. Sobald der Würfel an dieser Seite nachgibt, stellen sich die Druckplatten etwas schief und fangen sich dann gegenseitig ab, so dass ein Zerdrücken der bis dahin noch gesund gebliebenen andern Würfelseite durch eine unmittelbare Fortsetzung des Versuches nicht mehr möglich ist. Im Uebrigen ist dies aber nur ein geringer Nachtheil, da es ohnehin nur darauf ankommt, den Beginn des Bruches festzustellen.

Man kann sich natürlich sehr verschiedenartiger mechanischer Hilfsmittel bedienen, um vier Druckplatten, die man auf 4 sich aneinander schliessende Würfelseiten gesetzt hat, mit gleich grosser Kraft auf den Würfel zu pressen. Am bequemsten ist es aber, die Einrichtung so zu treffen, dass nur eine einzige Last an der Festigkeitsmaschine abgelesen zu werden braucht. Durch eine geeignete Stangenverbindung muss dann dafür gesorgt werden, dass diese Last gleich grosse Druckkräfte auf die 4

Druckplatten hervorruft. Zu diesem Zwecke habe ich die als Druckkreuz bezeichnete, auf Tafel I im Massstabe 1:5 dargestellte Vorrichtung herstellen lassen. Zur besseren Erläuterung ihrer Wirkungsweise möge noch die in der beistehenden Textabbildung 2 gegebene Skizze

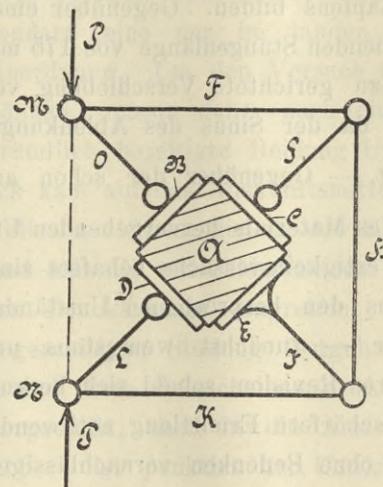


Abb. 2.

dienen. Man kann die ganze Vorrichtung als ein statisch bestimmtes Fachwerk auffassen. Der Probestück A, der in die Mitte des Druckkreuzes eingesetzt wird, bildet mit den während des Versuches unverschieblich an ihm liegenden vier Druckplatten B C D E und der mit der Platte E aus einem Stücke hergestellten Stange J eine Scheibe. An diese Scheibe sind die freien Knotenpunkte durch Vermittelung von Gelenken, die in der Skizze durch kleine Kreise angedeutet sind, zweistäbig angeschlossen. Die Kräftezerlegung ist sehr einfach und lehrt, dass auf jede Druckplatte die Kraft $P\sqrt{2}$ übertragen wird, wenn die Knotenpunkte M und N in der Festigkeitsmaschine mit einer Kraft P gegeneinander gedrückt werden.

Hierbei ist zunächst eine genaue Centrirung des Probestücks vor dem Versuche vorausgesetzt, so dass die Mittellinien der 4 Druckstangen genau Winkel von 45° mit den Richtungen der auf Zug beanspruchten Umfangsstäbe bilden. Geringe Abweichungen von dieser genauen Einstellung sind zwar unvermeidlich und ferner werden die Stangenrichtungen auch während des Versuches etwas geändert, da sich die Knotenpunkte M und N unter dem Einflusse der Last etwas (gewöhnlich um etwa 2 bis 3 mm) einander nähern. Die hierdurch bedingten Richtungs-

abweichungen haben dann auch zur Folge, dass der Druck nicht mehr genau senkrecht zur zugehörigen Würfelfläche steht. Im Uebrigen sind die hierdurch hervorgebrachten Fehler aber nur von geringem Betrage.

Auch die Reibungen in den Gelenken, die ebenfalls noch nicht berücksichtigt wurden, machen nur wenig aus. Die drei Gelenke zwischen den Druckplatten *BCD* der Skizze und den zugehörigen Druckstäben *OG L* sind als Kugelgelenke ausgebildet und zwar so, dass der in die Druckplatte eingearbeitete Hohlkugelabschnitt von etwas grösserem Durchmesser ist, als der sich dagegen stützende Vollkugelabschnitt am Ende der Druckstange. Die vier Umfangsgelenke sind durch sauber bearbeitete und in guter Schmierung gehaltene Gelenkbolzen von 5 cm Durchmesser verwirklicht. Rechnet man den Zapfenreibungskoeffizienten selbst gleich 0,10, so ist der Halbmesser des Reibungskreises der Zapfen immerhin erst gleich 2,5 mm zu setzen. Die Richtungslinie der von einer Druckstange übertragenen Kraft wird eine Tangente an den Reibungskreis des Zapfens bilden. Gegenüber einer hierbei in Betracht kommenden Stangenlänge von 175 mm macht aber die quer dazu gerichtete Verschiebung von 2,5 mm nicht viel aus, da der Sinus des Ablenkungswinkels nur gleich $\frac{1}{70}$ ist. — Gegenüber der schon aus der Ungleichmässigkeit des Materials hervorgehenden Unsicherheit, mit der alle Festigkeitsversuche behaftet sind, kann man daher die aus den besprochenen Umständen hervorgegangenen Fehler — zunächst wenigstens und vorbehaltlich einer späteren Revision, sobald sich herausstellen sollte, dass eine schärfere Ermittlung nothwendig und von Werth wäre — ohne Bedenken vernachlässigen.

Aus Abb. 1 auf Tafel I erkennt man, dass die beiden Druckköpfe *M* und *N* noch mit einem Stängelchen *S* verbunden sind, das durch eine Mutter mit Links- und Rechtsgewinde nach Belieben verlängert oder verkürzt werden kann. Bei der Ausführung des Versuchs kommt diese schwache Stange nicht in Thätigkeit; sie dient nur dazu, beim Einsetzen des Probestücks den ganzen Apparat zusammen zu halten und die Stangen von vornherein ein wenig zu verspannen. Sobald der Apparat unter Druck gesetzt wird, kommt die Stange *S* ausser Spannung, da sie mit länglichen Löchern an die Bolzen angeschlossen ist. Sie könnte dann ebensogut abgenommen werden. Man lässt sie aber an dem Apparate hängen, weil sie auch beim Auseinandernehmen des Apparats nach Beendigung des Versuchs bequem verwendet werden kann. Zu diesem Zwecke werden die länglichen Löcher an beiden Enden mit Holzstückchen, die hinein passen, ausgefüllt und man kann dann die Druckköpfe *M* und *N* durch Drehen an der Mutter von *S* so weit auseinander

treiben als nöthig ist, um die zwei oberen Druckplatten herausnehmen zu können und dadurch das Probestück frei zu machen.

Die Abmessungen des Druckkreuzes sind so gewählt, dass man einen Cementwürfel von der üblichen Grösse (7,1 cm Kantenlänge) ohne Weiteres auf Umschlingungsfestigkeit darin prüfen kann. Die zulässige und auch schon mehrfach ausgeübte Belastung der Druckköpfe ist auf etwas über 21 t bemessen, so dass in den Stangen ein Druck von 30 t übertragen werden kann. Das Material aller Theile ist Stahl; die Druckplatten und die kugelförmigen Enden der Stangen sind gehärtet.

Will man einen Steinwürfel von kleinerer Kantenlänge in dem Druckkreuze prüfen, so legt man auf allen vier Seiten Stahlplatten von entsprechenden Abmessungen bei. Auch dies ist schon wiederholt geschehen; die Mehrzahl der bisher ausgeführten Versuche erstreckt sich aber nur auf Cementwürfel.

Zerdrückt man einen Cementwürfel im Druckkreuze ohne weitere Vorbereitungen, so wird die Umschlingungsfestigkeit $1\frac{3}{4}$ - bis fast 2-fach so hoch gefunden, als die auf gewöhnliche Art ermittelte Druckfestigkeit. Der Bruch beginnt in der Regel damit, dass sich an einer der beiden freien Würfelseiten eine dünne Platte ablöst, die nach innen zu ziemlich unregelmässig begrenzt ist, gewöhnlich aber nach den Rändern hin scharf ausläuft. Das Quadrat, das vorher eine Würfelfläche bildete, ist noch ohne Beschädigung an der Platte vorhanden. Sobald der Bruch diesen Anfang genommen hat, stellen sich die Druckplatten (durch Drehung um die Kugelgelenke) etwas schief. Es folgt dann, ohne dass eine weitere Laststeigerung nöthig wäre, durch Zerbröckelung die allmählich weiter nach Innen zu von der Plattenbruchfläche aus fortschreitende Zerstörung. Zuweilen kommt es auch vor, dass rasch hintereinander an beiden freien Würfelseiten Platten, wie die vorher beschriebene, ausbrechen. Von einer der beiden setzt sich dann die Zerstörung weiter ins Innere hinein fort. Sehr weit treiben lässt sich indessen diese Zertrümmerung nicht, weil alsbald die Druckplatten in Berührung mit einander kommen, sich gegeneinander abstützen und damit die Fortsetzung des Versuches verhindern.

Das erwähnte Zahlenverhältniss $1\frac{3}{4}$ bis fast zu 2 zwischen Umschlingungs- und Druckfestigkeit würde dafür sprechen, dass Druck in einer Querrichtung die Festigkeit gegen Druck in der zuerst angenommenen Richtung wesentlich erhöht. Insoweit es sich nur um die Erhöhung handelt, könnte man das Resultat als eine Bestätigung der üblichen Annahme deuten; andererseits ist aber das Verhältniss dem Zahlenwerthe nach weit grösser, als man nach dieser Annahme erwarten könnte. — Man kann

indessen in diesem Ergebnisse nur eine Bestätigung für die von vornherein gehegte Vermuthung erblicken, dass sich der Einfluss der Reibungen beim Kraftangriffe auf 4 Würfelseiten noch weit mehr bemerklich machen müsse, als bei einem gewöhnlichen Druckversuche. Ueber das Verhältniss der wahren Werthe von Umschlingungs- und Druckfestigkeit erfährt man bei einem solchen Versuche gar nichts. Ich musste daher, um weiter zu kommen,

§ 7.

Die Schmierung der Druckflächen.

Bei der Wahl der Schmiere ist zu beachten, dass diese zäh genug sein muss, um unter dem hohen Drucke nicht völlig seitlich verdrängt zu werden. Aus diesem Grunde eignet sich z. B. Talg nicht. Schon lange bevor der Bruch eines Cementwürfels eintritt, der auf Umschlingungs- oder Druckfestigkeit geprüft werden soll, wird die Talgschmiere fast vollständig aus den Druckfugen ausgetrieben. Der Probewürfel gelangt dann doch wieder, zum mindesten an einzelnen Stellen, in unmittelbare Berührung mit der Druckplatte. Die Reibung kann an diesen Berührungsstellen von Neuem auftreten und die Wirkung der Schmierung wird dadurch, wenn auch vielleicht nicht ganz, so doch zum Theile vereitelt.

Andererseits soll die Schmiere auch nicht zäher sein, als nöthig ist, um das gänzliche Heraustreiben zu verhüten. Bei der Prüfung von Cementwürfeln hat sich eine Mischung von 75 Theilen Stearin mit 25 Theilen Talg gut bewährt. Wenn höhere Lasten zum Bruche erforderlich sind, nimmt man besser reines Stearin oder auch Wachs. Beim Zerdrücken von Cementwürfeln fliesst reines Stearin fast gar nicht seitlich aus, während die angegebene Stearin-Talg-Mischung zwar zum Theile ausgetrieben wird, aber so, dass immer noch jede unmittelbare Berührung zwischen dem Probewürfel und den Druckplatten vermieden wird.

Die Schmierschicht wird in erwärmtem, also flüssigem Zustande mit Hülfe eines Pinsels aufgetragen. Die Dicke beträgt bei Steinwürfeln $\frac{1}{2}$ bis 1 mm, bei Cementwürfeln nicht leicht unter 1 mm, weil hier jedenfalls vermieden werden muss, dass einzelne Sandkörner, die etwas vortreten, in direkte Berührung mit den Druckplatten kommen. Bei Flächen von Hartsteinen, die mit der Diamantsäge geschnitten oder sonst glatt bearbeitet sind, genügt eine geringere Dicke der Schmierschicht. Nach dem Erstarren der Masse wird die Oberfläche der Schicht durch vorsichtiges Schleifen auf einer etwas erwärmten Platte gut geebnet.

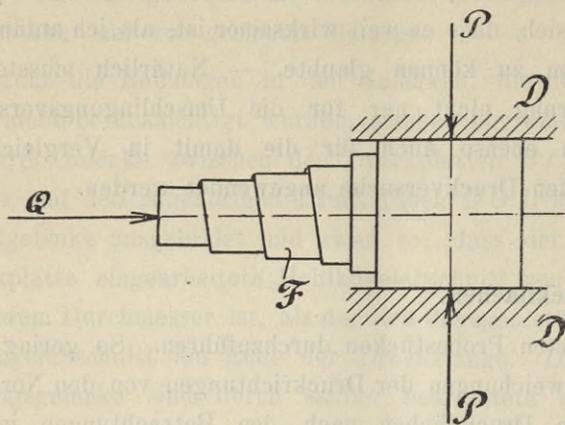
Dass die Schmierung sehr wirksam ist, zeigte sich sofort daran, dass es anfänglich gar nicht gelingen wollte, einen Umschlingungsversuch im Druckkreuze mit ge-

auf ein Mittel sinnen, die Reibungen nach Möglichkeit zu vermindern. Das nächstliegende Mittel war eine Schmierung der Druckflächen und sofort als ich es versucht hatte, zeigte sich, dass es weit wirksamer ist, als ich anfänglich erwarten zu können glaubte. — Natürlich musste die Schmierung nicht nur für die Umschlingungsversuche, sondern ebenso auch für die damit in Vergleich zu stellenden Druckversuche angewendet werden.

schmierten Probestücken durchzuführen. So gering auch die Abweichungen der Druckrichtungen von den Normalen zu den Druckflächen nach den Betrachtungen in § 6 selbst im äussersten Falle nur zu werden vermögen, so genügten sie doch, ein langsames Abgleiten der Druckplatten längs der Schmierschicht herbeizuführen. Ohne jede Reibung zwischen Druckplatten und Probewürfel stellt eben die in Abb. 2 skizzirte Stangenverbindung kein statisch bestimmtes, stabiles Fachwerk mehr dar, sondern eine nur im labilen Gleichgewichte stehende Anordnung. Um den Versuch überhaupt durchführen zu können, musste daher nach einem Ersatze für die allzu gründlich beseitigte Reibung Umschau gehalten werden. Ich kam auf das Auskunftsmitel, zwei Holzscheiben herstellen zu lassen, die an den Ecken mit Nasen versehen sind und die von beiden Seiten her zwischen die Stangen des Druckkreuzes eingreifen, wodurch diese in ihrer gegenseitigen Stellung festgehalten werden. Auf Tafel I sind diese Holzscheiben in Abb. 5 und 6 im Masstabe dargestellt; auch in die Ansicht des Druckkreuzes in Abb. 1 ist punktirt der Umriss der Holzscheiben *H* so eingetragen, wie sie angelegt werden. — Im Vergleiche zu den grossen Lasten, die bei den Versuchen ins Spiel kommen, machen die Kräfte, die von diesen schwachen Holzscheiben ohne Beschädigung übertragen werden können, nur wenig aus; sie genügten aber, um in Verbindung mit der trotz der Schmierung in den Druckflächen immerhin noch auftretenden Reibung die an sich unbedeutenden Tangential-Componenten der von den Stangen übertragenen Druckkräfte aufzuheben, wodurch die Ausführung des Versuches ermöglicht wurde.

Wie gering die Reibung unter den vorliegenden Umständen ausfällt, habe ich auch noch durch einen besonderen Versuch festgestellt, dessen Einrichtung aus der nachstehenden Textfigur, Abb. 3, ohne Weiteres hervorgeht. Ein Steinwürfel wurde an zwei gegenüberliegenden Flächen mit der Stearin-Talg-Mischung 75:25 geschmiert und zwischen die Druckplatten *D* einer Festigkeitsmaschine gebracht. Nachdem ein gewisser Druck *P* erreicht war, erhielt man ihn längere Zeit auf dieser Höhe

und versuchte während dessen, den Würfel zwischen den beiden Druckplatten durch eine seitlich angebrachte Kraft



Q zu verschieben. Die Grösse der Kraft, die erforderlich war, um diese Verschiebung herbeizuführen wurde durch ein dazwischen geschaltetes Feder-Dynamometer F gemessen.

Die Druckfläche war nahezu ein Quadrat, nämlich ein Rechteck von 7,0 und 7,1 cm Seite oder rund 50 qcm Inhalt. Bei einem Drucke von 6830 kg trat ein starkes Ausfliessen der Schmiere ein; für diesen Augenblick wurde die zur Verschiebung erforderliche Kraft besonders gemessen, im Uebrigen für die regelmässig aufeinander folgenden Lasten von 2000, 4000 u. s. f. bis 100000 kg. Für jeden dieser Versuche wurde natürlich die Schmier-schicht von Neuem aufgetragen. — Man legte einen Zirkel an, um den Abstand der Würfelkante von der Kante der Druckplatte zu messen. Zuerst, wenn die seitliche Kraft aufgebracht wurde, veränderte sich dieser Abstand gar nicht. Sobald aber die Kraft die nöthige Grösse erreicht hatte, trat ein plötzliches Verschieben des Würfels ein, das sich sofort (wegen des Nachschubs der Feder) auf eine längere Strecke, die sich wenigstens auf 2 bis 3 mm bezifferte, gelegentlich aber auch noch weit grösser war, fortsetzte. Die Resultate der Versuche sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1.

Belastung der Druckflächen		Für Verschiebung erforderliche Kraft kg	Reibung an einer Druckfläche kg	Reibungs-Coefficient	Bemerkungen
im Ganzen	in atm.				
2000	40	160	80	0,04	Vor dem Ausfliessen der Schmiere an den Rändern.
4000	80	210	105	0,026	
6000	120	250	125	0,021	
6830	136,6	200	100	0,0146	Schmiere kommt ins Fliessen.
8000	160	210	105	0,0131	Schmiere fliesst noch nach.
10000	200	250	125	0,0125	

Abgesehen von den an sich sehr niedrigen Werthen fällt namentlich der Umstand auf, dass die Reibung weit langsamer anwächst, als die

Lasten, während man gewöhnlich beide proportional mit einander annimmt. Dieses Resultat, das wohl auch noch anderweitig von Nutzen werden kann, steht übrigens in naher Uebereinstimmung mit den Ergebnissen von Reibungsversuchen, die von Herrn Dettmar vor Kurzem in der Elektrotechnischen Zeitschrift 1899, Heft 22, S. 380 veröffentlicht wurden. Für Zapfen mit Oelschmierung stellte Herr Dettmar, in enger Uebereinstimmung übrigens mit den älteren Versuchen von Tower, drei Reibungsgesetze auf, von denen das zweite lautet:

„Bei constanter Lagertemperatur und Wellengeschwindigkeit ist der Reibungs-Coefficient umgekehrt proportional dem specifischen Lagerdrucke und somit die Reibungsarbeit unabhängig vom Drucke, sofern dieser 30—44 atm nicht überschreitet!“

Die Unabhängigkeit der Reibung vom Drucke ist nun zwar bei den von mir angestellten Versuchen, die sich auf wesentlich andere Verhältnisse beziehen, nicht genau erfüllt; immerhin sind aber die Abweichungen nicht sehr erheblich und für einen ersten Ueberschlag kommt man jedenfalls der Wahrheit näher, wenn man auch unter den hier vorliegenden Umständen die Reibung als unabhängig vom Drucke betrachtet, als wenn man sie diesem, wie es gewöhnlich geschieht, proportional setzt. Es zeigt sich hier von Neuem, auf wie unsicherer Grundlage die Lehre von der Reibung heute noch beruht.

Ich möchte übrigens noch darauf hinweisen, dass diese Versuchsergebnisse weniger befremden, wenn man bedenkt, dass das unter hohem Drucke stehende Schmiermittel sich ähnlich wie eine zähe Flüssigkeit verhält. Die Reibung würde daher mit einer gewissen Annäherung auf eine blosse Flüssigkeitsreibung zurückzuführen sein; dass aber die Flüssigkeitsreibung unabhängig vom Drucke ist, hat man längst gewusst oder wenigstens längst angenommen. Sehr stark ist dagegen die Flüssigkeitsreibung von der Geschwindigkeit abhängig und die niedrigen Beträge der Reibung, auf die ich gelangte, würden dann damit zu erklären sein, dass die Verschiebung längs der Schmier-schicht nur mit geringer Geschwindigkeit erfolgte. — Ganz reicht natürlich diese Auffassung zur Erklärung des Vorgangs nicht aus, weil schon die kleinste Kraft genügen müsste, um eine Verschiebung mit sehr geringer Geschwindigkeit herbeizuführen, wenn sich die Schmier-schicht wirklich genau so verhielte, wie man es von einer zähen Flüssigkeit voraussetzt.

Nach den hier mitgetheilten Erfahrungen darf man schliessen, dass bei einem Druck- oder Umschlingungsversuche mit geschmierten Druckflächen Reibungen nur von so geringem Betrage auftreten können, dass ihr Einfluss auf das Resultat des Festigkeitsversuchs voraussichtlich ganz unmerklich wird. Dagegen entsteht die Frage, ob

oder vielmehr bis zu welchem Betrage eine ungleichförmige Vertheilung des Druckes über die Druckfläche grade durch das im Fliessen begriffene Schmiermittel hervorgebracht wird. Wenn nämlich das Schmiermittel von der Mitte der Druckfläche aus nach den Rändern der Druckfläche abfliessen soll, so kann dies nur unter dem Einflusse eines Druckgefälles geschehen. Man muss also erwarten, dass der Druck in der Mitte der Druckfläche grösser ist, als nach den Rändern hin. Hiermit steht es offenbar im Zusammenhange, dass bei den Umschlingungsversuchen, falls der Bruch nur durch eine einzige Bruchfläche hervorgebracht wird, diese gewöhnlich ziemlich genau durch die Mitte des Würfels geht. Andererseits brechen aber die meisten Probewürfel durch gleichzeitig auftretende Bruchflächen sofort in mehrere Platten auseinander und hieraus ist zu schliessen, dass das Druckgefäll (abgesehen von der unmittelbaren Nähe der Ränder) nicht sehr erheblich sein kann.

Auf Grund dieser Erwägungen scheint es daher, dass man durch Verwendung geschmierter Druckflächen den beabsichtigten Spannungszustand mit befriedigender Gleichförmigkeit im ganzen Probekörper verwirklichen kann. Zugleich ist aber noch ein anderes Bedenken in Erwägung zu ziehen, das ernst genug ist, um volle Aufmerksamkeit zu beanspruchen. Schon längst hat man nämlich beobachtet, dass die Druckfestigkeit eines Steinwürfels ganz bedeutend niedriger gefunden wird, wenn man zwischen die Druckflächen des Probestücks und die Druckplatten der Maschine Beilagen aus Blei u. dgl. einschleibt.*) Man erklärt diese Erscheinung gewöhnlich durch das Einpressen des Bleis in die Poren des Probestücks und ein dadurch herbeigeführtes Auseinandersprengen des Steins.

Natürlich steht derselbe Erklärungsversuch von vornherein auch in unserem Falle offen. Sollte er aber für den Druckversuch zutreffen, so müsste er ebenso auch für den Umschlingungsversuch seine Gültigkeit behalten.

Ueberlegen wir uns daher noch etwas genauer, wie man sich das Auseinandersprengen des Steins nach der üblichen Erklärung zu denken hat. Da die Betrachtung am einfachsten wird für den Umschlingungsversuch, so möge dieser von vornherein zu Grunde gelegt werden. Stellt man sich vor, dass der Steinwürfel längs seiner Mittel-Ebene (nämlich jener Ebene, die mit der Ebene des Druckkreuzes zusammenfällt) von einem ringsum laufenden Einschnitt von der Tiefe t umgeben sei, so ist klar, dass die in diese Rinne eintretende Schmiere eine Entfernung der beiden an der Rinne zusammentreffenden Würfelhälften zu bewirken sucht. Der Würfel wird durch diese Kraft auf Zug beansprucht. Die Grösse der Kraft ist gleich $4 t a p$, wovon a die Würfelseite und p den Druck des Schmiermittels bedeutet, falls die Tiefe t der

Rinne als klein gegenüber a angesehen wird. Die im Bruchquerschnitt durchschnittlich hervorgerufene Zugspannung stellt sich hiernach auf $p \frac{4t}{a}$, hängt also ganz von der Tiefe des Einschnittes ab. Wenn sich nachweisen liesse, dass die Schmiere von vornherein in beträchtliche Tiefen eindringe, würde damit die Sprengwirkungstheorie wahrscheinlich gemacht werden. Uebrigens darf man auch nicht übersehen, dass sich die durch den Flüssigkeitsdruck der Schmiere in der Rinne in der Mittel-Ebene des Würfels hervorgerufenen Zugspannungen keineswegs gleichmässig über diesen Querschnitt vertheilen, sondern am Rande des Querschnitts, also am Boden des Einschnitts, am grössten sind. Die Grösse wird an dieser Stelle wesentlich durch die Form des Einschnitts bedingt sein. Es lässt sich daher von vornherein nicht abstreiten, dass der Bruch auf diese Art zunächst wenigstens einmal eingeleitet werden könnte, worauf durch das Nachdrängen der Schmiere und Vergrösserung der Tiefe t des durch Flüssigkeitsdruck auseinandergetriebenen Einschnitts die Ausbreitung des Bruches über die ganze Mittel-Ebene herbeigeführt werden könnte.

Denkt man sich gleichzeitig mehrere Einschnitte parallel zur Mittel-Ebene rings um den Würfel geführt, so wird in jedem zu einer solchen Rinne gehörigen Würfelquerschnitte dieselbe Zugspannung auftreten, als wenn diese Rinne allein vorhanden wäre. Die Beanspruchung des Materials würde daher durch die Zahl der Vertiefungen jedenfalls nicht vermehrt und der Bruch durch Auseinandersprengen würde im schwächsten Querschnitte, dessen Lage durch Zufall bedingt ist, eintreten.

Bei der Schätzung der in Aussicht zu nehmenden Einschnitttiefe t ist übrigens die Hälfte der Schmierschichtdicke mit einzurechnen. Dadurch wird dann zugleich der Reibung Rechnung getragen, mit der das Schmiermittel an der Oberfläche den Würfel nach den Rändern hin fortzubewegen sucht. Dass diese Reibung nur gering ist, folgte freilich schon aus dem zuvor beschriebenen direkten Versuche; es geht aber auch aus dem Ausdrucke $4 t a p$ hervor, wenn darin t gleich der halben Schmierschichtdicke (natürlich im Augenblicke des Bruches, nicht vor dem Versuche gemessen!) gesetzt wird. — Vielleicht ist es gut, wenn ich zur Erläuterung dieses Ansatzes noch eine Bemerkung beifüge. Man denke sich nämlich einen Streifen der Schmierschicht, der von der Mittel-Ebene des Würfels bis zum Rande reichen möge, von der Länge $\frac{a}{2}$, von der Dicke s und von der Breite b . Am inneren Ende wirkt der Flüssigkeitsdruck p auf den Querschnitt $b s$, am äusseren Ende herrscht der Druck Null. Die Schmierschicht ist nur in langsamem Fliessen begriffen, jedenfalls

*) Siehe besonders Heft 1 und 18 dieser Mittheilungen.

ist ihre Beschleunigung äusserst gering und die an ihr wirkenden Kräfte müssen daher (nahezu) im Gleichgewichte sein. Dem Drucke $p b s$ halten die Reibungen einerseits an der Druckplatte, andererseits am Probewürfel Gleichgewicht. Für die Reibung am Probewürfel hat man daher $\frac{1}{2} p b s$, oder wenn man $b = 4 a$ setzt, um den ganzen Umfang zu berücksichtigen, $2 a p s$. Dies stimmt in der That mit $4 t a p$ überein, sobald man für t die halbe Schmierschichtdicke $\frac{1}{2} s$ einführt. Selbst wenn gar keine Vertiefungen an der Oberfläche vorhanden sein sollten, bliebe dennoch eine auseinandertreibende Kraft von dieser Grösse übrig. Freilich stellt diese keine Sprengwirkung im eigentlichen Sinne des Wortes mehr dar, sondern eine Reibung; da sie sich sonst aber gerade so äussert, wie eine Sprengwirkung und sich dieser zugesellt, rechnet man sie am besten von vornherein mit ein.

Aus dem Aussehen der Bruchfugen und überhaupt aus dem äusseren Anscheine lässt sich übrigens keine Stütze für die Erklärung des Bruches durch eine Sprengwirkung ableiten. Man bemerkt zwar, dass an den Rändern der Bruchfugen eine gewisse Menge des Schmiermittels eingedrungen ist; dieses hängt aber nur oberflächlich an, so dass es sich mit dem Finger leicht abheben lässt. Die abgehobene Schicht hängt in sich gut zusammen und klebt kaum an dem Stein. Man kann daher nicht im Zweifel sein, dass sie erst nach dem vollständigen

Aufklaffen des Bruchs in die ihr gebotene Oeffnung eingedrungen ist. Damit hängt auch zusammen, dass man im Augenblicke des Bruches ein geringes, stossweises Zusammenrücken der Druckplatten wahrnehmen kann, das durch den Abfluss des Schmiermittels aus den Druckflächen in die ihm gebotenen Oeffnungen ermöglicht wird.

Vor Allem scheint mir aber der ganze Verlauf des Bruchvorgangs, namentlich bei den Umschlingungsversuchen keineswegs für eine Sprengwirkung des in die Poren eingedrungenen Schmiermittels zu sprechen. Mir will es wenigstens scheinen, dass von einer solchen Sprengwirkung zunächst das Auftreten von oberflächlichen und unregelmässig vertheilten Rissen zu erwarten wäre, während der Würfel in Wirklichkeit ganz plötzlich in mehrere vollständig von einander getrennte und meistens recht regelmässig gestaltete parallele Platten auseinanderbricht.

Indessen will ich nicht in Abrede stellen, dass sich die Erklärung vielleicht doch noch aufrecht erhalten lässt, wenn erst noch weitere Erfahrungen vorliegen. Ich möchte es daher einstweilen noch dahin gestellt sein lassen, ob durch Versuche mit geschmierten Druckflächen wirklich der wahre Werth der Druck- und der Umschlingungsfestigkeit gefunden wird. Nur darüber will ich keinen Zweifel lassen, dass ich selbst die Erklärung der Versuche durch die Sprengwirkung auf Grund der Gesammtheit meiner Erfahrungen bei diesen Versuchen für unwahrscheinlich halte.*)

§ 8.

Druckversuche mit Kupfer-Cylindern.

Ich hielt es für geboten, die Wirkung einer Schmierung der Druckflächen auch einmal bei einem Druckversuche mit einem stark dehnbaren Metalle zu erproben. Hier ist der Einfluss der Schmierung zwar erheblich geringer als bei steinartigen Massen, immerhin aber noch deutlich erkennbar. Als Probekörper verwendete ich 4 Cylinder, die aus derselben Walzkupferstange geschnitten waren und vor dem Versuche abgedreht und sauber bearbeitet wurden. Nach der Reihenfolge, in der die Cylinder in der Stange aufeinanderfolgten, erhielten sie die Nummern 7 bis 10; die vorausgehenden Nummern waren vorher zu anderen Versuchen verwendet worden. Die Cylinder 7 und 9 wurden mit ungeschmierten, die abwechselnd mit diesen liegenden 8 und 10 mit geschmierten Druckflächen dem Druckversuche unterworfen. Zur Schmierung diente bei Cylinder 8 Wachs, bei Cylinder 10 reines Stearin, das in möglichst dünner Schicht aufgebracht wurde. Höhe und Durchmesser der Cylinder waren gleich und betragen in allen Fällen 40 mm.

Ein solcher Kupfer-Cylinder nimmt bei einem gewöhnlichen Druckversuche bekanntlich eine ausgesprochen fassförmige Gestalt an. Dies zeigte sich auch hier und geht aus der Zeichnung auf Tafel III Abb. 3 hervor, in der die Cylinder 7 und 9 nach einem bis auf 60 t gesteigerten Drucke dargestellt sind. Die genaueren Masse lasse ich nachher für alle Cylinder in Form einer Tabelle folgen. -- Dass die Ausbauchung der Cylinder bei einem solchen Versuche ganz wesentlich auf die Reibung an den Druckflächen zurückzuführen ist, war wohl niemals zweifelhaft. Es handelte sich nun darum, festzustellen, ob die Ausbauchung durch die Schmierung verhindert oder doch wesentlich verringert werden könne.

Auch die Gestalt der mit geschmierten Druckflächen geprüften Cylinder nach Ausübung des gleichen Druckes von 60 t ist in Abb. 4 auf der Tafel dargestellt. Man sieht, dass die Ausbauchung in der That erheblich vermindert, aber nicht ganz beseitigt wurde. Es scheint jedoch, dass die auch in diesem Falle noch zu Stande

*) Vergl. hierzu den Nachtrag zu dieser Abhandlung.

kommende Ausbauchung nur auf eine unvermeidliche — oder wenigstens bei den vorgenommenen Versuchen nicht vermiedene — Unvollkommenheit der Versuchseinrichtung zurückzuführen ist. Sobald nämlich das Stauchen beginnt und das Material sich nach den Seiten hin ausbreitet, schiebt es an den Rändern der beiden Grundflächen die dort noch haftende Schmiere vor sich her und kommt dadurch an diesen Stellen in unmittelbare metallische Berührung mit den Druckplatten. In der That findet man nach Beendigung des Druckversuchs, dass in der Mitte der Druckflächen noch eine dünne (0,1 bis 0,2 mm dicke) Schmierschicht anhaftet, während der äussere Rand durch einen rein metallisch glänzenden Ring gebildet wird, so dass kein Zweifel darüber bestehen kann, dass hier eine unmittelbare Berührung zwischen Kupfer und Druckplatte stattfand. In den späteren Stadien des Druckversuchs ist daher die dünne Schmierschicht im Innern der Druckfläche durch den äusseren Rand völlig eingeschlossen; dieser selbst dagegen liegt ohne Schmierung an der Druckplatte an, so dass hier doch wieder Reibung auftreten kann. Die Reibung kann daher bei Versuchen mit solchen Materialien durch die Schmierung nicht in der gewünschten Weise ausgeschlossen werden und auch die Druckvertheilung über die Druckfläche wird bei dieser Versuchsbedingung in nicht genau zu übersehender Weise geändert. Hierauf ist bei der Beurtheilung der weiter folgenden Versuchsergebnisse wohl zu achten. — Leider ist mir kein Mittel eingefallen, durch das man dem beschriebenen Vorgange, der die Ergebnisse des Druckversuchs in so unerwünschter Weise beeinflusst, wirksam begegnen könnte.

Nach Laststufen von je 5 t wurden die Höhen der Kupfercylinder, ohne diese aus der Maschine herauszunehmen oder die Belastung abzustellen, mit einfachen Vorrichtungen gemessen. Die geringen elastischen Verkürzungen, die den betreffenden Lasten entsprechen, sind daher in den Messungsergebnissen mit eingeschlossen. Bei der Prüfung der nicht geschmierten Cylinder erfolgte die Höhenmessung durch Abgreifen des Abstandes zwischen den Druckplatten an zwei gegenüber liegenden Seiten. Bei den geschmierten Cylindern war diese Art der Messung nicht zulässig, weil sich der Abstand der Druckplatten auch durch das Auspressen der Schmiere aus den Druckfugen verringerte. Ich liess daher bei diesen Cylindern auf der Drehbank acht Kreise einreissen, die in den Abb. 2 und 4 auf Tafel III mit arabischen Ziffern nummerirt sind. Die äussersten Kreise 1 und 8 waren in 2,5 mm Entfernung von der Kante gezogen, während die übrigen je 5 mm Abstand von einander hatten. Während des Druckversuchs wurde dann jedesmal der ursprünglich 35 mm betragende Abstand der Kreise 1 und 8 an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen mit Hilfe eines Zirkels gemessen. Die Höhe des ganzen Cylinders wurde

daraus durch Multiplikation mit dem Verhältnisse 40 : 35 berechnet. Freilich ist dies nicht ganz genau, weil sich die den Grundflächen benachbarten Schichten, wie man noch sehen wird, mehr verkürzten, als die übrigen. Es lag indessen nicht in meiner Absicht, bei diesen Versuchen die grösste, erreichbare Genauigkeit anzustreben, sondern ich wollte nur mit den einfachsten Mitteln und mit möglichst geringem Zeit- und Arbeitsaufwande zur ungefähren Orientirung die Erscheinungen mehr qualitativ als quantitativ verfolgen.

Der Zusammenhang zwischen der Verkürzung des Cylinders und der Belastung wird durch die in Abb. 1 auf Tafel III dargestellten vier Linienzüge, die in dasselbe Coordinaten-System eingetragen und mit den Nummern der Probecylinder versehen sind, angegeben. Die Abscissen geben die Verkürzungen der Cylinder-Höhe in zwanzigfacher Vergrösserung, die Ordinaten die zugehörigen Lasten im Massstabe 1 mm = 200 kg an. Es scheint, dass die Höhenmessungen im Falle der ungeschmierten Cylinder, die mit einem Taster vorgenommen wurden, etwas genauer sind, als die bei den geschmierten Cylindern. Im letzten Falle ist die Genauigkeit wahrscheinlich nicht höher als etwa 0,2 mm zu schätzen, und ich vermute, dass die anfänglichen Abweichungen der Linienzüge im Wesentlichen auf Beobachtungsfehler zurückzuführen sind. — Dieser Umstand erschwert auch einen Vergleich der Stauchgrenze für den Fall geschmierter und nicht geschmierter Druckflächen. Immerhin scheint es, dass die Stauchgrenze bei geschmierten Druckflächen niedriger ist, als im andern Falle.

Die vorgenommenen Messungen, die sämmtlich von Herrn Assistent Prandtl ausgeführt wurden, stelle ich noch in den folgenden Tabellen zusammen.

Tabelle 2.

Verkürzung der vier Kupfer-Cylinder in mm.
(Nr. 7 und Nr. 9 ungeschmiert, Nr. 8 mit Wachs, Nr. 10 mit Stearin geschmiert.)

Last in t	Nr. 7		Nr. 9		Nr. 8*)		Nr. 10*)	
	Ver- kürzung	Dif- ferenz	Ver- kürzung	Dif- ferenz	Ver- kürzung	Dif- ferenz	Ver- kürzung	Dif- ferenz
5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
30	1,3	1,0	1,3	1,0	1,9	1,8	1,9	1,7
35	3,5	2,2	3,6	2,3	4,2	2,3	4,0	2,1
40	5,6	2,1	5,9	2,3	6,1	1,9	6,0	2,0
45	7,7	2,1	7,8	1,9	7,8	1,7	7,7	1,7
50	9,7	2,0	9,7	1,9	9,4	1,6	9,3	1,6
55	11,5	1,8	11,3	1,6	10,6	1,2	10,5	1,2
60	13,2	1,7	13,1	1,8	11,8	1,2	11,8	1,3
0	12,9	-0,3	12,9	-0,2	—	—	—	—

*) Die Zahlen für Nr. 8 und Nr. 10 sind aus den Abstandsänderungen der Kreise 1 und 8 durch Multiplikation mit $\frac{40}{35}$ gewonnen.

Tabelle 3.

Durchmesser und Höhen der 4 Kupfer-Cylinder in mm nach Beendigung des Druckversuchs, (d_1 Durchmesser in der Mitte, d_2 und d_3 Durchmesser der Grundflächen, h_1 Höhe in der Mitte, h_2 Höhe an der Seite; die Bezeichnungen sind auch in Tafel III eingeschrieben.)

	Nr. 7	Nr. 9	Nr. 8	Nr. 10
d_1	50,4	49,9	49,2	49,3
d_2	45,55	45,5	46,7	47,0
d_3	43,4	45,4	46,85	47,1
h_1	27,1	27,1	27,05	26,8
h_2	27,0	27,1	27,25	27,1

Ausserdem wurden bei den beiden geschmierten Cylindern noch die Durchmesser der vorher schon erwähnten Kreislinien 1 bis 8 und der zwischen je zwei aufeinander folgenden bestehende Höhenunterschied, der ursprünglich 5 mm, bezw. bei den äussersten im Vergleiche zum Rande 2,5 mm betrug, gemessen. Diese Zahlen sind, unter Einschaltung der bereits aufgeführten Durchmesser d_2 und d_3 in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.

Durchmesser und Höhenabstände der Grundkreise und der mit 1 bis 8 bezeichneten Kreise nach dem Druckversuche in mm.

Kreise	Nr. 8		Nr. 10	
	Durchmesser	Höhenabstand	Durchmesser	Höhenabstand
d_2	46,7		47,0	
1	47,55	1,25	47,8	1,3
2	48,5	3,55	48,8	3,55
3	48,9	3,5	49,1	3,5
4	49,2	3,6	49,3	3,4
5	49,2	3,5	49,3	3,55
6	48,95	3,6	49,1	3,45
7	48,5	3,5	48,7	3,55
8	47,5	3,5	47,75	3,5
d_3	46,85	1,15	47,1	1,35

Nach diesen Daten sind auch die Umrisslinien der Probekörper auf Tafel III konstruiert.

§ 9.

Ergebnisse der Druck- und Umschlingungsversuche mit Cementwürfeln.

Ich hole zunächst noch eine Beschreibung über den Verlauf des Bruchvorgangs bei Umschlingungsversuchen mit geschmierten Druckflächen nach. Die Versuche wurden in der grossen vertikalen Presse des Laboratoriums vorgenommen, bei der man die Last an dem Zeiger eines Manometers abliest. Anfänglich nähern sich, während das Manometer steigt, die beiden Druckköpfe des Druckkreuzes, wie man durch Nachmessen finden kann, nur sehr wenig; sonst bemerkt man überhaupt nichts. Dann fängt bei einer gewissen Last das Ausfliessen der Schmiere an und hiermit wird auch die relative Bewegung der Druckköpfe merklicher, denn die Druckplatten schieben sich jetzt etwas auf einander zu. Dies setzt sich längere Zeit hindurch in der gleichen Weise fort; die Schmiere tritt in flachen Bändern oder Fäden langsam aus den Druckfugen aus und bewahrt nach dem Austreten ihren Zusammenhang ziemlich gut. Dann bemerkt der Beobachter am Manometer ganz plötzlich ein Stocken und im Anschluss daran ein langsames Zurückgehen des bis dahin gleichmässig fortschreitenden Zeigers. Dies ist das Zeichen für den erfolgten Bruch.

Zu hören ist gar nichts. Selbst wenn Granit- oder Basaltwürfel zerbrochen werden, ist der Moment des Bruches durch das Gehör nicht festzustellen, obschon der Bruch solcher Steine bei einem gewöhnlichen Druckversuche von einem ohrenbetäubenden Lärm begleitet ist. Ich schliesse daraus, dass dieser Lärm durch das Abgleiten der Bruchstücke längs der Druckfläche, das vor-

her durch die grosse Reibung verhütet war, hervorgerufen wird. Schon wenn man einen Steinwürfel mit der Hand unter leichtem Drucke längs einer glatten Eisenplatte verschiebt, entsteht ein ziemlich lautes, unangenehmes Geräusch. Es ist daher leicht verständlich, dass das plötzliche, vorher durch die Reibung verhinderte Abrutschen der einzelnen Flächenelemente der Druckfläche nach aussen hin im Augenblicke des Bruches, wenn es auch nur auf einem verhältnissmässig sehr kleinen Wege (entsprechend der verhinderten Querdehnung) erfolgt, wegen des zu dieser Zeit immer noch herrschenden starken Druckes zu einem so grossen Lärm führt. Bei einer Schmierung der Druckflächen fällt mit der Reibung auch das Bruchgeräusch fort.

Beobachtet man das Druckkreuz, so kann man gewöhnlich im gleichen Augenblicke, in dem das Stocken des Manometerzeigers gemeldet wird, ein plötzliches Zusammenrücken der 4 Druckplatten beobachten. Ich erwähnte schon vorher, dass der Weg für diese geringe Bewegung der Druckplatten durch das Ausfliessen von Schmiere aus der Druckfuge in die aufklaffenden Bruchfugen frei gemacht wird. Zuweilen ist aber diese Bewegung auch so gering, dass sie sich der Wahrnehmung entzieht. — An den beiden von Druckplatten freien Würfelseiten ist niemals eine Beschädigung wahrzunehmen gewesen; beim Nachmessen kann man hier nur feststellen, dass sich beide Flächen ein wenig nach aussen bewegt haben. Die andern Würfelseiten sind durch die Druck-

platten bedeckt, so dass es dem Zuschauer, der einem solchen Versuche zum ersten Male beiwohnt, kaum glaublich scheint, dass der Bruch, von dem er nichts sehen kann, wirklich schon erfolgt sei. Nur an den Kanten, die zwischen den Druckplatten liegen, kann man nach Entfernen der ausgeflossenen Schmiere in dem engen Spielraum, der von den Platten unbedeckt ist, das Aufklaffen der Fugen wahrnehmen. Dazu gehört aber erst einige Uebung.

Nimmt man den Apparat auseinander, so findet man, dass der Probewürfel in zwei bis zu fünf Platten zerlegt ist und zwar durch Bruchflächen, die gewöhnlich ziemlich eben und parallel zur Kraftebene gerichtet sind. Die Abstände der Bruchflächen von einander sind in manchen Fällen in bemerkenswerther Weise gleich unter einander, so dass der Würfel in nahezu unter einander congruente Platten zerlegt ist. Es scheint mir, dass je mehr es glückt, die Versuchsbedingungen gleichmässig zu gestalten und zufällige Unregelmässigkeiten an einzelnen Stellen auszuschliessen, um so grösser auch die Zahl der gebildeten Platten und um so gleichmässiger die Abstände der einzelnen Bruchflächen von einander werden. Bei den letzten Versuchen, die ich mit dem Druckkreuz vornehmen liess, bei denen man wegen der vorausgegangenen Schulung und Erfahrung des Bedienungspersonals eine besonders gute Ausführung voraussetzen kann, ist von einer Serie von 10 Cementwürfeln, die mit geschmierten Druckflächen geprüft wurden, kein einziger nur einmal gebrochen und die meisten zeigen mindestens 3 Bruchflächen.

Auf Tafel III sieht man übrigens eine Anzahl von Probekörpern, die auf Umschlingungs- oder Druckfestigkeit geprüft wurden, in Lichtdruck wiedergegeben.

Von Wichtigkeit ist die Bemerkung, dass sich die verschiedenen Bruchfugen anscheinend alle gleichzeitig bilden oder wenigstens innerhalb eines kleinen Zeitraums, der nur einen Bruchtheil einer Sekunde ausmachen kann, da man weder im Verhalten des Manometerzeigers, noch im Zusammenrücken der Druckplatten, noch bei der direkten Beobachtung der Rissebildung an den Kanten zwischen den Druckplatten jemals irgend ein Anzeichen dafür fand, dass die Risse nach einander entstanden wären.

Gewöhnlich wurde nach den erwähnten Bruchanzeigen die Maschine sofort abgestellt und der Apparat auseinandergenommen. Es geschah dies schon mit Rücksicht auf die Gefahr für den Bestand des Druckkreuzes, wenn sich die Druckplatten etwas verschieben und gegeneinander drücken. Einigemale hat man aber natürlich doch den Versuch gemacht, den Druck noch über das Zerfallen des Probekörpers in Platten hinaus fortwirken zu lassen. Nach dem, was hierbei beobachtet wurde, scheint es, dass man ein weiteres Zerdrücken dieser Platten in dünnere Platten

nicht mehr erzwingen kann; mir ist es wenigstens nicht gelungen. Die nächste Erscheinung, wenn sich die Druckplatten bis dahin noch gut in ihrer Lage gehalten haben, ist vielmehr ein Zertrümmern einer der beiden äusseren Platten von den Kanten her, das augenscheinlich auf ein geringes Schiefstellen und eine dadurch herbeigeführte ungleichmässige Druckvertheilung zurückzuführen ist. Sobald aber hierin einiger Fortschritt gemacht ist, stellen sich die Druckplatten so stark schief, dass der Versuch nicht mehr fortgeführt werden kann.

Zur Hauptversuchsreihe wurden 40 Würfel verwendet, die aus Portlandcement und Berliner Normalsand im Mischungsverhältnisse 1 : 3 nach den Deutschen Normen mit dem Böhme'schen Hammer hergestellt und nach 60-tägiger Erhärtung geprüft wurden. Von diesen wurden 10 auf gewöhnliche Weise mit ungeschmierten und 10 weitere mit geschmierten Druckflächen auf Druckfestigkeit geprüft. Die Kantenlänge der Würfel betrug 7,1 cm, der Inhalt der Druckfläche daher 50,41 qcm. Ausgeführt wurden diese Versuche von Herrn Assistent Klebe. Da es von Interesse ist, auch ein Urtheil über die Gleichförmigkeit der Resultate zu gewinnen, gebe ich die Bruchlasten auch für jeden einzelnen Versuchskörper an. Diese betragen:

a) bei den Würfeln mit nicht geschmierten

Druckflächen:

12,48; 11,70; 11,80; 12,00; 13,75; 11,95; 12,50; 13,80;
12,50; 12,00 Tonnen.

oder im Mittel **12,448 t**, entsprechend einer Druckfestigkeit von **247 atm**;

b) bei den Würfeln mit geschmierten Druckflächen:

6,5; 6,2; 6,5; 7,3; 7,6; 7,5; 6,9; 7,8; 7,8; 6,5 Tonnen
oder im Mittel **7,06 t**, entsprechend einer Druckfestigkeit von **139 atm**.

Die andere Hälfte der 40 Würfel wurde im Druckkreuz auf Umschlingungsfestigkeit geprüft; 10 davon mit ungeschmierten, 10 mit geschmierten Druckflächen. Die auf jede Platte wirkende Druckkraft wurde aus dem von der Festigkeitsmaschine angezeigten Drucke durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$ berechnet. Die in dieser Weise ermittelten „Bruchlasten“ betragen:

c) bei den Würfeln mit nicht geschmierten

Druckflächen:

22,48; 25,35; 22,96; 21,07; 24,38; 24,86; 27,13; 25,99;
24,38; 22,01 Tonnen

oder im Mittel **24,06 t**, entsprechend einer Umschlingungsfestigkeit von **477 atm**;

d) bei den Würfeln mit geschmierten Druckflächen:

6,86; 7,32; 6,38; 7,32; 7,97; 6,38; 6,96; 8,54; 7,04;
7,79 Tonnen

oder im Mittel **7,25 t**, entsprechend einer Umschlingungs-
festigkeit von **144 atm**.

Setzt man zum besseren Vergleiche dieser Zahlen den scheinbaren Werth der Druckfestigkeit, der auf gewöhnliche Art mit ungeschmierten Druckflächen erhalten wurde, gleich 1, so erhält man die folgenden Verhältnisszahlen:

(Scheinbarer) Werth der	}	Druckfestigkeit bei ungeschmierten Druckflächen	= 1,00
		Druckfestigkeit bei geschmierten Druckflächen	= 0,56
	}	Umschlingungsfestigkeit bei unge- schmierten Druckflächen	= 1,93
		Umschlingungsfestigkeit bei ge- schmierten Druckflächen	= 0,58

Wie man sieht, weichen die Ziffern für die Umschlingungsfestigkeit und für die Druckfestigkeit bei geschmierten Druckflächen so wenig von einander ab, dass man sie mit Rücksicht auf die namentlich durch die Ungleichmässigkeiten des Materials bedingten Beobachtungsfehler als gleich gross betrachten kann. Unter der Voraussetzung, dass die Sprengwirkung von der früher die Rede war, beim Bruche nicht betheiligte oder unwesentlich war, würde daraus das wichtige Resultat folgen, dass für den untersuchten Cementmörtel die Umschlingungsfestigkeit gleich der Druckfestigkeit zu setzen sei. Dies würde, worauf zugleich hingewiesen werden möge, eine Bestätigung der Annahme bilden, von der die Mohr'sche Theorie ausgeht.

Dieser Hauptversuchsreihe gingen eine Anzahl anderer voraus, die mehr als Vorversuche aufgefasst wurden. Im Allgemeinen stimmen deren Ergebnisse mit den vorher angeführten überein, obschon grössere Abweichungen zwischen den Einzelresultaten vorkommen, weil man noch mit Schwierigkeiten bei der Behandlung des Apparats, bei der Wahl der Schmiere u. s. f. zu thun hatte. Ausser-

dem war in diesen Fällen auch die Zahl der in gleicher Weise behandelten Probestücke immer kleiner, als es zur Gewinnung brauchbarer Mittelwerthe nöthig gewesen wäre. Nur die folgenden Ziffern dürften noch der Mittheilung werth erscheinen, da sie den vorigen an Zuverlässigkeit nicht allzusehr nachstehen dürften. Sie wurden an Würfeln gewonnen, die aus einem andern Portland-Cement, sonst aber nach den gleichen Vorschriften hergestellt worden waren und nach 48- bzw. 49-tägiger Erhärtung geprüft wurden. Daraus ergab sich im Mittel aus 5 Versuchen die Druckfestigkeit bei ungeschmierten Druckflächen = 209 atm aus 6 Versuchen die Druckfestigkeit bei geschmierten Druckflächen = 127 atm aus 5 Versuchen die Umschlingungsfestigkeit bei ungeschmierten Druckflächen = 379 atm aus 6 Versuchen die Umschlingungsfestigkeit bei geschmierten Druckflächen = 113 atm

Die in der gleichen Reihenfolge wie vorher gebildeten Verhältnisszahlen stellen sich hier auf:

$$1,0 : 0,61 : 1,81 : 0,54$$

Sie weichen nicht allzusehr von den früheren ab; eine Berichtigung der früheren mit ihrer Berücksichtigung vorzunehmen, möchte ich indessen lieber unterlassen, da sich das (jedenfalls erheblich geringere) Gewicht, das ihnen im Vergleiche zu jenen zu geben wäre, nur schwer abschätzen lässt. Nur darauf möchte ich noch hinweisen, dass diesmal bei geschmierten Druckflächen die Druckfestigkeit etwas höher gefunden wurde, als die Umschlingungsfestigkeit, während der Unterschied bei den Hauptversuchen im entgegengesetzten Sinne zählte, dabei aber der Absolutwerth noch wesentlich kleiner war. Man wird also durch den Vergleich nur in der Ansicht bestärkt, dass beide in Wirklichkeit gleich gross sein dürften.

§ 10.

Versuche mit natürlichen Steinen.

Grössere Versuchsreihen mit natürlichen Steinen habe ich bisher nicht ausgeführt. Ich vermag daher nur einige vereinzelte Resultate mitzutheilen, die jedoch immerhin einen ungefähren Ueberblick gestatten. Die hier vorkommenden Differenzen zwischen den Versuchen mit geschmierten und mit ungeschmierten Druckflächen sind nämlich so bedeutend, dass sie auch schon bei einer ganz geringen Zahl von Einzelversuchen deutlich genug hervortreten. Es wäre freilich sehr zu wünschen, dass die Versuche weiter ausgedehnt worden wären; wenn man aber bedenkt, dass ich gegenüber den grossen Versuchsanstalten nur über ein verhältnissmässig kleines Hilfspersonal und

eine verhältnissmässig bescheidene Ausrüstung mit Maschinen und anderen Hilfsmitteln verfüge, wird man verstehen, warum ich die Arbeit nicht mehr in die Breite wachsen liess. In der That konnten alle Versuche, über die ich in dieser Abhandlung berichte, nur zwischendurch vorgenommen werden, wenn die Auftragsprüfungen für die Praxis grade einmal weniger zahlreich vorlagen und zugleich andere Abhaltungen fehlten. Ausserdem musste auch mit den mir zur Verfügung stehenden Geldmitteln haushälterisch umgegangen werden.

Aus dem zuletzt erwähnten Grunde nahm ich nur Versuche mit solchen Steinwürfeln vor, die von früheren

Auftragsprüfungen her als überzählig zurückgelegt worden waren. Ich erzielte hiermit zugleich den Vortheil, dass ich die auf gewöhnliche Art mit ungeschmierten Druckflächen ermittelte (scheinbare) Druckfestigkeit aus jenen früher durchgeführten Versuchen ohne Weiteres entnehmen und benützen konnte. — Umschlingungsversuche mit ungeschmierten Druckflächen habe ich übrigens an natürlichen Steinen überhaupt nicht vorgenommen. Es liess sich nämlich von vornherein voraussehen, dass das Druckkreuz bei Weitem nicht stark genug sein würde, einen solchen Versuch an Würfeln des üblichen Formats durchzuführen. Durch Verwendung von entsprechend kleineren Würfeln hätte sich dem zwar vielleicht abhelfen lassen; für ein allzukleines Format, wie es wahrscheinlich nöthig geworden wäre, ist aber das vorhandene Druckkreuz nicht recht brauchbar.

Auch die für die Prüfung zur Verfügung stehenden Steinwürfel waren freilich schon etwas kleiner als die normalen Cementwürfel, für die das Druckkreuz ursprünglich gebaut ist. Man musste sich daher bei den Umschlingungsversuchen durch Beilegen von Stahlplatten auf die 4 Seiten helfen. Dies geschah in der Art, dass nach Aufbringen der Schmierschicht, solange diese noch nicht ganz erstarrt war, die Platten aufgelegt und dadurch angeklebt wurden. Den auf diese Weise mit den 4 fest anhaftenden Beilageplatten armierten Würfel brachte man dann in das Druckkreuz, ohne natürlich zwischen die Druckplatten und die Beilageplatten ebenfalls eine Schmierschicht einzuschalten. Die Beilageplatten hafteten vielmehr während des Versuchs in Folge der Reibung fest an den Druckplatten; dagegen konnten sie sich nach dem Aufbringen der Last längs der Schmierfuge an dem Steinwürfel verschieben, was, wie in den früheren Fällen nur durch die Anbringung der Holzscheiben vermieden zu werden vermochte. Bei dem kleinsten Würfel, den ich prüfen wollte, einem Basaltwürfel von 5 cm Kantenlänge, gelang es übrigens trotz längerer Bemühungen überhaupt nicht, den Versuch durchzuführen, da immer wieder ein Abrutschen in der Schmierschicht vorkam, so dass der Versuch schliesslich aufgegeben werden musste.

Zunächst führe ich einen mit der Lab. Nr. 5981 versehenen Sandstein von Wandersleben b. Erfurt an. Von den seiner Zeit eingesendeten 12 Würfeln waren damals 6 zerdrückt worden, während die übrigen 6 zurückgelegt worden waren und jetzt geprüft wurden. Bei der Auftragsprüfung war die Druckfestigkeit (selbstverständlich mit Verwendung ungeschmierter Druckplatten) an 3 Probewürfeln für die Richtung des Druckes senkrecht zum Lager und für die 3 anderen parallel zum Lager ermittelt worden. Die Zahlen sind:

für Druck \perp Lager	829; 851; 777;	} Druckfestigkeit
im Mittel	819 atm	
für Druck \parallel Lager	667; 558; 648;	} bei unge-
im Mittel	624 atm	
		schmierten
		Druckplatten.

Von den 6 übrigen Würfeln wurden 4 ebenfalls auf Druckfestigkeit, aber mit geschmierten Druckflächen geprüft. Der Druck war in diesen Fällen stets parallel zum Lager gerichtet. Zur Schmierung dient reines Stearin. Man erhielt

287; 228; 283; 200, im Mittel **249 atm**, Druckfestigkeit
 \parallel Lager bei Schmierung.

Die letzten beiden Würfel dienten zur Ermittlung der Umschlingungsfestigkeit bei ungeschmierten Druckflächen. Die Kraft-Ebene (oder Mittel-Ebene des Würfels) fiel in die Richtung des Lagers; jedenfalls ist also die ermittelte Umschlingungsfestigkeit mit der Druckfestigkeit \parallel Lager zu vergleichen. Man erhielt 233; 253; im Mittel **243 atm** Umschlingungsfestigkeit
 \parallel Lager bei Schmierung.

Die entsprechenden Ziffern für Druck und Umschlingungsfestigkeit stimmen innerhalb der unvermeidbaren Abweichungen wieder mit einander überein. Das Verhältniss zwischen der Druckfestigkeit mit geschmierten Druckplatten zu der bei ungeschmierten sinkt dagegen hier auf 0,40 herab, gegenüber 0,56 bis 0,61 bei Cement.

Genau in derselben Weise wurden die Versuche mit einer Sorte Schwarzwald-Granit von Waldulm b. Achern, Lab. Nr. 5917 durchgeführt. Die früher an 6 Würfeln ermittelte Druckfestigkeit schwankte von 1320 bis 1610 und betrug im Mittel **1460 atm**. Eine Schichtung war nicht zu erkennen. Bei geschmierten Druckflächen erhielt man dagegen für die Druckfestigkeit aus 4 Versuchen 394; 395; 437; 402; im Mittel **407 atm**.

Als Schmierung diente reines Stearin. — Bei den Umschlingungsversuchen mit geschmierten Druckflächen erhielt man aus zwei Versuchen

400; 506; im Mittel **453 atm**.

Auch dies weicht nicht allzusehr von der Druckfestigkeit ab. Sehr bemerkenswerth ist dagegen, dass die Druckfestigkeit bei geschmierten Druckflächen zu nur 0,28 von jener bei nicht geschmierten gefunden wurde. — Der bei den Umschlingungsversuchen zuerst angeführte Würfel zerfiel in nur zwei, der andere (mit der höheren Festigkeit) in vier sehr schön regelmässig ausgebildete Platten.

Ausser diesen kann ich nur noch 2 vereinzelte Resultate anführen. Zunächst ein Sandsteinwürfel aus Mömlingen, Lab. Nr. 2991, für den die Druckfestigkeit \perp Lager zwischen 729 bis 787 und \parallel Lager zwischen 734 bis 786, also in beiden Fällen gleich zu setzen ist. Im Druckkreuz mit geschmierten Druckflächen (Kraft-Ebene

|| Lager) geprüft, ergab sich für ihn die Umschlingungsfestigkeit zu **222 atm.**

Dann noch ein Basaltwürfel aus Bobenhausen in Oberhessen Lab. Nr. 4093, für den in Heft 26 der „Mitth.“, S. 7 die Druckfestigkeit zu 2800—3000 atm angegeben ist. Dieser Versuch ist in mancher Beziehung so bemerkenswerth, dass ich den Eintrag in das Beobachtungsheft wörtlich folgen lasse:

„Versuch vom 13. Okt. 1899; mit einem Basaltwürfel von 5,5 cm Kantenlänge, der im Druckkreuze mit geschmierten Druckflächen auf Umschlingen geprüft wird.

Die Last wurde auf 35 atm am Manometer, entsprechend 21,6 t gesteigert. (Dies war die höchste Belastung, die mit Rücksicht auf das Druckkreuz nicht überschritten werden durfte.) Dann bemerkte man beim Auseinandernehmen des Apparats, dass der Würfel in gewöhnlicher Weise durch eine Bruchfläche in zwei Theile gespalten war. Der Bruch kann auch schon bei einer niedrigeren Last eingetreten sein; gehört hat man gar nichts.

Querschnittsfläche 30,25 cm², Bruchlast = 21,6 · $\sqrt{2}$ = 30,5 t; Umschlingungsfestigkeit daher gleich oder kleiner als **1008 atm.**“

Zur Erläuterung dient hiezu noch, dass die Schmierung aus Versehen nicht mit reinem Stearin, sondern mit der

für die Cementwürfel passendsten Stearin-Talg-Mischung bewirkt worden war. Im Augenblicke des Bruches war daher an der glatten Oberfläche des (mit der Diamantsäge geschnittenen) Würfels nur noch eine Schmierschicht von ganz minimaler Dicke vorhanden. Aus diesem Grunde dürfte das Stocken des Manometerzeigers nicht bemerkt worden sein.

Am Schlusse dieser Beschreibung der Versuche mit geschmierten Druckflächen möchte ich meiner Meinung noch einmal dahin Ausdruck geben, dass man es zwar auch hier nur mit „scheinbaren“ Werthen der Druck- und der Umschlingungsfestigkeit zu thun hat, indem sich nicht genau übersehen lässt, wie gross der Einfluss der unter der Bezeichnung „Sprengwirkung“ zusammengefassten Erscheinungen und der damit zusammenhängenden Ungleichförmigkeit in der Druckvertheilung gewesen sein mag, dass aber andererseits alle Wahrscheinlichkeit dafür spricht, dass diese Werthe den „wahren“ Werthen dieser Festigkeitsarten erheblich näher kommen, als jene, die mit ungeschmierten Druckplatten gefunden werden.

Eine Anzahl Probestücke sind auf Tafel IV in photographischer Wiedergabe dargestellt.

§ 11.

Biegungsversuche mit kreisförmigen Platten.

Schon in § 5 erwähnte ich, dass die zur Ermittlung der Zerrungsfestigkeit vorgenommenen Vorversuche über die Biegungsfestigkeit kreisförmiger Platten aus gewöhnlichem Fensterglas an der ausserordentlich stark wechselnden Festigkeit solcher Glasscheiben von einem Exemplare zum andern scheiterten. Ich liess daher diesen Versuchsplan bis auf Weiteres fallen, benützte dagegen den vorhandenen Apparat, um das elastische Verhalten von Platten aus Eisenblech (ausschliesslich unterhalb der Elasticitätsgrenze) etwas näher zu studiren. Es kam mir dabei namentlich darauf an, einen Vergleich der Beobachtung mit der ausgearbeitet vorliegenden Theorie herbeizuführen. Die Ausführung dieser Versuche übertrug ich Herrn Assistent Prandtl, nach dessen Aufschreibungen ich hier berichte.

Der von Herrn Assistent Klebe nach meinen Angaben gebaute Apparat ist auf Tafel V dargestellt. Abb. 1 zeigt einen Schnitt, Abb. 2 einen Grundriss im Massstabe 1:4, während die Abb. 3 und 4 die Einzelheiten in

natürlicher Grösse wiedergeben. Auf Abb. 5 komme ich noch zurück.

Der Haupttheil des Apparats ist ein gusseiserner Teller A mit einem abgerundeten kreisförmigen Rande, auf den die zu prüfende Platte B aufgelegt wird. Diese steht ringsum ein wenig vor und wird durch die in Spitzen endigenden Stellschrauben C centrisch eingestellt und mit leichtem Drucke festgehalten. Um zuverlässige Werthe für die Biegungspfeile zu erhalten, ist es nöthig, die so gut, als es mit einfachen Hilfsmitteln möglich ist, eben gerichtete Platte unten mit einem abgedrehten Rande zu versehen. Andernfalls gelingt es nämlich nicht, die Platte auf dem ganzen Rande gleichmässig zur Auflage zu bringen; sie liegt vielmehr an einzelnen Stellen zunächst etwas hohl und verhält sich infolgedessen bei den ersten Laststufen ganz anders als bei den folgenden. Damit sich die Platte beim Abdrehen selbst nicht verzieht, muss sie mindestens eine Stärke von 3, besser von 6 oder 10 mm haben. Der Durchmesser des Auflagerkreises beträgt 20 cm.

Die Belastung greift in der Mitte an und wird durch den unten abgerundeten Dorn D übertragen. Die Versuche wurden in einer kleinen, zunächst für Biegungsproben bestimmten Amsler'schen Maschine vorgenommen. Unten wird an die Platte eine kleine Schraubenmutter E angelöthet, an die sich das Stängelchen F eines Bauschinger'schen Rollenfühlhebels anschliesst. Um den mit einem gewöhnlichen Gelenk möglicher Weise verbundenen todten Gang zu vermeiden, wurde ein Blattfedergelenk gewählt. Die Rolle G , an die sich das mit Schmierepapier beklebte Stängelchen F anlegt, sitzt auf der zwischen Spitzen gelagerten Welle H , die durch eine Bohrung im Tellerrande nach aussen ragt und dort den Zeiger I des Rollenfühlhebels trägt, der durch ein kleines Gegengewicht ausbalancirt ist. An dem Gradbogen K werden die Biegungspfeile abgelesen. Ein Theilstrich entspricht einem Wege der Plattenmitte von $\frac{1}{50}$ mm und da man auf Zehntel abliest, erhält man die Biegungspfeile bis auf $\frac{1}{500}$ mm, obschon diese letzten Einheiten natürlich nicht mehr als genau zu betrachten sind. Zur Herstellung eines angemessenen Druckes zwischen dem Stängelchen und dem Rollenumfange dient das seitlich an dem Stängelchen angebrachte Messinggewicht L . Vor dem Auflegen der Platte schiebt man den Keil M unter das Gewicht L und hebt es an, so dass die Stange F zunächst nicht in Berührung mit dem Rollenumfange kommt. Erst nachdem die Platte richtig aufgesetzt ist, lässt man durch Herausziehen des Keils M das Gewicht L langsam herab und bringt dadurch den Eingriff zwischen Stange und Rolle zu Stande. — Ausserdem sind noch zwei kleine Bohrungen im Tellerrande angebracht, um durch die eine in den Apparat hineinsehen zu können, während durch die andere ein Lichtbündel eintritt. Der Apparat hat sich sehr gut bewährt und gestattet ein rasches, bequemes und zuverlässiges Arbeiten.

Zum Vergleiche wurden ferner aus demselben Schweisseisenblech, dem die Platten entstammten, gerade Streifen herausgeschnitten, die ebenfalls auf den Apparat aufgelegt und in derselben Weise geprüft wurden, wie die Platten. Man hatte es in diesem Falle mit Balken von 20 cm Spannweite zu thun, die ebenfalls an den Enden frei auflagen und in der Mitte belastet wurden. Die gemessenen Biegungspfeile wurden mit der Formel:

$$f = \frac{Pl^3}{48 E \Theta}$$

verglichen und da alle übrigen Grössen ebenfalls gemessen werden konnten, liess sich daraus der Elasticitätsmodul E ableiten. Ebenso wurden auch die an den Platten gewonnenen Versuchsergebnisse in die Formel:

$$f = \frac{3(m-1)(3m+1)}{4\pi m^2} \frac{Pr^2}{Eh^3} = 0,55 \frac{Pr^2}{Eh^3}$$

(vgl. meine Festigkeitslehre, 1. Aufl., Gl. (188), S. 274) eingesetzt. Die Bedeutung der Buchstaben ist wie im vorigen Falle leicht ersichtlich. Auch hier wurden die Beobachtungsergebnisse zur Berechnung des Elasticitätsmoduls E verwerthet. Eine Prüfung der Theorie war nun durch einen Vergleich der aus beiden Versuchsreihen berechneten Werthe von E ermöglicht. Da es sich in jedem Falle um dasselbe Material handelte, musste man erwarten, in beiden Fällen gleiche Werthe von E zu erhalten. Dies traf aber, wie man alsbald sehen wird, nicht genau zu. Da sich aus einem anderen, nachher noch zu beschreibenden Versuche zugleich schliessen liess, dass die Theorie im Uebrigen, abgesehen also von der absoluten Grösse der Biegungspfeile, die Erscheinungen sehr gut darstellt, blieb nur übrig, dass in den Ansatz der Theorie, von vornherein eine Annahme eingeht, die nicht zutrifft, die im Uebrigen aber die Entwicklungen nicht weiter beeinflusst, als wie es etwa ein ungenauer Zahlenfaktor thun würde, der durch alle Betrachtungen fortgeschleppt worden wäre. Ich werde auf diese Schlüsse nachher noch zurückkommen und ich erwähne sie einstweilen nur, weil sie den einzigen Grund dafür bilden, dass ich die Beschreibung dieser Versuche in diese Abhandlung, die der Besprechung des Elementargesetzes des Spannungszustandes gewidmet ist, aufgenommen habe.

Ich zähle zunächst die Platten und Streifen nach der Bezeichnung, die sie erhalten haben und nach ihrer Zusammengehörigkeit auf. Von den zusammengehörigen Streifen sind immer je zwei rechtwinklig zu einander aus der Platte entnommen, so dass einer in die Walzrichtung fällt, der andere senkrecht dazu steht.

Tabelle 5.

Aus demselben Blech von ca.	sind entnommen die Platten	und die Streifen
2,1 mm Dicke	2 u. 3	1 u. 2
3,3 mm „	4 u. 5	3 u. 4
6,6 mm „	6 u. 7	5, 6, 7, 8
10 mm „	8 u. 9	9, 10, 11, 12.

Für die aus dem schwächsten Blech von 2,1 mm Dicke entnommenen Platten und Streifen werde ich indessen keine Versuchsergebnisse mittheilen, weil sich diese dünnen Platten am Rande nicht abdrehen liessen. Sie sassen daher nicht gleichmässig auf und gaben ganz unzuverlässige Resultate. Nur um ein Bild davon zu geben, wie stark die Versuchsergebnisse durch den Mangel an gleichmässiger Auflage gefälscht werden können, führe ich hier folgende Messungen von Eisenplatte 2 an.

Tabelle 6.

Lasten in kg	0	10	20	30	40	50*)	60	70	80	0
Durchbiegung in $\frac{1}{50}$ mm	0	16,1	30,7	43,5	55,2	65,6	75,3	84,2	92,7	0,2
Diff.		16,1	14,6	12,9	11,6	10,4	9,7	8,9	8,5	—

Dass die Platte an irgend einer Stelle hohl lag, liess sich entweder unmittelbar durch das Gesicht wahrnehmen, schärfer aber durch das Gehör beurtheilen, indem man sie an dieser Stelle durch Anreissen mit dem Fingernagel zum Tönen brachte.

Die Platte 2 hatte bei den vorstehenden Messungen unter der Last von 80 kg bereits eine Durchbiegung von fast 2 mm, d. h. nicht viel weniger als ihre Dicke betrug, angenommen. Es ist aber bekannt, dass die Rechnungen über den Biegungspfeil und die Beanspruchung von Eisenplatten immer nur auf solche Belastungen angewendet werden dürfen, die nur zu kleinen Formänderungen im Vergleiche zu den Plattendicken führen. Im anderen Falle nähert sich das Verhalten der Platte schon zu sehr dem einer vollständig biegsamen Membran (vgl. meine „Festigkeitslehre“, 1. Aufl., Aufgabe 37, S. 312). Deshalb sind bei Platte 2 auch die nach 50 kg folgenden Laststufen, die auf der bereits vollständig aufliegenden Platte zu der vorhandenen Last hinzukommen, zur Berechnung des Elasticitätsmoduls nicht mehr verwendbar.

Als Beispiel dafür, wie die Messungen durchgeführt wurden, gebe ich hier die Aufschreibungen für die Platte 6 nach dem Beobachtungsheft vollständig wieder, indem ich bemerke, dass die Wahl ganz willkürlich getroffen ist, da alle anderen Platten grade so behandelt wurden und ähnliche Resultate gaben. Zur Erläuterung bemerke ich, dass 4 Versuchsreihen bei jener Lage der Platte vorgenommen wurden, bei der die aufgeschriebene Nummer nach oben hin stand und 4 andere, nachdem die Platte um 180° gedreht worden war, so dass die Nummer nach unten hin stand. Aus den Ergebnissen für beide Lagen, die wegen anfänglicher Krümmungen der Platten etwas von einander abweichen können, wurde nachher das Mittel genommen. Die zu jeder Belastung gehörigen Biegungspfeile ergeben sich in $\frac{1}{50}$ mm durch Bilden der Differenz zwischen der beobachteten Ablesung und der Anfangsablesung. Diese Differenzen sind im Beobachtungsheft nicht gebildet und ich will sie hier auch nicht nachtragen, weil es in erster Linie doch nur darauf ankommt, um wie viel sich der Biegungspfeil bei jeder neuen Laststufe vermehrt hat. Das Anwachsen wird durch die in die Tabelle eingetragenen Differenzen zwischen je 2 aufeinanderfolgenden Ablesungen angegeben.

*) Von hier ab scheint die Platte ringsum überall aufzusitzen.

Tabelle 7.

Durchbiegungsversuch mit Platte 6, deren Dicke an verschiedenen Stellen zwischen 6,55 bis 6,70 mm, im Mittel 6,61 mm betrug. Ablesungen in $\frac{1}{50}$ mm.
Erste Lage (Bezeichnung unten).

Last in kg	Erster Versuch		Zweiter Versuch		Dritter Versuch		Vierter Versuch	
	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.
0	13,4		13,4		61,1		61,1	
50	16,1	2,7	16,1	2,7	63,9	2,8	63,9	2,8
100	18,6	2,5	18,8	2,4	66,4	2,5	66,3	2,4
150	21,1	2,5	21,2	2,5	68,9	2,5	68,9	2,4
200	23,6	2,5	23,7	2,4	71,4	2,5	71,3	2,5
250	26,1	2,5	26,1	2,5	73,9	2,3	73,8	2,4
300	28,6	2,4	28,6	2,4	76,2	2,5	76,2	2,5
350	31,0	2,5	31,0	2,4	78,7	2,4	78,7	2,4
400	33,5	2,4	33,4	2,6	81,1	2,3	81,1	2,4
450	35,9	2,4	36,0	2,3	83,4	2,6	83,5	2,4
500	38,3	2,4	38,3	2,4	86,0	2,2	85,9	2,5
550	40,7	2,4	40,7	2,4	88,2	2,4	88,4	2,3
600	43,1	— 29,6	43,1	— 29,6	90,6	— 29,5	90,7	— 29,5
0	13,5		13,5		61,1		61,2	

Tabelle 8.

Dieselbe Platte in gleicher Weise behandelt, nachdem sie umgedreht war.
Zweite Lage (Bezeichnung oben).

Last in kg	Erster Versuch		Zweiter Versuch		Dritter Versuch		Vierter Versuch	
	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.	Ab- lesung	Diff.
0	31,0		30,9		60,0		59,3	
50	34,0	3,0	33,9	3,0	63,1	3,1	62,3	3,0
100	36,8	2,8	36,7	2,5	65,6	2,5	64,9	2,6
150	39,1	2,3	39,0	2,6	68,1	2,5	67,6	2,7
200	41,6	2,5	41,5	2,5	70,6	2,5	70,0	2,4
250	44,1	2,5	44,0	2,5	73,1	2,5	72,6	2,6
300	46,6	2,4	46,5	2,5	75,5	2,4	75,0	2,4
350	49,0	2,4	49,0	2,5	77,9	2,4	77,3	2,3
400	51,5	2,5	51,3	2,3	77,9	2,5	77,3	2,6
450	54,0	2,5	53,7	2,4	80,4	2,6	79,9	2,2
500	56,2	2,2	56,1	2,4	83,0	2,6	82,1	2,2
550	58,7	2,5	58,8	2,4	85,3	2,3	84,9	2,8
600	61,2	2,5	61,0	2,7	87,5	2,2	87,2	2,3
0	30,9	— 30,3	30,9	— 30,1	59,9	— 30,0	59,4	— 30,2

Man erkennt aus der Durchsicht dieser Spalten, dass selbst die Zehntel der Ablesungen (also die 500sten Theile eines Millimeters der Durchbiegung) gewöhnlich noch ziemlich genau beobachtet sein müssen. Dass die Zahlen bei der ersten Laststufe von 0—50 kg durchweg etwas grösser ausfallen, als bei den folgenden, ist offenbar auf eine Aenderung in der Anlage der Platte auf dem Rande des Tellers zu schieben.

Aus allen 8 Versuchsreihen wurden dann noch die folgenden Mittelwerthe gebildet:

Last	=	0	50	100	150	200	250	300	
Zuwachs des Biegun	spfeiles	}	=	2,89	2,56	2,51	2,47	2,50	2,43
			300	350	400	450	500	550	600
				2,42	2,45	2,42	2,41	2,40	2,38

Es scheint hiernach, dass die Biegunspfeile bei höheren Lasten etwas weniger wachsen, als bei den niedrigeren. Als sicher ist dies aber nicht zu betrachten, da die Einheiten der hier angegebenen Stellen nur noch 5000stel mm bedeuten. Ausserdem sprechen auch nicht alle Versuche mit den anderen Platten deutlich für ein solches Anwachsen, wenn dies auch bei der Mehrzahl zutrifft. Jedenfalls ist die Abweichung von der Proportionalität, wenn sie überhaupt besteht, nur sehr geringfügig.

Nachdem die Versuche für alle Platten in dieser Weise durchgeführt waren, wurden die durchschnittlichen Werthe für die Vergrösserung des Biegunspfeils f , die einem Lastzuwachs P entsprechen, zusammengestellt und daraus nach der bereits zuvor erwähnten Formel:

$$E = \frac{0,55 Pr^2}{fh^3} \text{ (mit } r = 10 \text{ cm)}$$

die Werthe des Elasticitätsmoduls berechnet, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht:

Tabelle 9.

Nr. der Platte	Lastzuwachs P in kg	Zugehöriger Biegunspfeil f in cm	Plattenstärke h in cm	Elasticitätsmodul E in atm
4	20	0,0138	0,334	2 135 000
5	20	0,0155	0,337	1 860 000
6	50	0,0050	0,661	1 900 000
7	50	0,0051	0,658	1 890 000
8	200	0,0050	1,035	1 980 000
9	200	0,0056	1,005	1 930 000

Die hiermit gewonnenen Werthe waren nun mit den Beobachtungen an den als Balken aufgelagerten Streifen zu vergleichen. Um auch hier ein Beispiel zu geben, führe ich die Mittelwerthe für die Durchbiegunsmessungen an dem Streifen Nr. 6 an, der mit der Platte Nr. 6 aus demselben Blech entnommen war. Die Stärke des Streifens betrug $h = 0,665$ cm, die Breite $b = 2,01$ cm; die Belastung wurde, da nur geringe Lasten in Frage kommen konnten, nicht in einer Festigkeitsmaschine vorgenommen, sondern direkt mit Hülfe des früher von Schward bei seinen Härteprüfungen benützten einfachen Apparates aufgebracht.

Tabelle 10.

Belastung in kg	0	10	20	30	40	0
Ablesung	0,0	8,0	16,0	24,0	32,0	0,0
Diff.		8,0	8,0	8,0	8,0	-32,0

Die Beobachtungsergebnisse an allen Streifen wurden dann wiederum zusammengestellt und hieraus der Elasticitätsmodul E nach der Formel:

$$E = \frac{Pl^3}{4fbh^3} \text{ (mit } l = 20 \text{ cm)}$$

berechnet, wie aus der folgenden Tabelle zu entnehmen ist.

Tabelle 10.

Nr. des Streifens	Stärke h in cm	Breite b in cm	Lastzuwachs P in kg	Zugehöriger Biegunspfeil f in cm	Elasticitätsmodul E in cm	Mittelwerthe von E
3	0,331	1,59	2	0,0356	1 950 000	} 2 102 000
4	0,332	1,82	2	0,0266	2 255 000	
5	0,660	2,02	10	0,0160	2 160 000	} 2 110 000
6	0,665	2,01	10	0,0160	2 120 000	
7	0,665	2,01	10	0,0163	2 080 000	
8	0,660	2,01	10	0,0165	2 100 000	
9	1,005	2,01	20	0,0094	2 080 000	} 20 900 00
10	0,980	2,00	20	0,0102	2 080 000	
11	1,000	2,00	20	0,0097	2 065 000	
12	0,965	2,02	20	0,0103	2 140 000	

Der Vergleich zwischen den Platten einerseits und den Streifen andererseits, die aus derselben Blechtafel herrührten, gestaltet sich nun wie folgt:

Tabelle 11.

Blech von ca	3,3	6,6	10	mm Stärke
Mittel von E für die Platten	} 1 997 000	1 895 000	1 955 000	
Mittel von E für die Streifen				} 2 102 000
Unterschied zwischen beiden	} 105 000	215 000	135 000	
dsgl. in Procenten von E für die Streifen				} 5,0

In allen Fällen wurde demnach der Elasticitätsmodul für die Platten kleiner, die beobachtete Durchbiegun daher grösser gefunden, als man nach der Theorie im Vergleiche mit dem Verhalten der Streifen erwarten sollte. Die Unterschiede sind zwar nicht grade sehr bedeutend, aber doch jedenfalls grösser, als dass sie auf Beobachtungsfehler zurückgeführt werden könnten. Die Abweichungen, die zwischen den in den einzelnen Fällen ermittelten Unterschieden noch bestehen, dürften auch weniger auf eigentliche Beobachtungsfehler, als auf Unterschiede im Material, die selbst bei den aus denselben Blechtafeln entnommenen Probestücken bestanden haben, zurückzuführen sein. Genau beziffern lässt sich der Unterschied infolgedessen freilich nicht; als ungefähre zutreffend dürfte indessen der Mittelwerth aus den vorher berechneten Procentsätzen,

also 7,2 oder rund 7 Procent

anzusehen sein.

Dieser Umstand liess darauf schliessen, dass die Biegungstheorie kreisförmiger Platten in irgend einem Punkte nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Um hierin klarer zu sehen, liess ich daher mit dem gleichen Apparate noch eine andere Versuchsreihe zur Ausführung bringen.

Die Theorie liefert nämlich nicht nur den Biegungs-pfeil in der Mitte, sondern zugleich die Einsenkung an irgend einer anderen Stelle der Platte, oder mit anderen Worten die Gestalt der Meridiancurve der elastischen Fläche. Es handelte sich nun darum, zu untersuchen, ob die Gestalt dieser Meridiancurve mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Zu diesem Zwecke musste die Einsenkung der Platte an verschiedenen Stellen gemessen werden. Eine solche unmittelbare Messung gestattete nun freilich die Einrichtung des vorhandenen Apparats nicht. Man konnte aber über diese Schwierigkeit leicht hinwegkommen, wenn man sich des Maxwell'schen Satzes von der Gegen-seitigkeit der Verschiebungen erinnerte. Nach diesem Satze ist — solange die Formänderungen proportional mit den Lasten wachsen, wie es bei allen diesen Versuchen genau genug zutraf — die Einsenkung der Platte im Abstände x von der Mitte unter dem Einflusse einer in der Mitte angebrachten Belastung ebenso gross, als die Einsenkung der Mitte, wenn dieselbe Last an der Stelle x aufgebracht wird. Die letzte Versuchsanordnung war nun mit dem vorhandenen Apparate ohne Weiteres ausführbar. Man belastete also die Platte, die man entsprechend aus der Axe der Maschine verschob, an verschiedenen Punkten in wachsenden Abständen von der Mitte und beobachtete die dadurch in der Mitte hervorgebrachten Einsenkungen mit Hilfe des Zeigerapparates. Damit hatte man zugleich die Ordinaten der Meridiancurve der elastischen Fläche an diesen ver-schiedenen Punkten für den Fall, dass dieselbe Belastung in der Mitte angriff. Man konnte hierauf die auf diese Weise eingemessenen Punkte der Meridiancurve auftragen und ihre Aufeinanderfolge mit der theoretischen Gestalt der Curve vergleichen.

Nach Gleichung (187), S. 274 meiner Festigkeitslehre ist die Ordinate y der elastischen Fläche im Abstände x von der Mitte

$$y = -\frac{Q}{2} \left(\frac{x^2}{2} \lg \frac{r}{x} + \frac{x^2}{4} + \frac{m}{m+1} \cdot \frac{x^2}{2} \right) + C$$

Setzt man für die Integrations-Constante C ihren Werth:

$$C = \frac{Q}{2} \left(\frac{r^2}{4} + \frac{m}{m+1} \cdot \frac{r^2}{2} \right)$$

ein, so erhält man nach einfacher Umformung:

$$y = \frac{Q}{2} \left(\frac{x^2}{2} \lg \frac{x}{r} + \frac{r^2 - x^2}{4} \cdot \frac{3m+1}{m+1} \right)$$

$$= \frac{Q}{4} \left(x^2 \lg \frac{x}{r} + 1,27 (r^2 - x^2) \right)$$

wenn bei der letzten Umformung die Verhältnisszahl $m = 3 \frac{1}{3}$ genommen wird. Mit dieser Formel sind die Beob-achtungswerthe zu vergleichen.

Zur Ausführung dieses Ver-suchsplans wurde die Platte 6 verwendet, für die aus diesem Grunde vorher schon alle Daten mit grösserer Ausführlichkeit wiedergegeben worden sind. Man zog auf dieser Platte zwei zu einander senkrechte Durchmesser und markirte auf

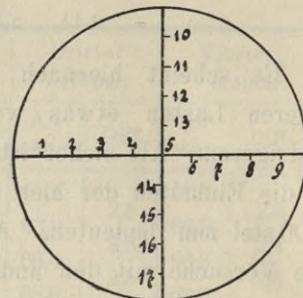


Abb. 4.

diesen die Punkte 1 bis 17, so dass je zwei aufeinander folgende 2 cm Abstand von einander hatten. Die bei-stehende Abb. 4 zeigt diese Eintheilung.

Um die unregelmässigen Werthe bei den ersten Last-stufen, die im vorliegenden Falle leicht noch von grösserem Einflusse werden konnten, mit Sicherheit aus-zuschliessen, wurde bei jedem Versuche nur die Laststufe von 300 bis 600 kg berücksichtigt. Die folgenden Zahlen geben also an, um wie viel sich die Mitte weiter ein-senkte, wenn die Last an dem betreffenden Punkte von 300 kg auf 600 kg gesteigert wurde. Eine Einheit der angegebenen Zahlen bedeutet wie früher einen Biegungs-pfeil von $\frac{1}{50}$ mm. Man erhielt

für die Punkte	1	2	3	4	5	6	7
die Biegungs-pfeile	3,3	6,8	9,9	12,7	14,4	13,0	10,1
	8	9	10	11	12	13	5
	6,3	3,6	3,8	7,4	10,1	12,6	14,9
	14	15	16	17			
	13,3	10,8	7,2	4,1			

Der Punkt 5 ist zweimal angeführt, weil er auf beiden Durchmessern enthalten ist und bei jeder Ver-schiebung längs eines der Durchmesser eingemessen wurde.

Aus diesen Ziffern wurden zunächst Mittelwerthe gebildet, für die Abstände 0, 2, 4, 6 und 8 cm vom Mittel-punkte. Diese Ziffern geben die Ordinaten der Meridian-curve der elastischen Fläche an den betreffenden Stellen an, für den Fall, dass die Last in der Mitte angriff, und dort von 300 auf 600 kg erhöht wird. In Abb. 5 Tafel V sind die zugehörigen Punkte in zweihundertfacher Verzerrung eingetragen und durch kleine Kreise markirt.

Um zu erkennen, inwiefern sich diese Punkte mit der durch die vorhergehende Gleichung für y beschriebenen Gestalt der Meridiancurve in Uebereinstimmung bringen lassen, mussten die Ordinaten nach dieser Gleichung aus-gerechnet werden. Dabei entstand die Frage, welchen Werth man dem in dem Ausdrucke für y vor der Klammer

stehenden Faktor Q beizulegen habe. Unter Q ist nämlich nach Gl. (164) S. 265 meines Buches der Ausdruck:

$$Q = \frac{6(m^2 - 1)P}{\pi m^2 E h^3}$$

zu verstehen, in dem der Elasticitätsmodul E vorkommt. Nun ist zwar E schon früher nach den Durchbiegungsmessungen für die Platte 6 berechnet worden. Es ist aber klar, dass alle hier vorgenommenen Messungen ebensogut zur Berechnung von E hätten verwendet werden können. Man musste daher für den vorliegenden Fall E noch als Unbekannte ansehen, die aus den Versuchen so zu bestimmen ist, dass sie sich den Beobachtungsergebnissen möglichst gut anschliesst. Hierbei kommt noch in Betracht, dass der Ausdruck für Q auch noch die Verhältnisszahl m enthält, die nach der üblichen Schätzung vorher zu $3\frac{1}{3}$ angenommen und für das vorliegende Material nicht besonders bestimmt wurde. Auch hier könnte daher eine Abweichung vorliegen. Herr Assistent Prandtl schlug mir daher vor, die Grösse Q direkt nach der Methode der kleinsten Quadrate auszurechnen, also so, dass die Quadratsumme der Abweichungen zwischen der berechneten Curve und den eingemessenen Punkten zu einem Minimum würde. Dieser Vorschlag, der meine Billigung fand, wurde dann ausgeführt. Das Ergebniss geht aus der folgenden Tabelle hervor:

Tabelle 12.

Abstand von der Mitte in cm	0	2	4	6	8
y beobachtet in $\frac{1}{50}$ mm	14,6	12,95	10,3	6,95	3,7
y berechnet	14,37	13,09	10,43	7,12	3,53
Unterschied	+0,2	-0,1	-0,1	-0,2	+0,2

Es ergibt sich hiernach das bemerkenswerthe Resultat, dass die Unterschiede zwischen Beobachtung und Berechnung noch vollständig in die Grenzen der Beobachtungsfehler hineinfallen, da sie sich nirgends über $\frac{23}{5000}$ mm erheben. Daraus folgt, dass die Meridiancurve der elastischen Fläche ihrer allgemeinen Gestalt nach so genau mit der von der Theorie vorausgesetzten übereinstimmt, als nur irgend erwartet werden konnte. Auch der Anblick von Abb. 5 auf Tafel V, in die die nach der Theorie berechnete Curve nebst den durch die Beobachtung

gelieferten Punkten eingetragen ist, lässt dies sofort erkennen.

Die Fassung der Theorie, die zu einer so genau zutreffenden Uebereinstimmung mit der Erfahrung führt, kann hiernach an sich nicht bemängelt werden; es muss vielmehr an der Benützung einer ungenauen Annahme gelegen haben, die zu den vorher festgestellten Abweichungen der Durchbiegungen beim Vergleiche von Platten und Balken geführt hat. Hier stehen nun zwei Möglichkeiten offen. Die erste wäre die, dass m von dem dafür gewählten Werthe $3\frac{1}{3}$ stark abweiche. Ich selbst habe bisher niemals einen Versuch zur Ermittlung von m für Walzeisen angestellt; dass m bei Gusseisen und bei Steinen gelegentlich viel grösser als $3\frac{1}{3}$, bis gegen 9 hinauf werden kann, habe ich in Uebereinstimmung mit früheren Versuchen Bauschingers auch selbst bestätigt gefunden. Für schmiedbares Eisen ist aber eine grössere Abweichung von dem üblichen Durchschnittswerthe $3\frac{1}{3}$ bisher, so viel mir bekannt ist, noch niemals beobachtet worden. Wenn $m = 4,2$ gesetzt werden könnte, wären die beobachteten Unterschiede freilich sofort erklärt. Es scheint indessen zweifelhaft, ob die Abweichung zwischen Rechnung und Beobachtung hierauf zurückzuführen ist.

Die andere Möglichkeit, die alsdann allein noch in Betracht käme, ist die Ungenauigkeit der Annahme über die elastische Formänderung, die zu zwei von Null verschiedenen Hauptspannungen gehört. Man sagt, dass jede Hauptspannung für sich genommen dieselben Längs- und Querdehnungen hervorbringe, als wenn sie allein vorhanden wäre, und dass sich die zu beiden (oder zu drei) Hauptspannungen gehörigen Formänderungen ohne gegenseitige Störung übereinander lagern. Ein hinreichender experimenteller Nachweis für die Richtigkeit dieser Annahme scheint mir bisher keineswegs erbracht zu sein; meine Versuche innerhalb des rein elastischen Bereiches der Formänderungen scheinen vielmehr ebenso wie die älteren von Wehage, die sich auf die Ueberschreitung dieser Grenzen bezogen, eher gegen die Richtigkeit der Annahme zu sprechen. — Auch nach dieser Richtung hin fehlt es daher immer noch an einem experimentell gut begründeten und daher zuverlässigen Elementargesetze.

Nachtrag.

Während des Druckes liess ich noch einige Versuche ausführen, die zur Aufklärung über die Frage bestimmt sind, inwiefern bei Druckversuchen mit geschmierten

Druckflächen das Eindringen der Schmiere in die Poren des Versuchskörpers an den geringen Festigkeitswerthen, die man hierbei beobachtet, Schuld ist.

Zu diesem Zwecke liess ich eine Anzahl Cementwürfel unter vier verschiedenen Versuchsbedingungen zerdrücken. Die erste Serie wurde in gewöhnlicher Weise, die zweite, wie schon früher, mit geschmierten Druckflächen zerdrückt. Bei der dritten Serie liess ich auf die Druckflächen der Cementwürfel zunächst dünne Messingblättchen von 0,1 mm Stärke legen und auf der Aussen-seite dieser Blättchen, die den Druckplatten der Maschine zurückgekehrt ist, eine Schmierschicht von derselben Art wie bei der zweiten Serie anbringen. Die Messingblättchen hatten nur den Zweck, das Eindringen der Schmiere in die Probekörper zu verhindern und da sie nicht zer-rissen, haben sie diesen Zweck auch sicher erfüllt. Die Blättchen mussten dünn genug genommen werden, damit sie sich in ihrer Ebene leicht ein wenig strecken konnten, so dass sie den dem Bruche vorausgehenden Querdehnungen des Probewürfels kein wesentliches Hinderniss zu bereiten vermochten. Hätte man anstatt dessen starke Platten benützt, so wäre der Cementwürfel natürlich in derselben Lage gewesen, als wenn man ihn zwischen Messingdruckplatten der Maschine ohne Beilagen geprüft hätte; die Schmierschicht hätte dann gar keinen Einfluss ausüben können. Bei der vierten Serie endlich wurden die Druckflächen der Würfel ebenfalls mit solchen Messingblättchen überdeckt, die Schmierschicht zwischen diesen und den Druckplatten der Maschine aber fortgelassen. Dies hatte den Zweck, erkennen zu lassen, ob etwa die Messingblättchen selbst schon wie eine weiche Beilage wirkten, ob sie also etwa sich auch in die Poren eindrückten und so ein Auseinandersprengen veranlassten.

Hierzu erwähne ich noch, dass die Druckflächen aller Würfel vorher durch Aufbringen und Verreiben eines dünnen Cementbreies, der aus feinem, mit Hülfe eines 4900-Maschen-Siebs gewonnenen Cementstaub angerührt war, so gut als möglich geebnet wurden. Dies war mit Rücksicht auf jene Probewürfel erwünscht, die nachher mit Messingblättchen bedeckt werden sollten und es musste, um gleiche Verhältnisse zu schaffen, auch bei den übrigen geschehen. In der That ist auch kein merkliches Eindringen des Messings der Blättchen in Unebenheiten der Oberflächen vorgekommen, wie daraus zu schliessen ist, dass die Blättchen nach dem Versuche nirgends an den Druckflächen haften blieben.

Zunächst standen 10 Probewürfel (1 Cement : 3 Sand) von früher her zur Verfügung, die zur Zeit der Prüfung, grade 6 Monate alt waren. Von diesen wurden 5 auf gewöhnliche Art (ohne Schmierung und Messingblättchen) und 5 mit Messingblättchen und aussen angebrachter Schmierung zerdrückt. Im ersten Falle betrug die Bruchlast: 14,8; 15,6; 15,9; 15,5; 15,0 Tonnen oder im Mittel **15,4** Tonnen oder **305,5 atm.**

Im zweiten Falle erhielt man dagegen: 7,6; 6,8; 7,2; 7,9; 7,6 Tonnen; oder im Mittel **7,4** Tonnen oder **146,8 atm.**

Hierzu bemerke ich noch, dass bei den zwei zuerst angeführten Würfeln, als die ersten Risse eingetreten waren und die von der Maschine angezeigte Last bereits zurückzugehen angefangen hatte, der Versuch abgebrochen und dieselben Würfel nachher auch noch, nach Entfernen der Blättchen, auf gewöhnliche Art ohne Schmierung vollends zerdrückt wurden. Beim ersten betrug die hierzu erforderliche Bruchlast 15,0 t, also fast dasselbe wie bei den unbeschädigten Würfeln der ersten Serie, beim zweiten 10,4 t. Der zweite war offenbar schon beim vorhergehenden Versuche zu stark beschädigt worden.

Ferner liess ich aus einem früher übrig gebliebenen Cementreste 40 Würfel im Mischungsverhältnisse 1:3 anfertigen, die auf die vorher aufgezählten vier Serien zu gleichen Theilen vertheilt wurden. Die Prüfung erfolgte 28 Tage nach der Anfertigung. Allerdings stellte sich dabei heraus, dass der Cement wegen zu langen Lagerns gelitten hatte, da die auf gewöhnliche Art ermittelte Druckfestigkeit nur 92 atm betrug. Für den Zweck, um den es sich hier handelt, bleibt dies aber gleichgültig; um so mehr als die bereits angeführten Versuche mit einem Cemente von sehr hoher Festigkeit für die beiden Versuchsbedingungen, um deren Vergleich es sich vorwiegend handelt, ein ähnliches Verhältniss zwischen den Bruchlasten ergaben, wie bei dem geringwerthigeren Cemente.

Die Versuchsergebnisse sind folgende:

I. Serie: auf gewöhnliche Art zerdrückt, Bruchlasten: 4,85; 5,05; 4,70; 4,25; 4,80; 4,45; 4,30; 4,25; 4,75; 4,82; im Mittel **4,622** Tonnen oder **92 atm.**

II. Serie: mit geschmierten Druckflächen zerdrückt, Bruchlasten: 2,70; 2,60; 2,65; 2,30; 1,95; 2,24; 2,02; 2,40; 2,75; 2,35; im Mittel **2,396** Tonnen oder **47,5 atm.**

III. Serie: mit Beilagen aus dünnem Messingblech, das auf der Aussenseite mit einer Schmierschicht versehen war; Bruchlasten: 2,52; 3,15; 2,98; 2,62; 2,10; 2,85; 2,90; 2,68; 2,05; 2,15; im Mittel **2,60** Tonnen oder **51,6 atm.**

IV. Serie: mit Beilagen aus dünnem Messingblech, ohne Schmierung, Bruchlasten: 4,20; 4,75; 4,04; 4,30; 4,15; 4,36; 4,25; 4,50; 4,30; 4,10; im Mittel **4,295** Tonnen oder **85,2 atm.**

Aus diesen Versuchen folgt, dass die Festigkeit eines Cementwürfels durch Beilage eines Messingblättchens nicht viel geändert wird, dass dagegen eine Schmierung, gleich-

gültig, ob sie unmittelbar auf der Druckfläche oder unter Zwischenschiebung eines Messingblättchens erfolgt, die Festigkeit bedeutend und zwar fast um die Hälfte herabsetzt. Man wird sich hiernach schwerlich dem Schlusse

entziehen können, dass nicht das Eindringen der Schmiere in die Poren, sondern die Vermeidung der Reibungen in Verbindung mit der geänderten Druckvertheilung die Festigkeit bei geschmierten Druckflächen herabsetzt.

II.

Prüfung einer gusseisernen Säule auf Ausknicken.

Im Sommersemester 1899 wurde eine 5,105 m hohe, auf Tafel VI gezeichnete Säule aus Gusseisen von 170 mm äusserem Durchmesser, 373 kg Gewicht und angeblich 14 mm Wandstärke an das Laboratorium mit dem Antrage eingesendet, sie einer Probelastung von 40 t zu unterwerfen und über die dabei hervortretenden Erscheinungen zu berichten. Die Probelast betrug nach Mitteilung des Antragstellers das Dreifache jener Belastung, die die Säule später aufnehmen sollte. Da an Probekörpern von solcher Grösse nur selten genauere Messungen ausgeführt werden, nehme ich an, dass die Mitteilung der Versuchsergebnisse für weitere Kreise von Interesse sein wird.

Der Versuch wurde in der grossen vertikalen Presse des Laboratoriums vorgenommen, die für Längen von etwas über 5 m grade noch ausreicht. Die Abbildungen 1 und 2 auf Tafel VI geben zwei Ansichten der Säule und Abb. 3 einen Schnitt im Massstabe 1:20. Die 4 runden Stangen, von denen die Säule umgeben ist, gehören zum Gestelle der Maschine, von der im Uebrigen nur die Widerlagsplatte am oberen Ende und die Druckplatte unter dem Säulenfusse in schematischer Zeichnung angegeben sind.

Fuss- und Kopfplatte der Säule waren nicht gehobelt, sondern rauh vom Guss und daher nur unvollkommen eben. Zur Druckausgleichung wurde daher unten eine etwa 1 cm starke Filzplatte, oben ein Pappdeckel von etwa 3 mm Stärke beigelegt. Die für gewöhnlich um ein Kugelgelenk drehbare untere Druckplatte wurde während des Versuchs mit Hilfe der an ihr zu diesem Zwecke angebrachten Stellschrauben festgestellt, so dass sie sich nicht um das Gelenk zu drehen vermochte. Abgesehen von den nachgiebigen Beilagen unter dem Säulenfusse und über der Kopfplatte wurde daher der Versuch so ausgeführt, dass er den bei der praktischen Anwendung einer Säule unter den gewöhnlichen Umständen (Stützung an beiden Enden gegen einen in horizontaler Richtung unverschieblichen Rahmen) vorliegenden Verhältnissen entsprach.

Die Messvorrichtungen glichen im Wesentlichen den früher bei der Ausführung von Knickversuchen mit Winkel-Eisen von mir angewendeten, worüber eine ausführliche

Beschreibung im 25. Hefte dieser „Mittheilungen“ zu finden ist. Die seitlichen Bewegungen der Säulenmitte wurden, wie damals, mit Hilfe von zwei rechtwinklig zu einander angeordneten Bauschinger'schen Rollenfühlhebeln gemessen. Ein Skalentheil entsprach einem Wege von $\frac{1}{50}$ mm und da auf Zehntel abgelesen wurde, erhielt man die Verschiebungen bis auf $\frac{1}{500}$ mm. Die Genauigkeit der Messung ist indessen, wie aus den in den Tabellen mitgetheilten Zahlen hervorgeht, niedriger und höchstens auf etwa $\frac{1}{100}$ mm zu veranschlagen, wobei verschiedene Fehlerquellen mitgewirkt haben mögen. Eine besondere Erörterung hierüber erscheint indessen entbehrlich, da auch eine geringere Genauigkeit noch vollständig ausreicht, um ein deutliches Bild von dem Verhalten der Säule zu geben.

Die Messung der elastischen Verkürzung, die die Säule unter der Last erfuhr, gestaltete sich hier erheblich einfacher, als früher bei den Versuchen mit den Winkel-eisen. Mit Hilfe von Klemmschrauben wurde sowohl in der Nähe des Fuss- als des Kopfes der Säule ein ringförmiger Rahmen angebracht, dessen Gestalt aus Abb. 5 zu entnehmen ist. Von dem oberen Ring hingen zwei an den Enden mit Messingtheilen armierte hölzerne Stangen herab, die sich oben um Spitzen drehen konnten und unten Zungen trugen, die auf den Rollen von zwei Fühlhebeln auflagen. Diese Fühlhebel waren an dem unteren ringförmigen Rahmen gelagert. In Abb. 4 ist auf der linken Hälfte die Befestigung des oberen Stangenendes, auf der rechten Hälfte die Lagerung des Rollenfühlhebels, sowie das untere Stangenende mit der sich auf die Rolle legenden Zunge dargestellt. Um einen angemessenen Druck zwischen der Zunge und dem Rollenumfange hervorzu-bringen, wurde an jeder Stange ein kleines Gewicht an einem seitlich hervorragenden Arme angebracht, das in Abb. 1 mit G bezeichnet ist. — Die Entfernung der beiden ringförmigen Rahmen, also die Länge der Säule, auf die sich die Messung der Verkürzung erstreckte, betrug 4,805 m.

Biegt sich die Säule unter der Einwirkung der Last ein wenig seitlich aus, so stimmt die Verkürzung der Säulenaxe mit der Bewegung eines der beiden Rollen-

apparate nicht überein. Vielmehr wird an jenem Apparate, dem sich die Hohlseite der Biegungslinie zukehrt, wie man leicht einsieht, die Ablesung zu gross, an jenem auf der anderen Seite dagegen zu klein gefunden. Da aber stets an beiden, auf gegenüberliegenden Seiten angebrachten Rollenführlhebeln abgelesen wurde, hob sich der Fehler aus dem Mittel beider Ablesungen heraus. Auch bei diesen Apparaten entsprach ein Skalentheil einem Wege von $\frac{1}{50}$ mm. Las man auf Zehntel ab und bildete an Stelle des arithmetischen Mittels die Summe aus beiden Ablesungen, so erhielt man die Verkürzungen bis auf Tausendstel mm. Aber auch hier ist die Genauigkeit der Messung höchstens auf etwa $\frac{1}{100}$ mm zu schätzen.

Endlich waren noch mit dem Fussende der Säule, wie aus den Abb. 1 und 2 zu entnehmen ist, zwei kleine Spiegel *S* fest verbunden, in denen man durch Fernrohre die Bilder senkrechter Massstäbe beobachtete. Die Ablesung ergab ein Mass für den Winkel, um den sich das Säulenende, sei es wegen der Nachgiebigkeit der untergelegten Filzplatte, sei es wegen geringer elastischer Formänderungen des Maschinengestells zu drehen vermocht hatte. Für den Fall einer vollkommenen Einspannung des Säulenendes hätte dieser Winkel gleich Null sein müssen. Thatsächlich ergaben sich aber merkliche Drehungen, die, wie sich noch zeigen wird, durchaus mit jenen vergleichbar sind, die man bei einer Spitzenlagerung hätte erwarten können. Hiermit bestätigt sich die schon oft ausgesprochene Vermuthung, dass die Wirksamkeit der durch eine Flächenlagerung bedingten Einspannung unter gewöhnlichen Umständen nicht hoch zu veranschlagen ist. Denn auch bei den praktischen Ausführungen der Säulenfundamente dürfte ein solches Mass von Beweglichkeit, wie es beim Versuche durch die Filzunterlage ermöglicht war, gewöhnlich vorliegen. — Leider liess sich die Drehung des oberen Säulenendes nicht verfolgen, da es in dieser Höhe an einem sicheren Beobachtungsposten fehlte.

Zuerst wurde die Säule mit der vorgeschriebenen grössten Belastung von 40 t geprüft, ohne dass Messungen vorgenommen wurden. Wegen der Lebensgefahr, in der sich die Beobachter im Falle eines Bruchs der Säule befunden hätten, musste davon abgesehen werden, obschon es von besonderem Interesse gewesen wäre, die bleibenden Formänderungen beim ersten Aufbringen der Belastung festzustellen. Hierauf wurde die in Tabelle I wiedergegebene Versuchsreihe ausgeführt, der sich nach zwei Tagen eine Wiederholung des ganzen Versuchs anschloss, bei der die in Tabelle II zusammengestellten Ergebnisse erhalten wurden.

Beim Vergleiche beider Tabellen ist übrigens zu beachten, dass die Säule, so lange sie nicht belastet war,

in horizontaler Richtung ein wenig schwanken konnte. Bei der Wiederholung des Versuchs blieb daher zweifelhaft, ob man in beiden Fällen genau von derselben Säulenstellung in der Maschine ausging. Aus diesem Grunde wurde auch die Säule am Schlusse jedes Versuchs nicht vollständig entlastet, sondern man liess noch eine geringe Belastung von etwa 1 t auf ihr ruhen. Freilich muss hierzu bemerkt werden, dass die Einrichtung der Maschine die beim Abwärtsteigen zurückbleibende Last nicht mit der gleichen Genauigkeit zu erkennen gestattet, wie beim Aufwärtssteigen. Die Angabe der Restlast von 1 t beruht daher nur auf einer ungefähren Schätzung, die leicht um einige Zehntel unsicher sein kann.

Auch auf die seitlichen Bewegungen der Säulenmitte bei der ersten Belastungsstufe von 0—5 t dürfte nicht viel Werth zu legen sein, da sich die Säule während des Aufbringens der ersten Lasten vielleicht erst richtig in's Loth stellte, wobei ihr die anfänglich grössere Nachgiebigkeit der Beilagen zu Hülfe kommen konnte. — Die grössten Bewegungen der Säulenmitte erfolgten zunächst in der Richtung „vorne-hinten“. Dass man es hierbei in der That mit einer Verbiegung der Säule und nicht etwa bloss mit Verschiebungen zu thun hatte, die durch die nachgiebigen Unterlagen ermöglicht gewesen wären, ergibt sich am deutlichsten aus den starken Unterschieden in den Ablesungen der zur Messung der Verkürzung vorn und hinten angebrachten Rollenführlhebel. Allmählich nahm aber diese Bewegung stark ab, vermuthlich wegen einer Aenderung in der Anlage der Kopfplatte, da der nach vorn gerichtete Spiegel des Fussendes unregelmässige Drehungen ausführte, die keine Erklärung dafür zu geben vermögen.

Die Bewegung der Säulenmitte in der Richtung „links-rechts“ zeigte dagegen — abgesehen von der anfänglichen Bewegung bei der ersten Laststufe — stetig wachsende Ausbiegungen, die bei einer weiteren Erhöhung der Belastung wahrscheinlich zu einem Ausknicken ungefähr nach dieser Richtung hin geführt haben würden. Diese Bewegung war unverkennbar mit einer Drehung des Fussendes der Säule verbunden. Die Ablesung an dem nach links gerichteten Spiegel wanderte stets in der gleichen Richtung weiter, wenn auch nicht in so regelmässigem Gange, wie die Ausbiegung der Säulenmitte selbst. Da sich die Ablesung jedesmal nur um Bruchtheile eines Skalentheiles änderte, mögen übrigens Ablesungsfehler (die Ablesungen wurden von Studierenden besorgt) hierbei eine nicht unwesentliche Rolle gespielt haben.

Zur Vermeidung von Missverständnissen möchte ich hier übrigens noch ausdrücklich hervorheben, dass in den Tabellen überall nur jene Bewegungen ausgerechnet sind, die zu der vorgenommenen Belastungsänderung gehören. Die Gesamtwege ergeben sich daher erst aus der Sum-

mirung der Einzelwege. Hierbei fällt mir ein, dass einer der Herren, die an meinen Arbeiten — sei es auf eigenen Antrieb, sei es auf Anregung von geschätzter Seite her, wie ich annehmen möchte — herum mäkelten, auch daran Anstoss nahm, dass ich in meinen Abhandlungen über die Biegungselasticität der Steine das Wort „addieren“ in einem Falle gebrauchte, bei dem augenscheinlich die im entgegengesetzten Sinne gerichteten Bewegungen ihrem Absolutwerthe nach subtrahiert werden mussten. Es wird daher gut sein, wenn ich hier ausspreche, dass ich mir bei meinen

Ausarbeitungen stets Leser vorstelle, die die übliche mathematische Ausdrucksweise so weit beherrschen, dass ihnen der Gebrauch des Wortes „Summe“ in dem allgemeineren Sinne der „algebraischen Summe“ zu keinen Schwierigkeiten Veranlassung gibt.

Zwischen den Ausbiegungen f der Mitte eines auf Ausknicken beanspruchten Stabes, der anfänglich schon eine kleine Krümmung nach einer Seite hin hatte und den Drehungen φ eines Stabendes besteht für den Fall der Spitzenlagerung die Beziehung (man vgl. z. B. meine

Tabelle I.

Last in t	Messung der Verkürzung					Ausbiegung der Mitte				Spiegel am Fussende			
	Apparat vorn		Apparat hinten		Verkürzung in $\frac{1}{100}$ mm	Apparat vorn		Apparat rechts		Spiegel vorn		Spiegel links	
	Ablesung	Bewegung	Ablesung	Bewegung		Ablesung	Bewegung in $\frac{1}{100}$ mm	Ablesung	Bewegung in $\frac{1}{100}$ mm	Ablesung	Bewegung	Ablesung	Bewegung
0	3,2	—	1,9	—	—	152,5	—	149,1	—	344,9	—	333,2	—
5	25,7	22,5	7,6	5,7	28,2	93,2	-118,6	141,4	-15,4	344,0	-0,9	333,3	+0,1
10	41,0	15,3	20,2	12,6	27,9	78,2	-30,0	146,5	+10,2	344,0	0,0	334,0	+0,7
15	55,3	14,3	35,2	15,0	29,3	69,5	-17,4	152,7	+12,4	344,0	0,0	334,1	+0,1
20	69,7	14,4	50,3	15,1	29,5	65,5	-8,0	160,4	+15,4	344,0	0,0	334,7	+0,6
25	85,1	15,4	65,9	15,6	31,0	61,6	-7,8	169,6	+18,4	344,0	0,0	335,0	+0,3
30	99,1	14,0	80,8	14,9	28,9	57,9	-7,4	179,2	+19,2	344,0	0,0	335,1	+0,1
35	113,7	14,6	95,8	15,0	29,6	53,3	-9,2	189,4	+20,4	344,1	+0,1	335,8	+0,7
40	129,7	16,0	112,0	16,2	32,2	50,9	-4,8	200,7	+22,6	344,1	0,0	336,0	+0,2
ca. 1 t	5,5	-124,2	1,6	-110,4	-234,6	143,1	+184,4	155,5	-90,4	344,7	+0,6	333,1	-2,9

Tabelle II.

Last in t	Messung der Verkürzung					Ausbiegung der Mitte				Spiegel am Fussende			
	Apparat vorn		Apparat hinten		Verkürzung in $\frac{1}{100}$ mm	Apparat vorn		Apparat rechts		Spiegel vorn		Spiegel links	
	Ablesung	Bewegung	Ablesung	Bewegung		Ablesung	Bewegung in $\frac{1}{100}$ mm	Ablesung	Bewegung in $\frac{1}{100}$ mm	Ablesung	Bewegung	Ablesung	Bewegung
0	6,1	—	10,5	—	—	248,1	—	65,6	—	41,8	—	33,5	—
5	28,1	22,0	16,1	5,6	27,6	190,3	-115,6	60,3	-10,6	42,3	+0,5	33,5	0,0
10	43,1	15,0	28,5	12,4	27,4	174,5	-31,6	66,4	+12,2	42,3	0,0	34,0	+0,5
15	57,1	14,0	43,2	14,7	28,7	166,3	-16,4	72,1	+11,4	42,1	-0,2	34,2	+0,2
20	71,9	14,8	58,7	15,5	30,3	161,8	-9,0	80,4	+16,6	42,1	0,0	34,9	+0,7
25	87,0	15,1	73,8	15,1	30,2	158,7	-6,2	89,2	+17,6	42,0	-0,1	35,0	+0,1
30	101,6	14,6	89,4	15,6	30,2	154,6	-8,2	99,3	+20,2	42,0	0,0	35,2	+0,2
35	116,5	14,9	104,7	15,3	30,2	149,9	-9,4	109,7	+20,8	42,0	0,0	36,0	+0,8
40	132,6	16,1	121,0	16,3	32,4	147,5	-4,8	121,4	+23,4	42,0	0,0	36,1	+0,1
ca. 1 t	7,6	-125,0	9,9	-111,1	-236,1	239,6	+184,2	74,7	-93,4	41,8	-0,2	33,3	-2,8

„Vorlesungen über technische Mechanik, Bd. III Festigkeitslehre“, Gl. (262) S. 347).

$$\varphi = \pi \frac{f}{l}$$

wenn mit l die Stablänge bezeichnet wird. Mit dieser

Formel mögen die in der Richtung „links-rechts“ tatsächlich beobachteten Biegungspfeile und die zugehörigen Drehungen des nach links gekehrten Spiegels verglichen werden. Aus bereits früher angegebenen Gründen wird man hierbei die bei den ersten Laststufen beobachteten

Werthe ausschliessen müssen. Um ferner den Einfluss der Beobachtungsfehler, namentlich bei den Werthen des Drehungswinkels, herabzusetzen, seien die zur Steigerung der Last von 20 bis auf 40 t gehörigen Werthe von f und φ mit einander verglichen. Im Mittel aus beiden Beobachtungsreihen findet man aus den Tabellen I und II

$$f = 0,813 \text{ mm} \quad \text{und} \quad \varphi = 1,25 \text{ mm}$$

wobei der Winkel φ zunächst in den Ablesungen am Massstabe ausgedrückt ist. Nach der Formel würde man dagegen für $f = 0,813 \text{ mm}$ erhalten

$$\varphi = \pi \cdot \frac{0,813}{5105} = 500 \cdot 10^{-6}$$

wobei hier der Winkel in Bogenmass ausgedrückt ist.

Die Entfernung des Spiegels vom Massstabe betrug 1500 mm. Da sich der Drehungswinkel wegen der Spiegelung in der Ablesung verdoppelt, würde der angegebene Winkel φ einer Ablesung von

$$2 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = 1,5 \text{ mm}$$

entsprechen, also nicht viel mehr, als die in Wirklichkeit gefundene Ablesung von 1,25 mm. Jedenfalls zeigt dieser Vergleich, dass unter den vorher näher beschriebenen Versuchsbedingungen Drehungen des Säulenendes möglich sind, die an dieselbe Grössenordnung heranreichen, wie sie bei gleichen Ausbiegungen der Säulenmitte im Falle der Spitzenlagerung zu erwarten ist.

III.

Das elastische Verhalten des Erdbodens.

Schon im Jahrgange 1897 des Centralblatts der Bauverwaltung, S. 276 habe ich über Versuche berichtet, die zu dem Zwecke angestellt wurden, die elastischen Formänderungen, die der Erdboden erfährt, wenn Lasten auf ihm aufgestellt werden, durch genaue Messungen zu verfolgen. Auch in meiner „Festigkeitslehre“ bin ich auf diese Versuche kurz eingegangen und Besuchern meines Laboratoriums habe ich die Versuche öfters — einer grösseren Zahl angesehener Fachgenossen erst kürzlich noch bei Gelegenheit der Münchener Naturforscherversammlung — und gerne vorgeführt. Auch in die regelmässigen Laboratoriumsübungen für die Studirenden unserer Hochschule habe ich die Versuche mit aufgenommen.

Ich habe stets gefunden, dass diese Versuche lebhaftes Interesse erregten. Wenn sich auch bisher weitergehende Schlüsse kaum an sie angeknüpft haben, darf man doch wohl erwarten, dass sich bei passender Verwerthung manche nützliche Anwendung daraus ziehen liesse. Ich möchte desshalb nicht unterlassen, nun auch noch in den „Mittheilungen“, in denen man Berichte über die im hiesigen Laboratorium ausgeführten experimentellen Arbeiten in erster Linie zu finden erwarten wird, auf die Versuche zurückzukommen. Dies wäre jedenfalls schon früher geschehen, wenn ich nicht beabsichtigt hätte, die Versuche vorher noch weiter auszudehnen. Nachdem ich aber in Erfahrung gebracht hatte, dass der Boden im Hofe meines Laboratoriums schon öfters an verschiedenen Stellen aufgegraben worden war und von einer Anzahl unterirdischer Leitungen durchzogen ist, von denen ich anfänglich nichts wusste, habe ich die Absicht aufgegeben. Ich dachte zwar eine Zeit lang daran, die Versuche an einer hierfür geeigneteren Stelle fortzusetzen, musste aber schliesslich wegen der Unbequemlichkeiten und Zeitverluste,

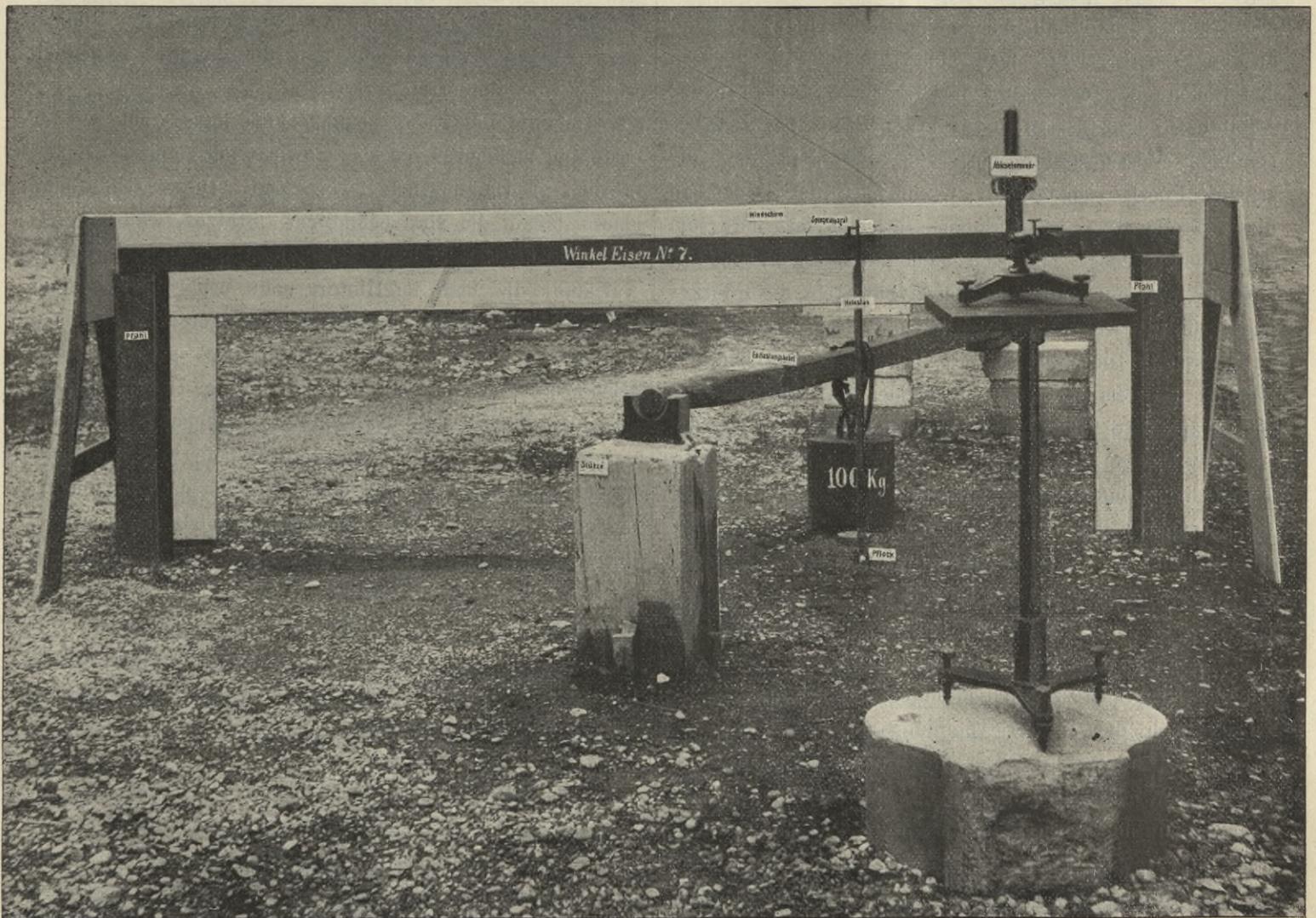
die damit verbunden gewesen wären, davon absehen. Vielleicht nimmt man an einem anderen Orte, unter günstigeren Vorbedingungen die Sache wieder auf. Für einen solchen Fall würde es jedenfalls von Nutzen sein, die hiesigen Einrichtungen, die sich — abgesehen von dem ungünstigen Versuchsterrain, an dem sich nichts ändern lässt — recht gut bewährt haben, etwas näher kennen zu lernen, als es aus der früheren Veröffentlichung möglich ist. Dies dürfte am besten an der Hand des nach einer photographischen Aufnahme angefertigten Bildes möglich sein.

Ehe ich mich zu dessen Beschreibung wende, möchte ich noch erwähnen, nach welchen Richtungen hin für den Fall einer Wiederaufnahme der Versuche Ergänzungen meiner Beobachtungen am meisten geboten sein dürften. Zunächst ist klar, dass es wünschenswerth wäre, die Versuche mit verschiedenen Bodenarten zu wiederholen. Hierbei wäre auch auf den Einfluss des Feuchtigkeitsgrades (nach längerem Regen oder nach trockenem Wetter) zu achten, ebenso auf das Verhalten des gefrorenen Bodens (nach starkem Froste). Ferner wäre noch genauer festzustellen, welche Abweichungen von der Proportionalität zwischen Lasten und Formänderungen auftreten, wobei auch die elastischen Nachwirkungen (die freilich ziemlich unerheblich zu sein scheinen) entsprechend zu berücksichtigen wären. Schliesslich wäre noch nöthig, die sich bisher nur auf die Verschiebungen in senkrechter Richtung erstreckenden Messungen auch auf die wagerechten Verschiebungen, also auf die elastischen Längenänderungen von horizontalen Strecken, die in radialer oder tangentialer Richtung zum Lastangriffspunkte liegen, auszudehnen. Unter Voraussetzung geeigneter Vorbedingungen dürfte dem kein Hinderniss im Wege stehen.

Man sieht aus dieser Aufzählung, der sich leicht noch der eine oder andere „fromme Wunsch“ anreihen liesse, wie umfangreich das Programm ist, das noch erledigt werden müsste, ehe die Versuche als abgeschlossen gelten könnten. Wenn ich nun auch anfänglich beabsichtigt hatte, alle diese Versuche, soweit sie sich im Bannkreise des Laboratoriums ausführen liessen, nach und nach vorzunehmen, so wird man doch begreifen, dass ich von der Absicht zurückkam, eine so umfangreiche Arbeit auf mich zu nehmen, nachdem ich von der wenig einwandfreien Beschaffenheit des mir zu Gebote stehenden Versuchsobjekts erfahren hatte. Es wäre in der That schade

darum, so viel Mühe auf die Erlangung eines Resultats zu verwenden, das in den genaueren Einzelheiten doch nur als zweifelhaft gelten könnte.

Wie man aus dem Lichtdruckbilde erkennt, besteht die Versuchseinrichtung in der Hauptsache aus einem Gerüste, das aus zwei in den Boden eingegrabenen Pfählen und einer darüber gelegten Eisenschiene von L-förmigem Querschnitte gebildet wird. Der Abstand der Pfähle beträgt rund 3 m und die Höhe der Schiene über dem Boden etwa 70 cm. Die Schiene gibt die Abscissen-Axe ab, von der aus die elastischen Senkungen des unter ihr liegenden Bodens gemessen werden. Natürlich muss man



dafür sorgen, dass Bewegungen der Schiene selbst nach Möglichkeit vermieden werden. Zu diesem Zwecke hat es sich als nöthig herausgestellt, das ganze Gerüst mit einem aus Holzbrettern zusammengestellten Windschirme zu umgeben. Der geringe Winddruck selbst bei wenig bewegter Luft genügt nämlich andernfalls bereits, um elastische Bewegungen des Winkeleisens hervorzubringen, die von nahezu gleicher Grössenordnung mit den zu messenden Einsenkungen sind. Ausserdem werden durch den Windschirm zugleich Wärmestrahlungen ferngehalten,

die in ähnlicher Weise wirken könnten. Dass die ganze Vorrichtung überdies während des Versuchs im Schatten liegen muss und dass man bei stürmisch bewegter Luft keine Messungen vornehmen kann, ist selbstverständlich. Für den Zweck der Photographie wurden die nach vorn und nach oben hin liegenden Bretter des Windschirms entfernt; man hat sich diese daher hinzu zu denken. Das dem Ablesefernrohre zugekehrte Brett ist mit einigen kleinen Löchern versehen, durch die man den Spiegelapparat beobachten kann.

Ferner muss man darauf achten, dass in der Nähe der Pfähle, die die Eisenschiene tragen, keine Lasten aufgestellt werden. Eine Person, die sich in der Nähe eines solchen Pfahls aufstellt, bewirkt, dass sich der Boden und mit ihm der Pfahl, also auch die Eisenschiene auf dieser Seite etwas senken. Dadurch würden natürlich die Messungen gefälscht. Es ist erwünscht, dass alle beweglichen Lasten um mindestens etwa 1 m Entfernung von jedem Pfahle bleiben. Immer liess sich dies freilich nicht ganz erreichen. Jedenfalls sind aber die Fehler bei Entfernungen bis zu etwa 80 cm vom Pfahle im Resultate schon recht bemerklich, wie aus den folgenden Zahlenangaben deutlich genug hervorgehen wird.

Irgendwo unterhalb der Schiene (aber nicht zu nahe an den Enden) schlägt man einen kleinen Holzpflock in den Boden, der nur wenig darüber hervorsteht. In der Abbildung ist an der Stelle, wo der Pflock bei dem betreffenden Versuche sitzt, ein kleiner Zettel mit der Aufschrift „Pflock“ angebracht. Wenn sich der Boden an dieser Stelle etwas senkt, nimmt er den fest mit ihm verbundenen Pflock mit sich nach abwärts. Es handelt sich also jetzt nur darum, die Relativbewegung des Pflockes gegen die als Abscissen-Axe dienende Eisenschiene genau zu messen. Dies konnte mit bekannten Hilfsmitteln, nämlich mit dem auf den vorliegenden Fall übertragenen Spiegelapparate von Bauschinger ohne Weiteres geschehen.

Der Spiegel sitzt in einer Messingfassung, die an die Eisenschiene angeklemt wird. In der Abbildung ist der Spiegelapparat leider nicht ganz deutlich herausgekommen. Er hat aber im Uebrigen ganz dieselbe Einrichtung wie bei den bekannten Bauschinger'schen Spiegelmessvorrichtungen. Ein Zettel mit entsprechender Aufschrift ist neben ihm angebracht. Die Verbindung zwischen dem Röllchen des Spiegels und dem unter ihm liegenden Pflocke wird durch den in der Abbildung deutlich sichtbaren „Holzstab“ hergestellt. Der Anschluss des Holzstabs an den Pflock wird durch eine kleine Messingfassung bewirkt, die an dem Pflocke festgeklemmt wird, während das untere Ende des Holzstabs um Spitzen drehbar darin gelagert ist. Das obere Ende des Holzstabs ist mit einem Metallstreifen versehen, auf den ein Stückchen Schmirgelpapier aufgeklebt wird. Dieses ruht auf dem Umfange des Spiegelröllchens auf. Um einen angemessenen Auflagerdruck herzustellen, bringt man seitlich in der Mitte des Holzstabs ein kleines Uebergewicht an, das sich in der Figur mit den Stricken des grossen Belastungsgewichts überdeckt und daher nicht ganz deutlich sichtbar ist.

Der Rollendurchmesser des Apparats beträgt 6,8 mm, der Abstand zwischen dem Spiegel und dem Massstabe des Ablesefernrohres 2 m. Eine Verschiebung des Massstabbildes gegen das Fadenkreuz des Fernrohres um einen

Theilstrich der Millimeter-Theilung entspricht daher einer Senkung des Bodens, in dem der Holzpflock steckt, um $0,835 \cdot 10^{-3}$ mm; man liest also die Bodensenkungen in rund 1200 facher Vergrösserung unmittelbar im Fernrohre ab.

Zur Belastung des Bodens wurde gewöhnlich ein gusseisernes Gewicht von 100 kg verwendet, das in Abständen von 20, 40, 60 oder 80 cm vom Holzpflocke aufgestellt wurde. Zu diesem Zwecke wurden runde Holz-scheiben von 10 cm Durchmesser auf den zuvor etwas geebneten Boden gelegt und in den angegebenen Abständen mit einigen Nägeln an dem Boden leicht befestigt. In der Abbildung sieht man nur die dem Pflocke nächste Scheibe; auf der folgenden, in 40 cm Abstand vom Pflocke sitzt das Belastungsgewicht und die dahinter folgenden werden von diesem verdeckt.

Um die Belastung bequem aufbringen und wieder entfernen zu können, ist das Gewicht mit einigen Stricken an dem „Entlastungshebel“ befestigt. Dieser stützt sich einerseits auf die vorn befindliche „Stütze“, während das hintere Ende auf einem der beiden verschieden hohen Aufbaue, die man im Hintergrunde erblickt, aufgelegt werden kann. Liegt er auf dem niedrigeren auf, so sind die Stricke locker und das Gewicht sitzt auf der Holz-scheibe auf; im anderen Falle schwebt das Gewicht etwas über dem Boden. Mit Hilfe dieser einfachen Vorrichtung vermag man das Gewicht rasch hintereinander wiederholt aufzusetzen und zu entfernen, ohne dass sich das Bedienungs-personal in die Nähe der belasteten Stelle oder des Gerüsts der Messvorrichtung zu begeben braucht. Dass man darauf achten muss, beim Aufsetzen des Gewichtes Stösse zu vermeiden, ist selbstverständlich. Unter günstigen Versuchsbedingungen (windstilles Wetter, keine Erschütterungen des Bodens durch in der Nähe vorüberfahrende Wagen u. s. f.) erhält man bei mehrfacher Wiederholung des Versuchs ganz gut constante Resultate.

Als Mittel aus meinen früheren Versuchen fand ich für die Bodensenkungen in verschiedenen Entfernungen von der Auflagerungsstelle des Belastungsgewichtes von 100 kg die folgenden, schon an einigen Orten veröffentlichten Werthe:

Entfernung in cm	=	20	40	60	80
Bodensenkung in $\frac{1}{1000}$ mm	=	18,3	4,1	1,4	0,6

Aus den schon vorher erörterten Gründen halte ich diese aber jetzt für weniger zuverlässig, als die folgenden, die sich auf eine Stelle des Hofraums meines Laboratoriums beziehen, von der ich annehmen zu können glaube, dass sie von den Störungen in der gleichmässigen Beschaffenheit des Bodens noch am meisten frei ist, nämlich

Entfernung in cm	=	20	40	60	80
Bodensenkung in $\frac{1}{1000}$ mm	=	14,2	4,25	1,4	0,7

Für ein Belastungsgewicht von 50 kg wurde ferner an der gleichen Stelle im Abstände von 20 cm die Bodensenkung zu 7,3 Tausendstel Millimeter gefunden. Da die Decimalstellen nicht mehr als sicher betrachtet werden können, würde hiernach die Bodensenkung unter den angegebenen Umständen als proportional mit der Belastung anzusehen sein.

Näher als 20 cm kann man bei der beschriebenen Versuchseinrichtung mit der Belastung nicht wohl an den Pflock herangehen. Man müsste nämlich dann schon in Berücksichtigung ziehen, dass sich die Last auf eine gewisse Fläche vertheilt, und nicht in einem einzigen Punkte concentrirt werden kann. Allerdings habe ich, um dem abzuweichen, auch noch eine etwas abgeänderte Versuchseinrichtung getroffen. Ich liess nämlich an Stelle des Holzpflocks einen Gusseisenklotz in den Boden ein, stellte die Gewichte auf diesen und mass nun die Einsenkung des Gusseisenklotzes. Dies geschah natürlich von zwei Seiten her, um die durch Drehungen des Klotzes verursachten Fehler auszugleichen. Diese Versuche haben

mich aber nicht recht befriedigt. Ich erwähne nur, dass man in diesem Falle ziemlich grosse Bodensenkungen (bis zu $\frac{1}{10}$ mm hinauf oder auch noch höher) findet, dass ferner die Senkungen etwas schneller als die Lasten zu wachsen scheinen, und dass sich hierbei auch elastische Nachwirkungen (von übrigens nicht sehr erheblichem Betrage) zeigen. Die Ziffern waren mir aber nicht constant genug; offenbar spielten noch Fehlerquellen mit, die zuvor beseitigt werden müssten, wenn man Vertrauen zu den Messungen haben sollte. Da ich nachher die Weiterführung der Versuche einstellte, blieb auch diese Untersuchung unvollendet. Ich möchte meinen geschätzten Herren Gegnern nicht gerne Gelegenheit geben, mit mehr Recht als in früheren Fällen die Unsicherheit von Versuchsziffern zu betonen, die von mir veröffentlicht sind und sehe daher lieber davon ab, die Ergebnisse meiner Vorversuche hier im Einzelnen mitzutheilen. Vielleicht nimmt man späterhin an einem anderen Orte unter geeigneteren Bedingungen und dann wohl auch mit mehr Erfolg diese Messungen von Neuem wieder auf.

IV.

Probebelastung von Decken.

Unter der gleichen Ueberschrift hat vor Kurzem Herr Abtheilungsvorsteher M. Gary bei den technischen Versuchsanstalten in Berlin in den „Mittheilungen“ dieser Anstalten (17. Jahrgang 1899, S. 115) einen Aufsatz veröffentlicht, von dem Auszüge, die auch mit weiteren Bemerkungen verknüpft waren, in verschiedene Fachblätter übergegangen sind. An einigen Stellen war dabei auch davon die Rede, dass die unsachgemässe Ausführung solcher Belastungsversuche durch einen Aufbau von Steinen u. dgl., die sich gegenseitig stützen und dadurch die Deke, deren Tragfähigkeit geprüft werden soll, entlasten, gelegentlich auch in Versuchsanstalten vorkomme. Da die Zahl der deutschen Versuchsanstalten, die hierbei in Betracht kommen können, nur gering ist, halte ich es für geboten, hier kurz darüber zu berichten, wie solche Prüfungen bisher im hiesigen Laboratorium ausgeführt wurden.

Herr Gary hat freilich in einer Anmerkung zu seiner Hauptabhandlung bereits selbst auf eine aus dem hiesigen Laboratorium stammende Veröffentlichung hingewiesen, die sich auf eine früher zu diesem Zwecke benutzte Einrichtung bezieht. Wenn er dabei hinzufügt, dass diese auch noch nicht einwandfrei sei, muss ich ihm zustimmen, zugleich aber erwähnen, dass ich dies sehr bald selbst herausfand und alle nach jener aus dem Jahre 1895 stammenden Veröffentlichung vorgenommenen Decken-

prüfungen auf ganz ähnliche Art ausführen liess, wie er dies jetzt selbst gemacht hat. Ich bemerke dies freilich nicht, um Herrn Gary die Priorität streitig zu machen, denn erstens kommt diese nach allgemeinem Brauche Jenem zu, der die Anordnung zuerst durch den Druck bekannt gemacht hat und zweitens ist der Uebergang von der früher benutzten Einrichtung zu der verbesserten so naheliegend, dass mir ein Streit darüber, wer diese Verbesserung zuerst benutzt hat, ganz gegenstandslos erschiene. Da aber jene Anmerkung des Herrn Gary in die auszugsweisen Berichte in den anderen Zeitschriften nicht mit übergegangen ist, halte ich es nicht für überflüssig, an dieser Stelle zu betonen, dass die verfehlte Anordnung des Belastungsversuchs, gegen die sich Herr G. in erster Linie und mit Recht wendet, im hiesigen Laboratorium niemals benutzt worden ist.

Mein Vorgänger Bauschinger hat Belastungsversuche mit vertheiltem Drucke nur selten ausgeführt. In den wenigen Fällen, bei denen dies geschah, benutzte er, wie mir Herr Assistent Klebe berichtet, eine Einrichtung, die, wenn auch nicht einwandfrei, so doch schon unvergleichlich besser ist, als das Aufpacken von Belastungsmaterial in hohen Schichten. Er legte nämlich auf den zu prüfenden Deckenabschnitt zunächst eine mit Seegras ausgestopfte Matratze und auf diese eine Holzfeder, die aus treppenförmig aufgebauten Brettern zusammengesetzt war, so

dass die Höhe der Feder in der Mitte am grössten war und nach den Enden der Spannweite hin allmählich abnahm. In der Mitte der Feder wurde die Belastung durch die Festigkeitsmaschine ausgeübt. Man konnte dann wegen der Nachgiebigkeit der Feder und vor Allem wegen der Zusammendrückbarkeit der Seegrasmatratze erwarten, dass sich der Druck auf die Decke ungefähr gleichförmig vertheilen würde. Ob und wie sich Bauschinger über das unter den geschilderten Umständen zu erwartende Druckvertheilungsgesetz (etwa durch eine theoretische Betrachtung, die ohne Schwierigkeit anzustellen wäre) Rechenschaft gegeben hat, vermag ich übrigens nicht zu sagen.

Von Versuchen im Laboratorium sind natürlich solche Versuche, die auf einer Baustelle vorgenommen werden und zu denen der Leiter einer Versuchsanstalt nur als Experte zugezogen wird, wohl zu unterscheiden. Hier muss man die Umstände hinnehmen, wie man sie findet. Zu verlangen ist in solchen Fällen nur, dass sich der Gutachter über die Mängel der Versuchseinrichtung klar ist und dies in seinem Berichte unumwunden ausspricht.

Der erste Versuch, den ich nach meinem Amsantritte im Laboratorium über die Tragfähigkeit einer Decken-Construction ausführte, war jener, über den Herr Bresztovszky, der ihm beiwohnte, mit meiner Zustimmung im Centralblatte der Bauverwaltung 1895, S. 434 berichtete. Die Vertheilung des Druckes wurde dabei durch einen Aufbau von Balkenabschnitten herbeigeführt, die in passender Weise über einander geschichtet waren. Es bedurfte hier nur noch einer Zwischenschaltung von Rollen, die eine senkrechte Lastübertragung an den Auflager-

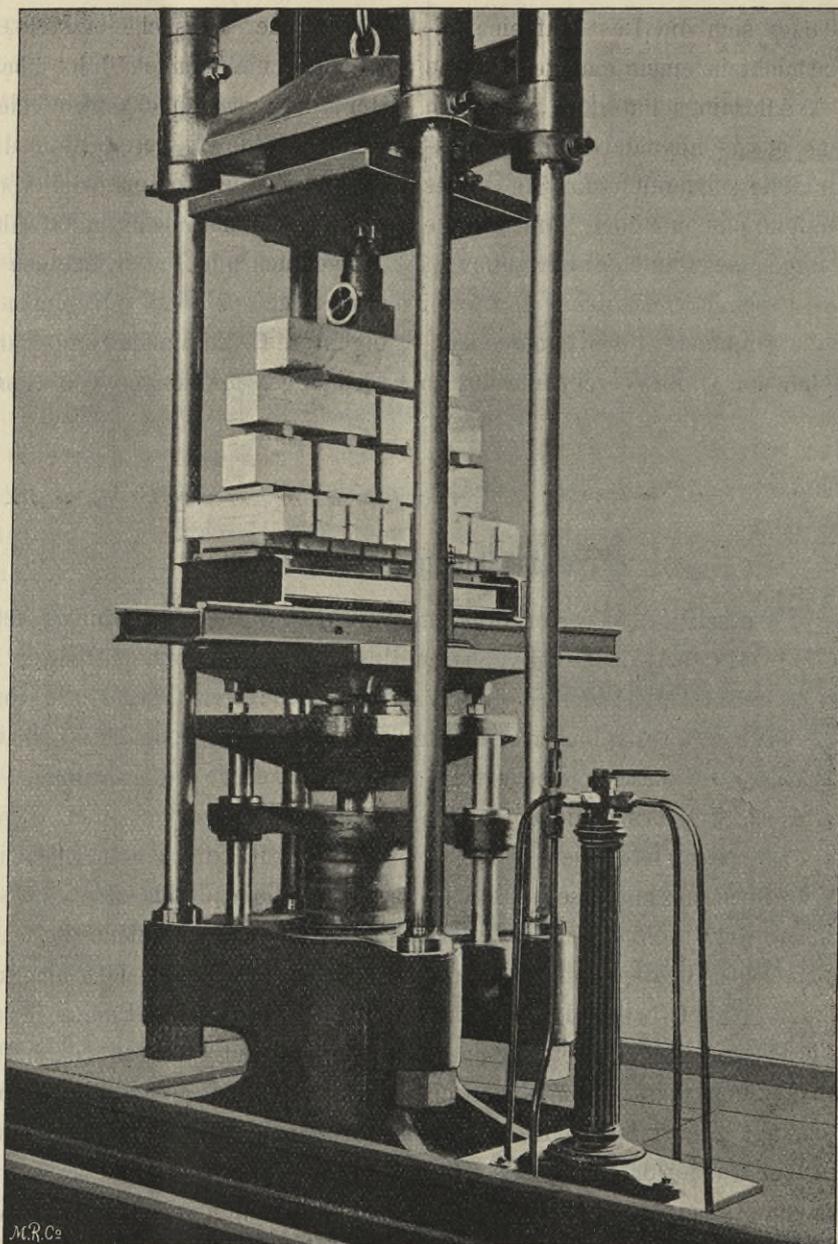
stellen verbürgen, um eine klare und einwandfreie Druckübertragung auf die Oberfläche der Decke herbeizuführen.

Als erst nach längerer Pause wieder ein Antrag auf Probelastung einer Decke einlief, führte ich die Zwischenschaltung der Rollen sofort aus, worüber in dem an Herrn Max Niggel in München am 16. Sept. 1897 ausgestellten Prüfungs-Zeugnisse Nr. 187 ausführlich (mit Beigabe einer Zeichnung) berichtet ist. Von da ab wurde diese Anordnung stets beibehalten. So führe ich aus dem am

4. Januar 1898 für Herrn Katzberger in München ausgestellten Prüfungszeugnisse nach dem Copierbuche des Laboratoriums wörtlich folgende Sätze an:

„Die gleichmässige Vertheilung der Last wurde durch mehrere Lagen von Fichtenholzbalkenabschnitten erreicht, die pyramidenartig auf die Tragfläche aufgebaut waren und deren oberster Balken sich an die obere Druckplatte der Prüfungsmaschine anlegte. Zwischen die Balkenabschnitte hatte man noch Walzen aus Hartholz eingeschoben, um die Druckübertragung in ausschliesslich senkrechter Richtung zu sichern.“

Bei einem ferneren Versuche, der auf Antrag des Herrn Niggel für das Stabilimento



Ceramico della Ditta Eredi Frazzi fu Andrea in Cremona ausgeführt wurde und über den ein am 12. April 1898 ausgestelltes Prüfungszeugniss berichtet, wurde die Versuchsanordnung photographirt und eine Copie des Bildes dem Antragsteller ausgehändigt. Die Platte fand sich noch vor und ich habe danach das hier beigedruckte Bild anfertigen lassen, das für sich selbst spricht.

Auch Eisenwalzen zwischen Eisenplatten an Stelle der Hartholzwalzen wurden gelegentlich verwendet, wenn die Belastung so gross wurde, dass sich die Holzwalzen zu stark in die Balken eindrückten.

Ich wiederhole nochmals, dass ich die ganze Versuchsanordnung nicht für besonders bemerkenswerth gehalten habe; sonst würde ich schon früher einmal darüber be-

richtet haben. Ich würde auch jetzt nicht darauf zurückgekommen sein, wenn es mir nicht darauf ankäme, der Vermuthung entgegen zu treten, dass sich die erwähnten Bemerkungen über fehlerhafte Ausführung von Belastungsversuchen in einer Versuchsanstalt auf das hiesige Laboratorium beziehen könnten.

A. Föppl.

Druckkreuz

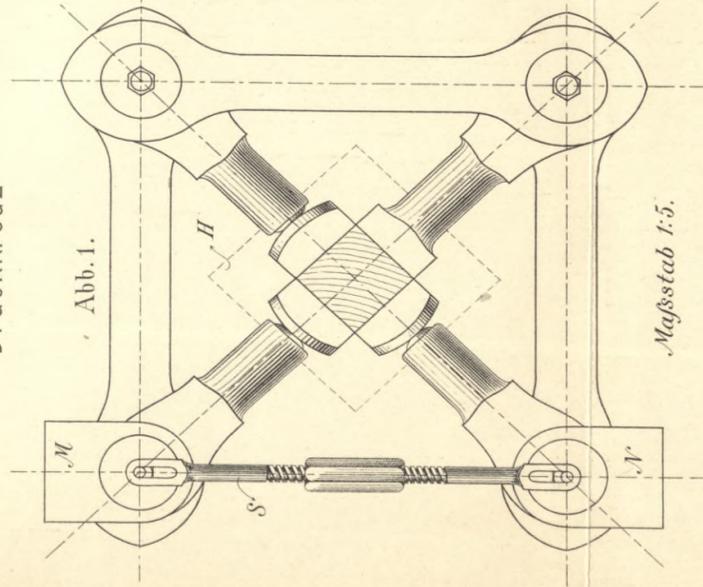


Abb. 2.

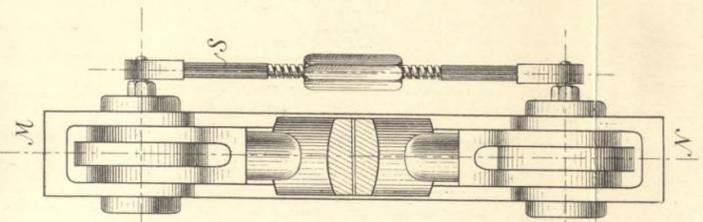


Abb. 3.

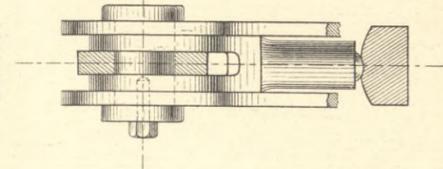
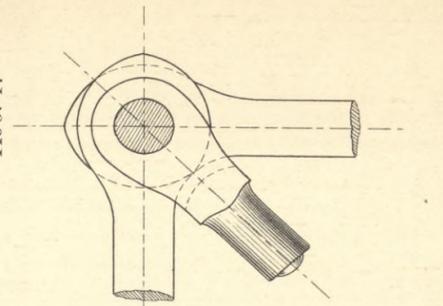


Abb. 4.



Druck-Mörser.

Abb. 7. Natürl. GröÙße.

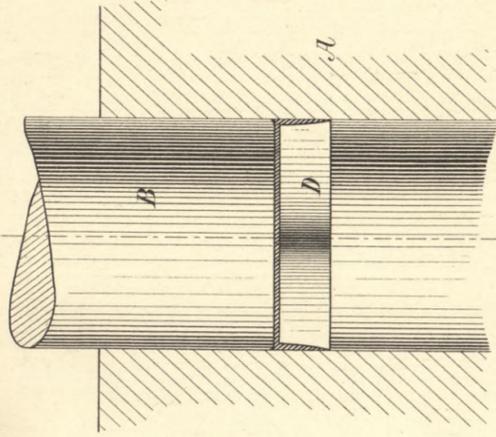
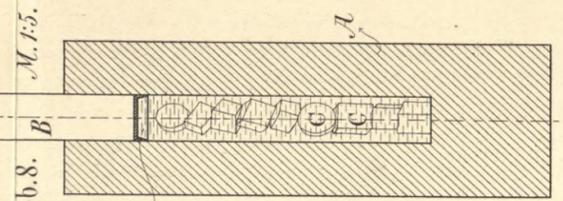


Abb. 8.



Holzschrauben.

Abb. 5.

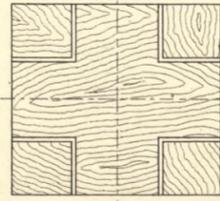
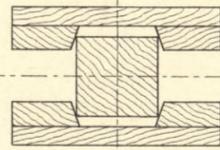
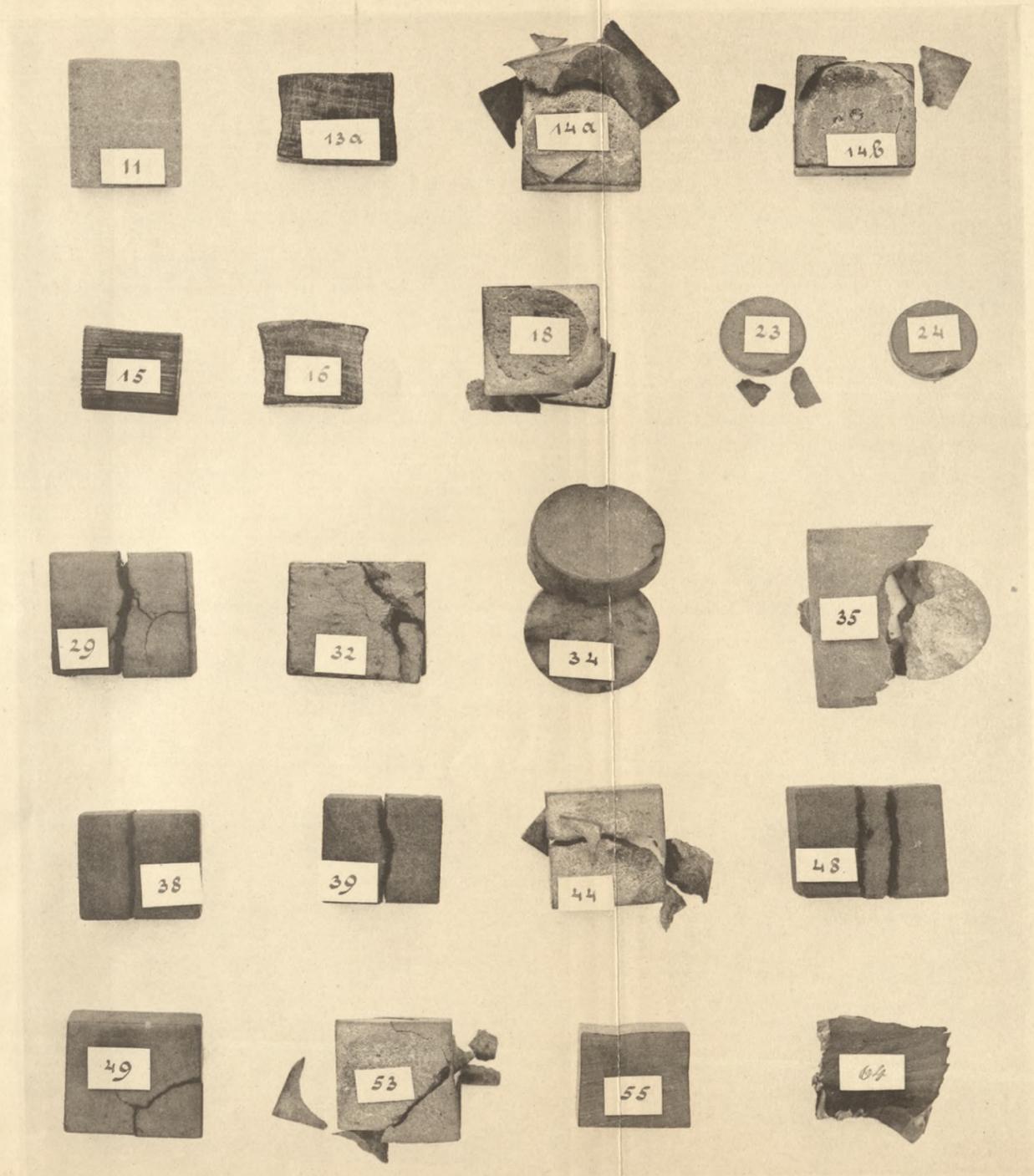


Abb. 6.



Mittheilungen aus dem mechanisch-techn. Laboratorium
der Technischen Hochschule in München.

Brüche unter der Einwirkung eines allseitig wirkenden hohen Flüssigkeitsdruckes.



(Die Nummern beziehen sich auf die Beschreibung in Abhandlung I).

Druckversuche mit Kupfer-Cylindern.

Mafsstab für die Abscissen 20:1
" " " " Ordinalen 1mm = 200 kg.

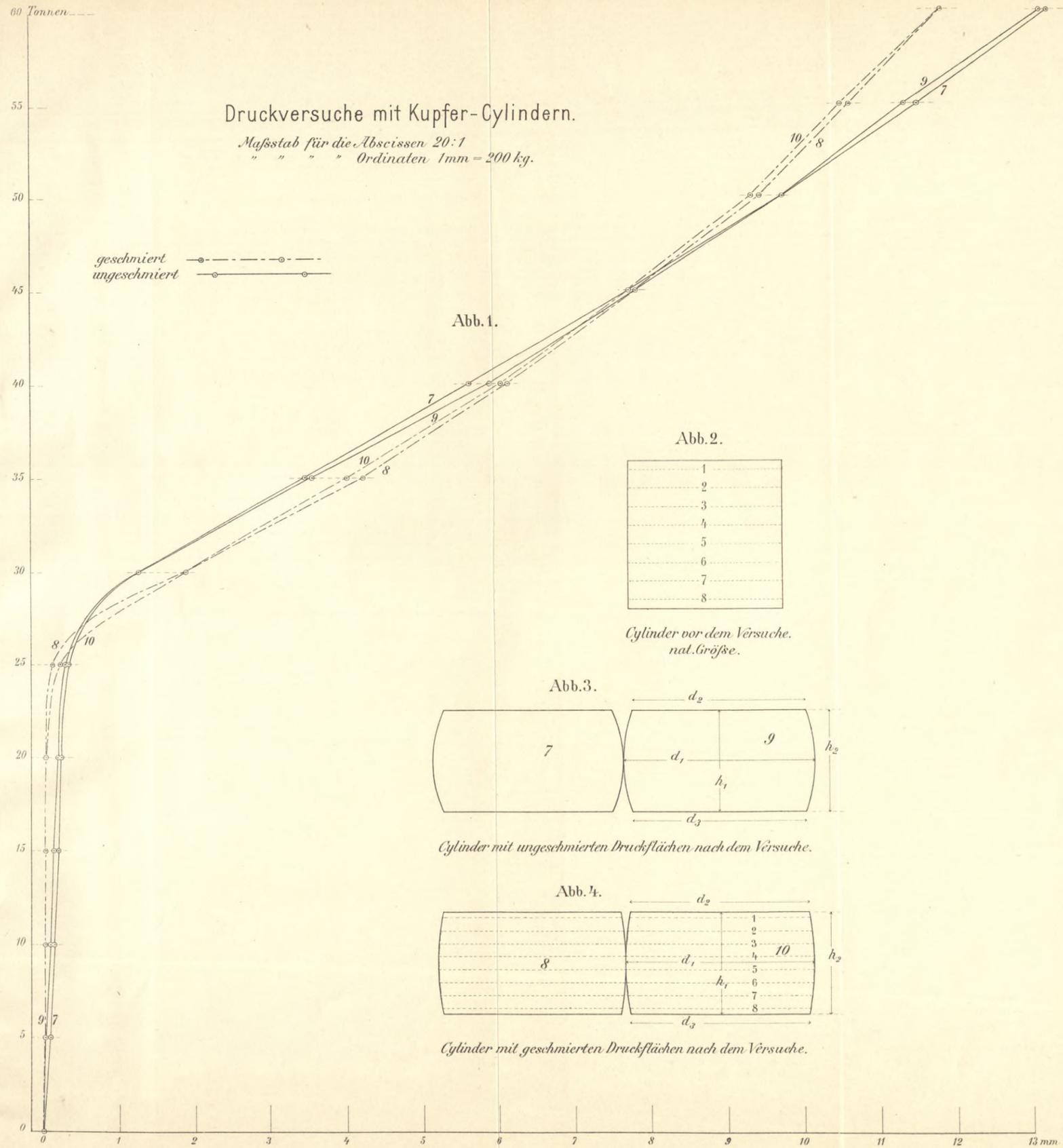


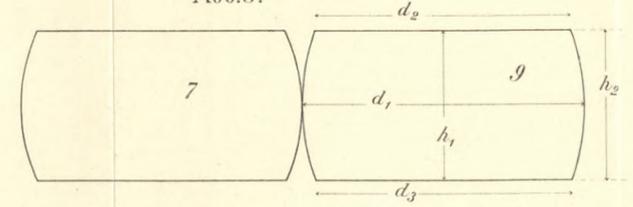
Abb. 1.

Abb. 2.

1
2
3
4
5
6
7
8

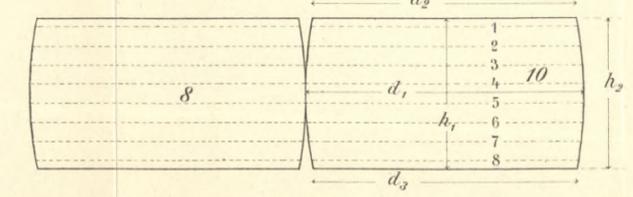
Cylinder vor dem Versuche.
nat. Gröfse.

Abb. 3.



Cylinder mit ungeschmierten Druckflächen nach dem Versuche.

Abb. 4.



Cylinder mit geschmierten Druckflächen nach dem Versuche.

Mittheilungen aus dem mechanisch-techn. Laboratorium
der Technischen Hochschule in München.

Würfel auf Druckfestigkeit und Umschlingungsfestigkeit mit geschmierten und mit nicht geschmierten Druckflächen geprüft.

Cement
Druckfestigkeit (geschmiert).



Cement
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).



Cement
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).



Sandstein
Druckfestigkeit (geschmiert).



Sandstein
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).



Cement
Umschlingungsfestigkeit (ungeschmiert).



Granit
Druckfestigkeit (geschmiert).



Granit
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).



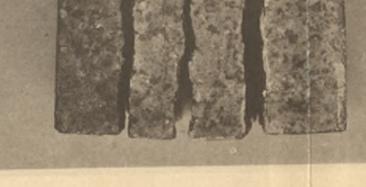
Cement
Umschlingungsfestigkeit (ungeschmiert).



Granit
Druckfestigkeit (geschmiert).



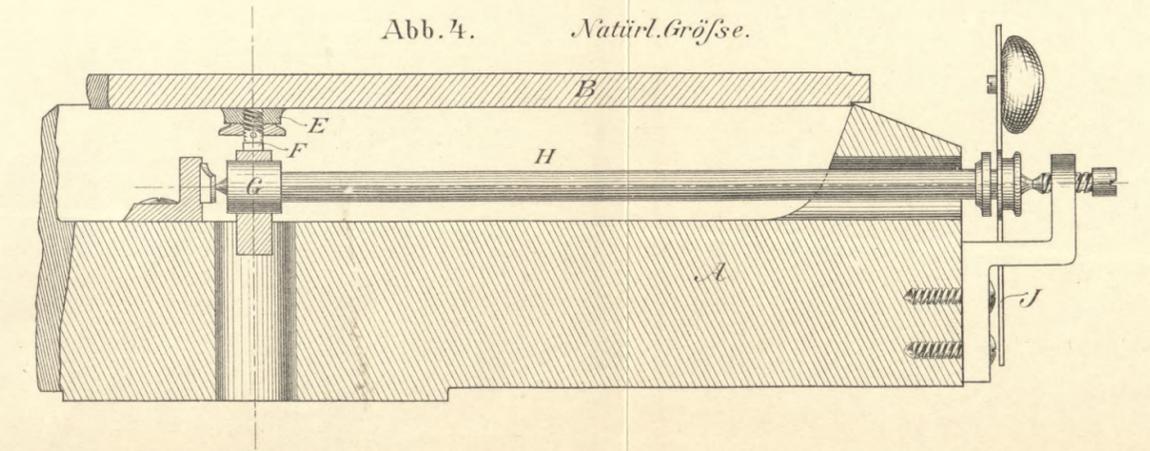
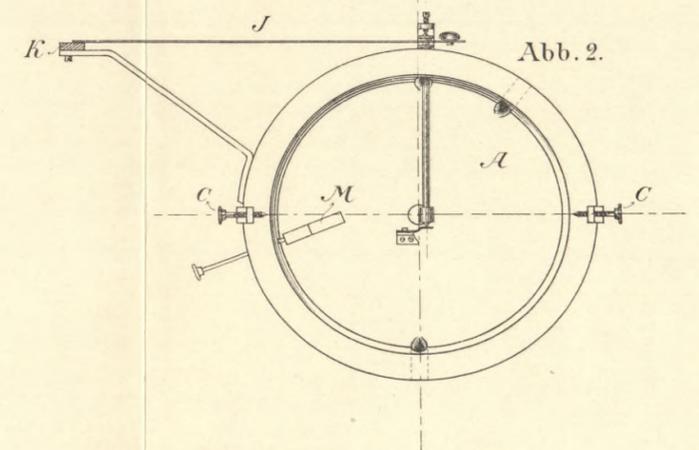
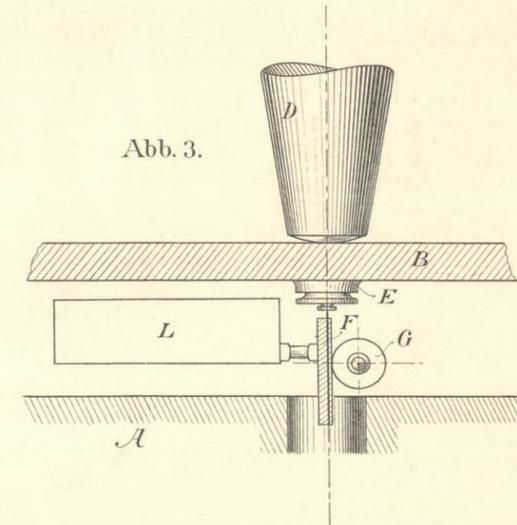
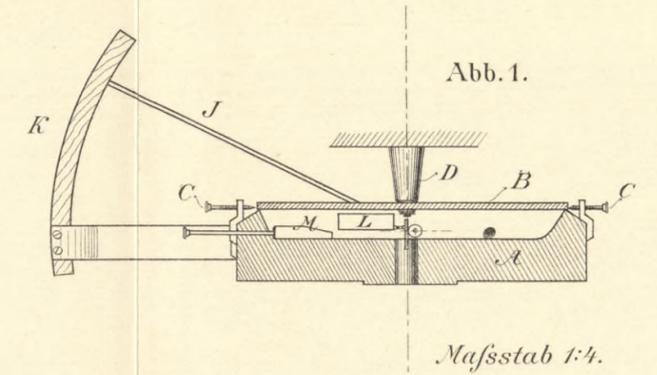
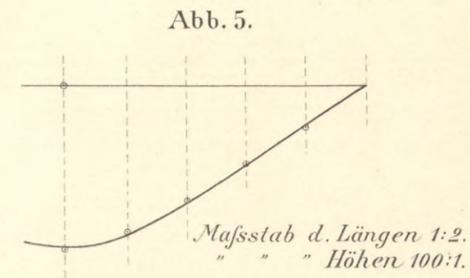
Granit
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).

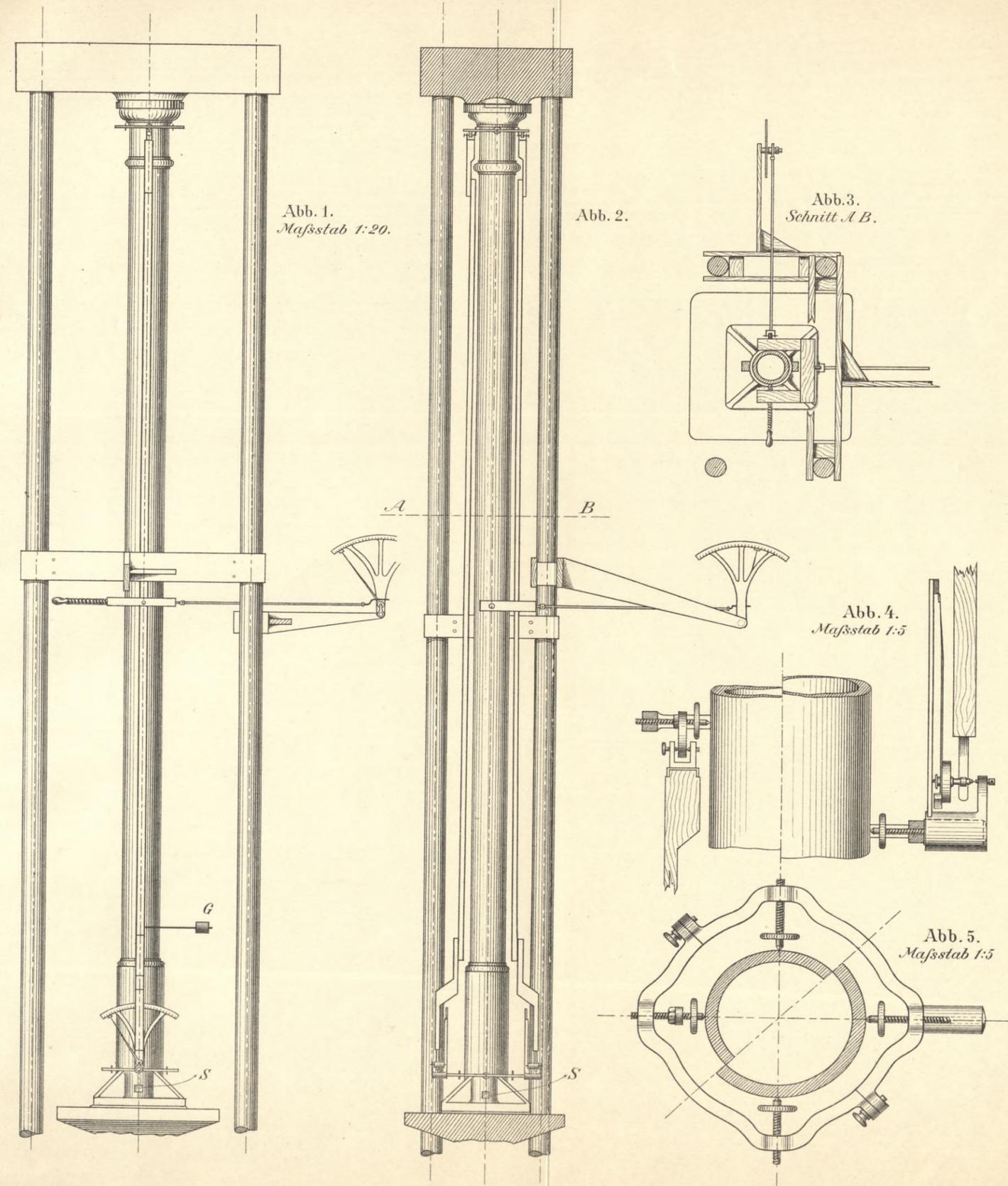


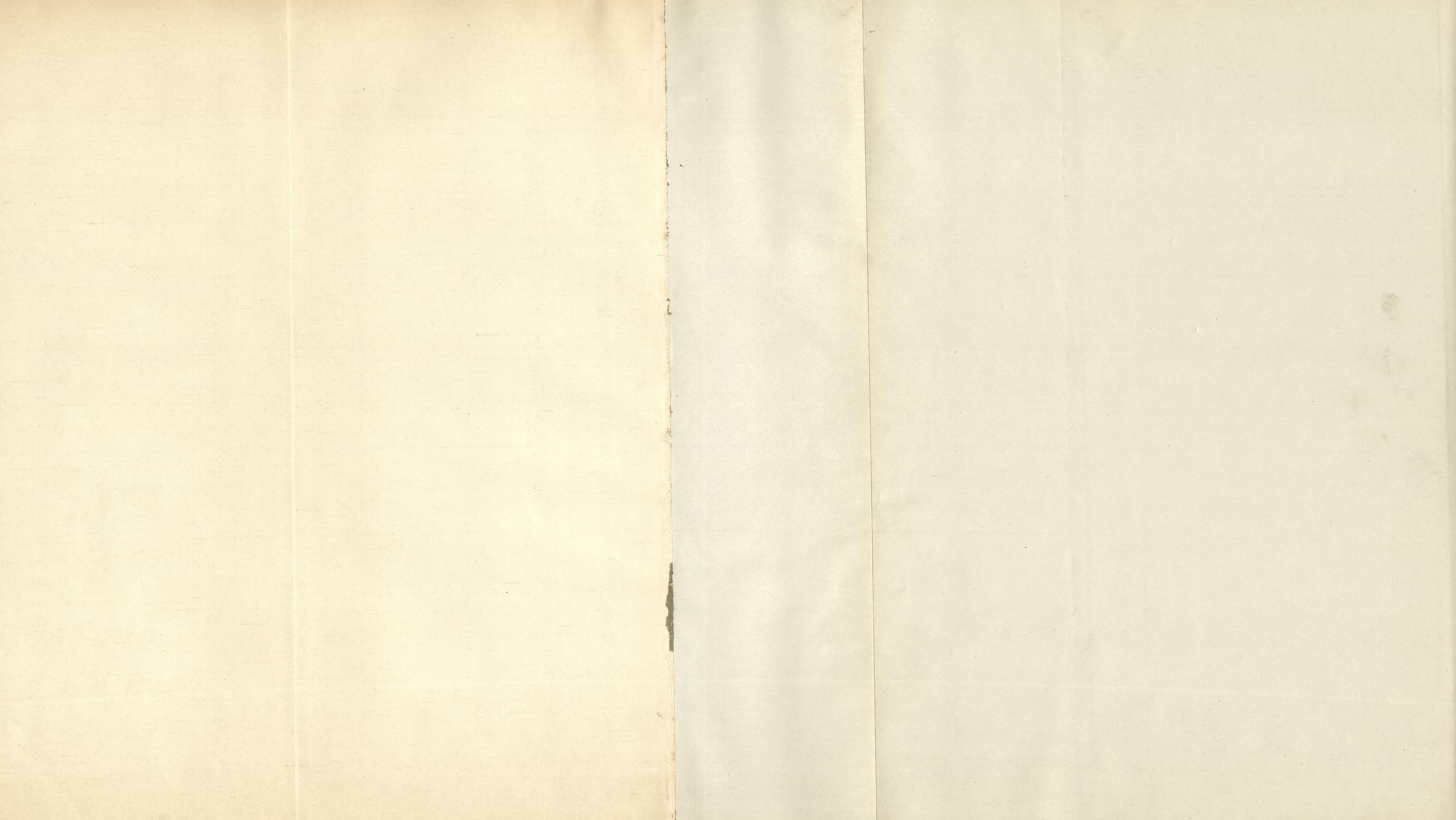
Basalt
Umschlingungsfestigkeit (geschmiert).



Apparat zur Prüfung der Biegungs-Elasticität kreisförmiger Platten.







Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315048

1895

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315049

1896

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315050

1897

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315051

1898

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315052

1900

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315053

1902

Biblioteka PK

J.X.47

/ 1894/1902

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300713

1894