

A. Die Festigkeit der Materialien.

32. Die charakteristischste Eigenschaft der festen Körper ist, wie man sah, ihr Widerstand gegen die versuchte Formänderung. Die Formänderung wird durch äussere Kräfte, welche auf den Körper wirken, ihn beanspruchen, erzeugt. Die Art, wie äussere Kräfte einen Körper beanspruchen, und die Zahl der Beanspruchungsformen, die er gleichzeitig erfährt, können mannigfaltig sein. Die Kräfte können den Körper zu zerreißen, zu drücken, zu biegen, zu verdrehen, zu scheeren, zu knicken u.s.w. streben, und ebenso viele Arten des Widerstandes gegen die Formänderung werden in dem Körper erzeugt, welche als Festigkeitsarten bezeichnet und dementsprechend benannt zu werden pflegen. Man kennt also Zug-, Druck-, Biege-, Verdreh-, Scheer-, Knick-Festigkeit u. s. w.

In der Festigkeitslehre werden alle diese Arten des Widerstandes gegen Formänderungen und die theoretische Ableitung der Gesetze der Formänderung aus einigen Grundeigenschaften des Stoffes entwickelt. Diese Dinge als bekannt vorausgesetzt, wird es völlig genügen, wenn hier nur diejenigen Begriffe festgestellt und näher betrachtet werden, welche für die Zwecke des Materialprüfungswesens nothwendig sind.

Hierbei muss aber auf einen Unterschied in der von uns angewendeten Betrachtungsweise gegen die Betrachtungsweise, die die Mathematik zur Entwicklung der Festigkeitslehre benutzt, aufmerksam gemacht werden. Die mathematische Festigkeitslehre behandelt vorwiegend die elastischen Formveränderungen der Körper, während hier ganz besonders auf die technologisch wichtigen Vorgänge bei der bleibenden Formänderung Rücksicht genommen werden muss.

a. Zugfestigkeit und Druckfestigkeit.

1. Begriffentwicklungen.

Zugfestigkeit.

33. Denkt man sich auf einen sehr langen prismatischen Körper (Fig. 3) die beiden gleichen Kräfte P in der Richtung seiner Längsachse wirkend, so darf man annehmen, dass in den Querschnitten aa und bb , deren Flächeninhalt gleich f sei, die Kräfte über diese Querschnitte gleichmässig vertheilt sind. Die auf die Querschnittseinheit entfallende Kraftgrösse, die spezifische Kraft oder die Beanspruchung, sei in Zukunft stets mit p bezeichnet; es ist also

$$p = P/f.$$

Der Beanspruchung leisten durch sie im Körper erzeugte innere Kräfte Widerstand, die gleich aber entgegengesetzt gerichtet sind. Dieser Widerstand sei mit σ bezeichnet und Spannung genannt; es ist also auch:

$$\sigma = p = P/f \quad . \quad . \quad . \quad 1.$$

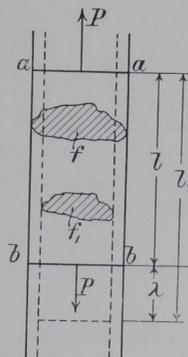


Fig. 3.

Die Spannungen werden in der Regel in Kilogrammen für das Quadratcentimeter oder Quadratmillimeter, oder auch wohl in Tonnen für

Martens, Materialenkunde.

das Quadratcentimeter ausgedrückt. In Folgendem soll stets das Kilogramm und Centimeter als Einheit benutzt werden. Der Ausdruck wird [mit Rücksicht darauf, dass technisch 1 Atmosphäre gleich 1 Kilogramm für das Quadratcentimeter zu setzen ist] geschrieben werden:

$$kg/qcm \text{ oder } at.$$

34. Unter dem Einfluss der Beanspruchung verlängert sich der Körper, indem er zugleich seinen Querschnitt verändert. Die Länge l geht in die Länge l_1 über und die Verlängerung, die der Theil des Körpers zwischen den Querschnitten aa und bb erfährt, beträgt:

$$\lambda = l_1 - l.$$

Die Verlängerung der Längeneinheit wird in der Folge stets mit Dehnung benannt und mit ϵ bezeichnet werden; es ist also:

$$\epsilon = \lambda/l \dots\dots\dots 2.$$

In der Praxis ist es aber sehr gebräuchlich, die Dehnung in Procenten der ursprünglichen Länge anzugeben; dies sei in der Folge durch Anwendung der Schreibweise:

$$\delta = \epsilon 100 = \frac{\lambda}{l} 100 = \left(\frac{l_1}{l} - 1\right) 100 \dots\dots\dots 3.$$

Als Dehnungszahl α^1 sei die Dehnung bezeichnet, die der Körper durch die Spannungseinheit erfährt; es ist also:

$$\alpha = \frac{\epsilon}{\sigma} = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{1}{\sigma} = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{f}{P} \dots\dots\dots 4.$$

Die Dehnung kann hiernach auch als das Produkt aus Spannung und Dehnungszahl geschrieben werden:

$$\epsilon = \alpha \sigma \text{ und}$$

die Verlängerung des Stabes von der Länge l :

$$\lambda = \alpha \sigma l \text{ und}$$

die Spannung eines Stabes kann man auch aus dem Bruch, Dehnung durch Dehnungszahl d. h.:

$$\sigma = \epsilon/\alpha \text{ berechnen.}$$

Den Ausdruck:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\sigma}{\epsilon} = E \dots\dots\dots 5$$

bezeichnet man in der Festigkeitslehre als den Elasticitätsmodul.

35. Während sich der Körper unter dem Einflusse der Beanspruchung dehnt, erfährt er zugleich eine Verringerung seiner Querabmessungen; der ursprüngliche Querschnitt f geht in dem kleineren f_1 über. Der Körper erfährt eine Querschnittsverminderung, deren Grösse sich durch das Verhältniss:

$$\varphi = f_1/f, \text{ oder}$$

in Procenten vom ursprünglichen Querschnitt:

$$q = 100 (1 - f_1/f) \dots\dots\dots 6$$

ausdrücken lässt.

¹⁾ Considère benutzt die in Frankreich auch sonst übliche Darstellung von ϵ als Verlängerung in $m/m\sigma$, also die Dehnungszahl α (*L 105 S. 10*); er giebt für Eisen $\alpha = 0,000048$ bis $0,000052$ und für Stahl $\alpha = 0,000044$ bis $0,000048$.

36. Streng genommen müsste man zur Errechnung der Spannungen σ stets den neuen unter der jeweiligen Belastung P angenommenen Querschnitt des Körpers in Rechnung stellen, aber es ist dennoch fast allgemein gebräuchlich, die Spannung stets mit dem ursprünglichen Querschnitt zu errechnen. Dies geschieht aus Bequemlichkeitsrücksichten und ist zulässig, weil man es bei allen Konstruktionen immer nur mit so geringen Formänderungen zu thun hat, dass die Querschnittsänderungen kaum noch merklich sind, und weil unsere Rechnungen unnötig verwickelt werden würden, wollten wir streng nach der Wirklichkeit rechnen. Bei der Materialprüfung ist zuweilen in Vorschlag gebracht worden, die Bruchfestigkeiten auch mit dem Endquerschnitt zu berechnen, aber dieser Vorschlag hat bis jetzt keinen rechten Erfolg gehabt. Hier soll deswegen nur ausnahmsweise vom üblichen Verfahren abgewichen werden.

Wenn die Dehnungen ε des Stabes für verschiedene Spannungen σ bekannt sind, so kann für den Fall, dass ein Material vom Dichtigkeitsgrade 1 vorliegt, die Spannung σ_1 bezogen auf den jeweils erreichten Querschnitt f_1 aus σ und ε unter der Annahme berechnet werden, dass bei der Formänderung der betrachtete Stababschnitt seinen Rauminhalt i nur unwesentlich verändert. Unter dieser Voraussetzung ist für den Abschnitt von der Länge l :

$$lf = i = (l + \varepsilon) f_1$$

also für die Längeneinheit:

$$f_1 = f / (1 + \varepsilon)$$

und da:

$$\sigma_1 = \sigma f / f_1$$

so wird:

$$\sigma_1 = \sigma (1 + \varepsilon).$$

Streng genommen wird durch diese Rechnung, da ε , wie später (Abschnitt 7) zu erörtern ist, die mittlere Dehnung für die angewendete Messlänge l bedeutet,

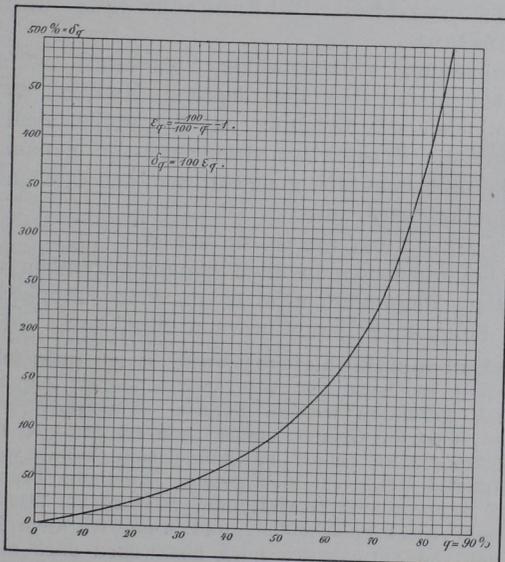


Fig. 4.

auch die Spannung σ_1 auf einen mittleren Querschnitt f_1 des gedehnten Probekörpers bezogen. Will man sie jedesmal auf den kleinsten Querschnitt beziehen, so bleibt nichts über als die unmittelbare Messung. Ist aus einem Ver-

such die gemessene Querschnittsverminderung q bekannt, so ergibt sich aus (Gleichung 6):

$$q = 100 (1 - f_i/f)$$

$$f_i = f (1 - q/100)$$

und da:

$$\sigma_1 = \sigma f/f_i,$$

so wird:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{1 - q/100}.$$

Aus der Querschnittsverminderung q lässt sich die dem kleinsten Einschnürungsquerschnitt f_1 entsprechende Dehnung ε_q wie folgt berechnen: da wie weiter oben

$$f_a = f(1 + \varepsilon_q)$$

$$q = 100 \left(1 - \frac{f(1 + \varepsilon_q)}{f} \right) = 100 - \frac{100}{1 + \varepsilon_q}$$

$$\varepsilon_q = \frac{100}{100 - q} - 1$$

Fig. 4 S. 19 giebt eine Gegenüberstellung der Werthe q , δ_q und ε_q .

Nunmehr sind die Beziehungen zu verfolgen, die zwischen den Dehnungen und Spannungen in einem langen prismatischen Körper bestehen, wenn man die Beanspruchung soweit wachsen lässt, bis schliesslich die Festigkeit des Stabes überwunden wird und der Stab reisst.

37. Erfahrungsgemäss zeigen viele der von uns zu Konstruktionen verwendeten Stoffe die Eigenschaft, dass das Verhältniss zwischen Dehnung und Spannung bis zu einem gewissen Betrage der letzteren konstant ist, dass also die Dehnungen proportional den Spannungen sind d. h.

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \varepsilon/\sigma = \text{konst. d. h. auch} \\ \alpha &= \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} = \text{konst.} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 7$$

das Verhältniss zwischen Dehnungszuwachs und Spannungszuwachs ist konstant.

Wird die Spannung σ noch weiter vergrössert, so ändert sich die Dehnungszahl; sie nimmt bei den meisten Materialien zu. Diejenige Spannung, bei welcher die Dehnung aufhört proportional der Spannung zuzunehmen, wird die Proportionalitätsgrenze genannt; sie wird in der Folge stets dadurch kenntlich gemacht, dass den Zeichen σ , ε , λ , δ u. s. w. der Index P beigefügt wird, also:

$$\sigma_P, \varepsilon_P, \lambda_P, \delta_P \text{ u. s. w.}$$

Die Stoffe, bei welchen α in allen Spannungsgrenzen veränderlich ist, wie z. B. Gusseisen, Magnesium u. a. haben keine Proportionalitätsgrenze, oder wie in der Folge kurz gesagt werden wird, keine P -Grenze.

Der Ausdruck Proportionalitätsgrenze ist ein recht schwerfälliger, und es würde mit Freude zu begrüssen sein, wenn hierfür ein treffender kurzer deutscher Ausdruck gefunden werden könnte. Ausserdem ist es nothwendig darauf hinzuweisen, dass die Grenze, ebenso wie bei den später zu benutzenden ähnlichen Ausdrücken, keine scharf bestimmte sein kann, weil die Zustandsänderungen im Material stetig vor sich gehen. Auch die Frage, ob überhaupt eine ganz strenge Proportionalität stattfindet oder nicht, lässt sich mit unsern heutigen Hilfsmitteln nicht entscheiden, und wenn ich auch dazu neige, diese Frage zu verneinen, so vermag ich mich einstweilen doch nicht von der eingebürgerten Anschauung abzuwenden. Hiernach kann also nicht verkannt werden, dass die P -Grenze eigentlich Uebereinkunftssache ist, und dass ihre Grösse stets von der Feinheit der zu Gebote stehenden Messwerkzeuge und, wie noch gezeigt werden muss, auch von den Gewohnheiten und Anschauungen des Beobachters abhängig ist.

38. Für die weiteren Betrachtungen sei ein Körper mit deutlicher P -Grenze, z. B. Eisen, vorausgesetzt. Von den Vorgängen kann man eine bildliche Darstellung, ein Schaubild, entwerfen, indem man die Spannungen σ als Ordinaten und die zugehörigen Dehnungen als Abscissen aufträgt, wie es in Fig. 5 geschehen.

Bis zum Punkte P herrscht Proportionalität. Die Linie \overline{OP} ist also eine Gerade und von P aus verläuft sie bis zum Punkte S mit einer sanften Krümmung. Vom Punkte S ab nehmen die Dehnungen ϵ gegenüber den Spannungen σ sehr schnell [zuweilen plötzlich] zu; der Stab streckt oder fließt. P ist also die Proportionalitätsgrenze und S nennt man die Streck- oder Fließgrenze.

Die Streck- oder Fließgrenze ist also diejenige Spannung, bei welcher die Dehnungen bei stetiger Spannungsvermehrung sehr schnell wachsen. Bis zu diesem Punkte waren die Dehnungen verhältnissmässig klein, und in Fig. 5 mussten sie in sehr grossem Maassstabe aufgetragen werden, um ein deutliches Bild zu liefern.

Man erkennt leicht und die Erfahrung bestätigt es jeden Tag, dass die S -Grenze, ebensowenig wie die P -Grenze, ein genau charakterisierter Punkt ist. Es giebt verschiedene gebräuchlich gewordene Verfahren für ihre Maassbewertung und diese liefern, wie noch zu zeigen sein wird, verschiedene Werthe.

39. Ruft man eine weitere Verlängerung des Stabes hervor, so wächst die [stets auf den ursprünglichen Querschnitt bezogene] Spannung σ .

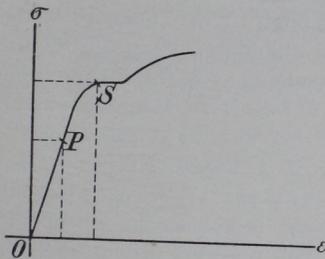


Fig. 5.

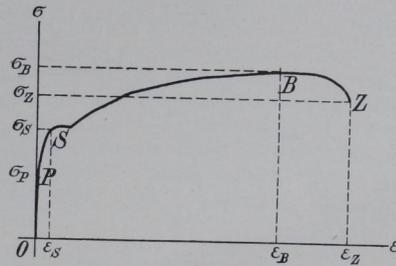


Fig. 6.

Ihr Wachstum wird aber [beim Eisen!] stetig geringer, bis σ einen Höchstwerth erreicht, um von hier aus bis zum Bruch wieder abzunehmen. Stellt man diesen Vorgang unter Benutzung eines kleineren Maassstabes für die Dehnungen ϵ bildlich dar, so erhält man Fig. 6. Die Punkte P und S haben die gleiche Bedeutung wie früher. Die Spannung im Punkte B wird als die Höchstspannung σ_B bezeichnet, die Spannung im Punkte Z als Zerreissspannung σ_Z . Die zugehörigen Dehnungen sind:

$$\epsilon_P, \epsilon_S, \epsilon_B \text{ und } \epsilon_Z.$$

Auf diese ist später noch näher einzugehen.

40. Unter Umständen ist es bequemer statt der Spannungen und Dehnungen σ und ϵ die Belastungen, durch welche die Spannungen hervorgerufen wurden und die zugehörigen Verlängerungen, also P und λ , zur Verzeichnung des Schaubildes zu benutzen. Man sieht ohne weiteres ein, dass das Bild ein ähnliches werden muss, da die Spannungen mit gleichbleibendem Querschnitt aus P und die Dehnungen mit gleichbleibendem l berechnet werden. Die Festigkeitsprobirmaschinen sind häufig mit

Einrichtungen [Selbstzeichnern] versehen, um Schaubilder der letzten Art, also nach P und λ , selbstthätig aufzuzeichnen.

Es ist freilich gebräuchlicher die Schaubilder nach P und λ zu verzeichnen, und ich hätte der Einfachheit wegen von dieser Darstellungsweise ausgehen sollen, aber man wird bald die Vortheile erkennen, die mit dem Ausgang von σ und ε geboten sind, wenn man bedenkt, dass nun bei Benutzung immer des gleichen Maassstabes für die Aufzeichnungen, gleiche Materialien stets gleiche auf dem ganzen Verlauf mehr oder weniger vollkommen zusammenfallende Schaubilder liefern. Der erste Blick lehrt den ganzen Charakter des Materiales kennen und mit dem sich dem Gedächtniss schnell einprägenden Durchschnittsbilde vergleichen. Aus diesem Grunde habe ich bei den Uebungen in der Versuchsanstalt und für deren Betrieb bestimmte Maassstäbe¹⁾ zum Verzeichnen der Schaulinien vorgeschrieben, und es ist gar nicht schwer sie nach den Protokollen unter Benutzung des Rechenmaassstabes für die Umrechnung auf σ ohne weiteres aufzuzeichnen, wenn man nur den Kunstgriff braucht, die Dehnungsablesungen in Procenten der Messlänge l , also in 100ε , vorzunehmen. Man wählt entweder für l ein Vielfaches von 100 oder theilt besondere Maassstäbe für andere Längen von l nach Procenten ein, wie später (137) noch zu beschreiben. Ja es macht eigentlich gar keine besonderen Schwierigkeiten die Maschinen darauf einzurichten, dass sie selbst bei Benutzung verschiedener Probenquerschnitte statt der Belastungen P die Spannungen σ aufzeichnen. Das kann auf mannichfache Weise geschehen und würde durchaus nicht unpraktisch sein, besonders wenn die Maschinen so wie so nur für eine Art von Versuchen benutzt werden. Auf diesen Punkt komme ich bei der Beschreibung der Maschinen am Schluss des Buches nochmals zurück.

41. Bis jetzt wurde eine stetige Vermehrung der Spannung vorausgesetzt und die zugehörigen Dehnungen verzeichnet. Wenn man aber den Vorgang dahin abändert, dass die Spannung nach Erreichung von bestimmten Beträgen wieder auf Null zurückgehen kann, d. h. wenn der bis zu einem gewissen Betrage der Kraft P belastete Körper wieder bis auf $P=0$ entlastet²⁾ wird, so erhält man bei Körpern mit ausgesprochener P -Grenze, z. B. bei unserem Eisenstabe, ein Bild, wie es Fig. 7 zeigt.

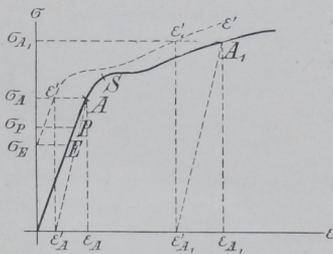


Fig. 7.

Zu Anfang verliert der Körper die unter der Spannung σ angenommene Dehnung ε ganz. Der Körper nimmt seine Gestalt vollkommen wieder an, er zeigt sich vollkommen elastisch. Entlastet man bei immer höheren Spannungen, so wird von einem gewissen Augenblicke an der Körper aufhören seine ursprüngliche Gestalt vollkommen wieder anzunehmen, es bleibt ein gewisser Rest, der nicht wieder verschwindet, die bleibende Dehnung oder der Dehnungsrest genannt. Diesen Punkt bezeichnet man als Elasticitätsgrenze des Materiales, d. h. als diejenige Spannung, bei welcher der Körper anfängt bleibende Formänderungen zu erleiden. Es herrscht vielfach die Ansicht, dass Elasticitätsgrenze und Proportionalitätsgrenze zusammenfallen; indessen liegt, wie gelegentlich gezeigt werden wird, kein zwingender Grund für diese Annahme vor; sie

¹⁾ Ich verwende quadratische Netze und mache das Maass für $\sigma=1000$ at gleich dem Maasse für $\varepsilon=0,100$.

²⁾ Bei Entlastungen ist das unter Abschnitt 12, 314a in Anmerkung Gesagte zu beachten.

bedarf jedenfalls noch einer eingehenden Prüfung. Die Elasticitätsgrenze wird in Zukunft mit dem Index E bezeichnet werden, also:

$$\sigma_E \text{ und } \varepsilon_E.$$

Hier ist der Ort um auf einen recht grossen Uebelstand aufmerksam zu machen, der durch die Unsicherheit gegeben ist, die hinsichtlich der genauen Festlegung des Begriffes Elasticitätsgrenze und der mangelhaften Auseinanderhaltung mit der Proportionalitätsgrenze und ganz besonders mit der Streckgrenze besteht. Diese Unsicherheit ist keineswegs allein dadurch gegeben, dass diese Punkte an sich keine festen Grenzwerte sind, sondern nur angenähert durch die zusammengehörigen σ und ε festgelegt werden; sie ist vielmehr ganz besonders dadurch veranlasst, dass die beiden Grenzen σ_P und σ_E gegenseitig für einander gesetzt werden und noch mehr dadurch, dass beide bei Versuchen in der Praxis oft mit dem Werth σ_S , der Streckgrenze, verwechselt werden. Die Praxis bezeichnet sehr häufig das, was wir Streckgrenze nennen, als Elasticitätsgrenze, ohne eine Andeutung darüber zu geben, wie diese verstanden sein soll oder festgestellt wurde. Oft kann man sich nur durch die beziehungsweise Lage zur Bruchgrenze ein Urtheil über die wahre Bedeutung der Angaben bilden, und zwar auch nur dann, wenn es sich um eine allgemein bekannte Materialgattung handelt. Zuweilen kann man aus der allgemeinen Gepflogenheit eines ganzen Landes einen Anhalt darüber gewinnen, was man einzusetzen hat, wenn in einem Aufsatze schlechtweg von Elasticitätsgrenze gesprochen wird. Z. B. darf man annehmen, dass wenn sich der Ausdruck in deutschen aus der Praxis stammenden Artikeln findet, in der Regel die Streckgrenze gemeint sein wird. Das Gleiche darf man im Allgemeinen auch bei englischen und amerikanischen Artikeln voraussetzen; bei den Franzosen ist man schon öfter im Zweifel, weil sie häufig wirklich σ_E meinen, wenn sie von der Elasticitätsgrenze sprechen. Hier liegt in der That ein recht unangenehmer Uebelstand vor, denn durch die nachlässige Ausdrucksweise kann das Urtheil über die Materialqualität wirklich verschoben und zuweilen Unheil gestiftet werden. Die Sache gewinnt auch unmittelbar greifbare praktische Bedeutung, wenn man z. B. vor Gericht als Sachverständiger die Entscheidung zu treffen hat, ob in einem Verträge mit dem Ausdrucke „Elasticitätsgrenze“ σ_E , σ_P oder gar σ_S gemeint war. Man kann nicht oft und nicht dringend genug wiederholen, dass hier mehr Klarheit und Bestimmtheit in der Ausdrucksweise geschaffen und beachtet werden möge, dass die Autoren nicht für sich selbst, sondern für andere Leute schreiben, die Freude und Vergnügen daran haben, wenn ihnen ihre Arbeit erleichtert wird.

42. Sobald man mit der Spannung über die Elasticitätsgrenze (σ_E) hinausgeht, z. B. bis zum Punkte A oder A_1 (Fig. 7), findet man bei der Entlastung, dass die Dehnung von ε_A nur bis zum Punkte ε'_A zurückgeht. Von der Gesamtdehnung ε_A ist der Betrag ε'_A die bleibende Dehnung oder der Dehnungsrest, und $\varepsilon_A - \varepsilon'_A$ ist die elastische Dehnung oder die Federung. Dem Dehnungsrest entspricht in einem nach P und λ verzeichneten Schaubilde, die bleibende Verlängerung λ' , der Federung die elastische Längenänderung $\lambda - \lambda'$.

Trägt man in das Schaubild (Fig. 7) die Federungen und Dehnungsreste für jede Spannung σ ein, so erhält man den fein gestrichelten Linienzug, der am Ende mit ε' bezeichnet wurde; aus dem Schaubilde geht alsdann das ganze elastische Verhalten des Materials beim Zugversuch hervor.

43. Während der Körper unter dem Einfluss der wachsenden Spannung seine Länge nach den nunmehr bekannten Gesetzen änderte, veränderte er auch seinen Querschnitt. Man kann hierbei, ebenso wie es mit Bezug auf die Längenänderungen schon geschah, zwischen elastischen und bleibenden Querschnittsänderungen unterscheiden. Erfahrungsgemäss stehen

auch die elastischen Längen- und Querschnittsänderungen in einem gewissen Zusammenhange.

Innerhalb der Elasticitäts- und Proportionalitätsgrenze [*E*- und *P*-Grenze] ist dieses Verhältniss gegeben durch die Abhängigkeit der Quersammenziehung ε_q von der Dehnung ε :

$$\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}, \text{ oder}$$

der Zusammenziehungszahl von der Dehnungszahl:

$$\alpha_q = \alpha \frac{1}{m}, \text{ worin}$$

m eine Konstante ist, die, aus zahlreichen Versuchen abgeleitet, für die meisten Stoffe zwischen 3 und 4 liegt, d. h. die unter bestimmten Spannungen auftretende Quersammenziehung ist gleich $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der zugehörigen Längsdehnung.

Unter dieser Umständen, d. h. innerhalb der *E*-Grenze, würde also mit den Formänderungen ε und $\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}$ auch eine Aenderung η des Rauminhaltes der Probe verbunden sein, die sich für die Raumeinheit einfach ergibt, aus:

$$\eta = (1 - \varepsilon_q)^2 (1 + \varepsilon) - 1 \text{ d. h.}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{1}{m} \varepsilon\right)^2 (1 + \varepsilon) - 1.$$

44. Die bleibende Formänderung erfolgt wie früher (25) dargelegt, bei den Stoffen vom Dichtigkeitsgrade 1 in der Weise, dass der Rauminhalt des Körpers nahezu der gleiche bleibt. Während aber bei einem langen prismatischen Stabe, wie er einstweilen bei allen Betrachtungen noch vorausgesetzt wird, innerhalb der *E*- und *P*-Grenze und unmittelbar nach dem Ueberschreiten derselben der Körper auf der ganzen der Betrachtung unterzogenen Länge den Querschnitt gleichmässig ändert, kommt er bei weiterem Wachsen der Spannung schliesslich in einen Zustand, in welchem sich der Querschnitt hauptsächlich in einem beschränkten Theil der Länge ändert. Es bilden sich eine oder mehrere Einschnürungen (Fig. 8) [bei weichen Materialien — gegenwärtig ist immer noch Eisen vorausgesetzt] und endlich erfolgt der Bruch in der Nähe des engsten Theiles einer solchen Einschnürung.



Fig. 8.

45. Der Beginn der zum Bruche führenden Einschnürung fällt sehr nahe zusammen mit der Höchstspannung σ_B des früher verzeichneten Schaubildes, aus dem sich ergibt, dass die Spannung σ , also auch die Kraft *P*, welche den Stab zu zerreißen strebt, bei weiterer Dehnung des Stabes abnimmt.

Für die praktische Verwendung des unseren Betrachtungen zu Grunde gelegten Stoffes [Eisen] würde dies bedeuten, dass die höchste Last (Fig. 6 S. 21) den Stab unweigerlich zum Bruche bringt, wenn dem Stabe durch die Eigenart der Konstruktion die freie Verlängerung bis zum Bruche möglich ist, wenn z. B. die Last P_B an dem Stabe frei aufgehängt ist. Die Maschinen, mit denen die Festigkeit der Materialien gemessen wird, gestatten allerdings zuweilen auch die kleinere Kraft P_Z (Fig. 6) zu bestimmen, die der Stab schliesslich noch unmittelbar vor dem Bruch zu

tragen vermag. Die Kenntniss dieser Kraft P_Z und der durch sie im Körper erzeugten Spannung σ_Z hat aber praktisch nur in wenig Fällen Nutzen und man ist daher übereingekommen, die Höchstlast P_B oder vielmehr die Höchstspannung σ_B , als Maassstab für die Zugfestigkeit des Materiales anzunehmen; man bezeichnet sie auch als Bruchlast und Bruchspannung oder Bruchgrenze.

46. Die Zugfestigkeit, die bleibende Verlängerung oder Restdehnung nach dem Bruch und die Querschnittsverminderung der Bruchfläche bilden in der Praxis bisher den Hauptgütemaassstab für die Beurtheilung der Konstruktionsmaterialien. Zuweilen werden auch P - und S -Grenze mit herangezogen. Für den Konstrukteur hat aber unzweifelhaft die Kenntniss der P -Grenze und Dehnungszahl a innerhalb dieser Grenze am meisten Wichtigkeit, wenn sie auch (37, 38) schwer ganz zuverlässig zu bestimmen sind.

47. Man ist durch Gewöhnung und schliesslich durch Beschluss auf Konferenzen, die zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren berufen wurden, dahin übereingekommen, dass man der Höchstspannung σ_B nicht die zugehörige Dehnung ϵ_B , sondern die bleibende Gesamtdehnung nach dem Bruche, also ϵ'_Z , gegenüberstellt.

Dies hat den praktischen Grund, dass sich die zu der Höchstlast P_B gehörige Verlängerung λ_B sowohl mit den zur Verfügung stehenden Prüfungsmitteln als auch aus den Schaulinien [auch aus den von der Maschine selbst gezeichneten] oft nicht mit Sicherheit bestimmen lässt. Das ist leicht einzusehen, wenn man bemerkt, dass ja die Schaulinie für Eisen (Fig. 6 S. 21) auf eine ziemliche Strecke mit der Tangente im Höchstpunkte zusammenfällt.

Die nach dem Bruche gemessene Verlängerung oder Dehnung pflegt in der Praxis stets in Procenten, bezogen auf eine gewisse vereinbarte ursprüngliche Länge, ausgedrückt zu werden, worüber später sehr eingehend zu reden ist (Abschnitt 7). Sie soll in folgendem stets als Bruchdehnung oder Dehnbarkeit des Materiales durch δ bezeichnet werden.

Die für die Materialbeurtheilung benutzten und für den Materialverbraucher wichtigen Ergebnisse des Zerreißversuches sind in der hier angenommenen Bezeichnungsweise die Grössen:

$$\sigma_P, \sigma_S, \sigma_B, \delta_Z \text{ und } q.$$

48. erinnert man sich dessen, dass die Spannung eine Kraft darstellt, nämlich den Theil der Kraft P , der auf die Einheit der Querschnittfläche des Stabes entfällt, und bedenkt man ferner, dass die Dehnung einen Weg bedeutet, nämlich den Weg, den die Endfläche des Körpertheiles von der Länge $l=1$ infolge der Einwirkung der Kraft σ zurücklegt, so kann man aus dem Produkt von Kraft mal Weg die Arbeit finden, welche der Körpertheil entwickelt, indem er der versuchten Formänderung widersteht.

Legt man der Rechnung die Spannung und die Dehnung zu Grunde, so erhält man die spezifische Arbeit a , welche die Raumeinheit des Materiales der Formänderung entgegensetzt; es ist:

$$a = \Sigma \sigma \epsilon.$$

Rechnet man dagegen unmittelbar mit den Kräften P und den durch sie erzeugten Verlängerungen, so erhält man die zur Erzeugung der Form-

änderung am ganzen Stabtheil von der Länge l erforderliche Formänderungsarbeit, nämlich:

$$A = \Sigma P \lambda.$$

Das Schaubild giebt für jeden Augenblick, oder besser gesagt, für jeden Betrag der erzielten Formänderung ϵ oder λ , die zugehörige Spannung σ oder Kraft P und wir können durch stetige Summirung der Grössen leicht die bis zu einer gewissen Formänderung gebrauchte Gesamtarbeit Σa und ΣA bilden.

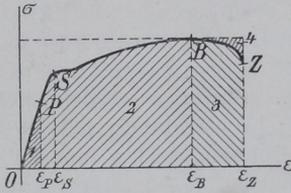


Fig. 9.

In dem Schaubilde der Spannungen und Dehnungen (Fig. 9) stellt die Dreiecksfläche OPE_P die Summe der specifischen Arbeit bis zur P -Grenze dar, das elastische Arbeitsvermögen; es ist:

$$a_P = \frac{1}{2} \sigma_P \epsilon_P \dots 8.$$

Von anderer Seite z. B. von H. Fischer (*L 106*) Hartig u. a. sind diese Begriffe noch weiter ausgesponnen, ich will aber diesem Beispiel nicht folgen, weil ich aus meiner vieljährigen Beschäftigung mit dem Versuchswesen und dessen Ausnutzung für die Praxis die Ueberzeugung gewonnen habe, dass man die Sache nicht verwickelter machen darf, als es unbedingt durch das Bedürfniss gefordert wird. Da ich dieses Buch in erster Linie mit Rücksicht auf die praktische Verwerthbarkeit schreibe, so muss ich mir ein näheres Eingehen auf die angedeutete Richtung leider auch in solchen Fällen versagen, in denen sie mir an sich interessant und wissenschaftlich werthvoll erscheint; ich möchte mich deshalb an dieser Stelle davor verwahren, dass man mir etwa aus dem Uebergehen dieser Dinge den Vorwurf der Nichtachtung macht.

Der Körper hört mit dem Ueberschreiten der P -Grenze keineswegs auf elastisch zu sein, im Gegentheil die Federung kann sogar bis zum Bruch zunehmen. Demgemäss leistet also der Körper, auch während er bleibende Formänderungen erleidet, noch elastische Widerstandsarbeit. Den Betrag dieser Arbeit kann man allerdings finden, wenn man den Versuch unter sehr häufiger Entlastung zu Ende führt; aber hierbei erfahren, wie später gezeigt werden muss, die meisten Stoffe erhebliche Zustandsänderungen, deren Betrag von mannigfachen Umständen der Versuchsausführung abhängig ist.

Fischer stellt die elastische Gesamtarbeit a'_e als Schaubild dar, indem für jedes σ die zugehörige Federung aufgetragen wird. Er entwickelt hieraus den Begriff des Elasticitätsgrades als das Verhältniss zwischen der specifischen elastischen Gesamtarbeit a'_e und der specifischen Gesamtarbeit a' ; der Elasticitätsgrad ist also nach ihm $= a'_e/a'$.

Die elastische Arbeit a'_e zerlegt Fischer in zwei Theile, in a''_e und a'''_e , nämlich in die Arbeit, die während der rein elastischen Dehnung verrichtet wird und in diejenige, die nach dem Ueberschreiten der Elasticitätsgrenze geleistet wird. Hierbei ist aber noch zu beachten, dass die Fischersche ϵ -Grenze sich mit unserer S -Grenze decken wird. Er benutzt nun auch noch das Verhältniss $\psi = a'''_e/a''_e$ zur Darstellung der Eigenschaften des Stoffes. Wollte man seinem sonst beachtenswerthen Vorschlage folgen, so würde das eine erhebliche Mehrbelastung des Versuchswesens bedeuten (*314*).

49. Die bis zur S -Grenze oder bis zur B -Grenze (Fig. 9) zu überwindende Widerstandsarbeit ist der Flächeninhalt $OPSE_SO$ oder $OPSB\epsilon_BO$. Der Theil der Widerstandsarbeit, der nach Erreichung der Bruchgrenze bis zum Zerreißen des Stabes noch überwunden werden muss, ist, wie schon angedeutet, für den Konstrukteur bedeutungslos. Für den Technologen kann er unter Umständen aber von grossem Werth sein, und daher darf er nicht ohne weiteres vernachlässigt werden; er ist gegeben durch die Fläche $\epsilon_B BZ\epsilon_Z$. Die ganze schraffierte Fläche des Schaubildes

(Fig. 9) giebt ein Maass für das gesammte Arbeitsvermögen, welches die Raumeinheit des fraglichen Materiales der Formänderung bis zum Zerreißen entgegenzusetzen vermag. Freilich darf hierbei nicht ausser Acht gelassen werden, dass dies für weiche Materialien, die eine Einschnürung und demgemäss einen Abfall der Schaulinie von *B* nach *Z* zeigen, nicht ganz streng gilt, denn an der durch die Fläche 3 dargestellten Arbeit nimmt, wie später zu zeigen ist, immer nur der beschränkte, der Einschnürung unterworfenen Stababschnitt theil. Deswegen pflegt man auch wohl bei Berechnung von Σa für die Praxis die Thatsache des Abfalles zu vernachlässigen und den Zipfel 4 voll mitzurechnen.

Auch das Arbeitsvermögen *a* wird zuweilen als Gütemassstab für den Werth des Materiales empfohlen.

50. Liegt ein Arbeitsschaubild vor, so ist es ein Leichtes, durch Rechnung, durch Ausmessen mit dem Planimeter oder durch Auswägen des aus dem Papier herausgeschnittenen Flächenstückes den Flächeninhalt zu bestimmen.

Um zugleich die Handhabung der Instrumente, ihre Fehlerquellen und die Fehlerbestimmungen kurz zu erläutern und Gelegenheit zum selbstständigen Arbeiten zu bieten, lasse ich bei den Uebungen solche Messungen, Auszählungen oder Wägungen vornehmen. Will man sich mit einer praktisch ausreichenden Genauigkeit begnügen, so kommt man durch Auszählen der auf Netzpapier aufgetragenen Schaubilder schnell zum Ziel, wie folgendes Beispiel zeigt (Fig. 10), indem man sich das Bild durch einige Rechtecke so umschrieben denkt, dass die über die Linie hinausfallenden Zwickel gleich den einspringenden Zwickeln sind. Das lässt sich durch Augenmaass genau genug machen. Dann ergibt eine kleine Rechnung:

$$\begin{aligned} \text{Umschriebenes Rechteck } a_1 &= 3740 \times 0,380 \\ &= 1421 \frac{\text{cmkg}}{\text{cm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fläche 1} &- 2600 \times 0,380 = 988 \\ \text{2} &- 800 \times 0,320 = 256 \\ \text{3} &- 340 \times 0,170 = 58 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{r} \hline \text{Summe} \quad 3740 \quad \Sigma a = 1302 \frac{\text{cmkg}}{\text{cm}} \end{array}$$

$$\xi = \frac{a_1}{\Sigma a} = \frac{1302}{1421} = 0,92.$$

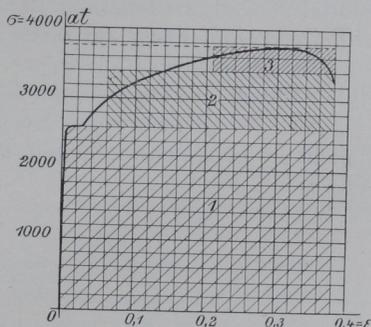


Fig. 10.

51. Nun pflegt man aber nicht immer eine Schaulinie zu verzeichnen oder von der Maschine selbstthätig aufschreiben zu lassen, ja in den allermeisten Fällen nimmt man sich nicht einmal die Mühe, die zur Verzeichnung des Schaubildes erforderlichen Werthe für *P* und λ oder σ und ϵ beim Versuch zu messen. Trotzdem ist man im Stande, ziemlich genau das Arbeitsvermögen aus den beim Versuch gefundenen Endwerthen bestimmen zu können.

Hier hilft uns die Erfahrung, welche lehrt, dass das Verhältniss, in welchem die Fläche des Arbeitsschaubildes [Σa] zur Fläche [a_1] des umschliessenden Rechteckes steht, für die meisten Materialien und Materialzustände eine Zahl ist, die ihren Werth nur in sehr geringem Maasse ändert.

Die Fläche des Rechteckes ist gegeben durch das allemal aus dem Versuch bekannte Produkt:

$$a_1 = \sigma_B \epsilon_Z, \text{ oder}$$

Bruchspannung mal Bruchdehnung.

Das Verhältniss zwischen der Schaubildfläche $[\Sigma a]$ und dem umschliessenden Rechteck nennt man den Völligkeitsgrad des Arbeits-schaubildes; er ist stets kleiner als 1 und soll in Zukunft bezeichnet werden als:

$$\xi = \frac{\Sigma a}{a_1} \dots \dots \dots 9.$$

Hiernach berechnet sich also das Arbeitsvermögen eines Mate-riales aus Bruchspannung, Bruchdehnung und Völligkeitsgrad, nämlich:

$$\Sigma a = \sigma_B \epsilon_Z \xi \dots \dots \dots 10.$$

Dieser Ausdruck bezieht sich auf cm kg/ccm.

Vielfach bezieht man das Arbeitsvermögen anstatt auf 1 ccm auch auf 1 g des Materiales; man erhält dann:

$$\Sigma a' = \sigma_B \epsilon_Z \xi \frac{1 \text{ cm kg}}{s \text{ g}}, \dots \dots \dots 10a.$$

da 1 ccm lückenlosen Materiales s g wiegt [s = spec. Gew.].

52. Um ein erschöpfendes Bild von dem Verhalten des Materiales beim Zerreißversuch zu gewinnen, muss auf einen Fall zurückgegriffen werden, der bereits besprochen wurde, nämlich auf das Verhalten des Materiales beim wiederholten Be- und Entlasten. Zu dem Zwecke sei aber als Beispiel vom Eisen auf einen Stab aus Magnesium übergegangen, weil dieses Metall die jetzt zu besprechenden Eigenschaften besonders deutlich zeigt, nämlich die sogenannten Nachwirkungserscheinungen.

53. Wenn man einen Körper schnell aber stossfrei belastet, so dass er nicht in Längsschwingungen gerathen kann, so nimmt er nicht sofort

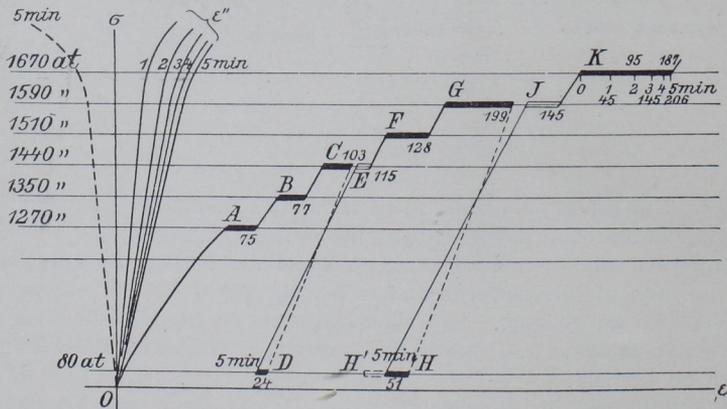


Fig. 11.

genau die Länge an, die ihm nach der Grösse der Last und nach seinen Festigkeitseigenschaften zukommt. Wenn man ihn nach der Belastung

sich selbst überlässt, so ändert er seine Länge unter dem Einfluss der Last sekunden-, minuten-, ja tage- und wochenlang.

Ein ganz ähnlicher Fall tritt ein, wenn man den Körper entlastet und ihn ohne Einwirkung der Last sich selbst überlässt; er verkürzt sich im Laufe der Zeit.

Diese Erscheinung der Formänderung im Laufe der Zeit nennt man die Nachwirkung. Die Nachwirkungen entziehen sich in der Regel der Wahrnehmung, denn man kann sie bei vielen Materialien nur mit sehr feinen Messinstrumenten feststellen; bei manchen, z. B. beim gewalzten Magnesium, treten sie deutlicher zu Tage, so dass man sie schon mit den gebräuchlichen Feinmessapparaten verfolgen kann.

Hier sei nun an der Hand eines thatsächlich ausgeführten Versuches (*L 107*) ein allgemeiner Ueberblick über den Verlauf dieser Erscheinungen gegeben (Fig. 11).

Hat man zunächst die Spannung bis zum Punkte *A* anwachsen lassen, so ist als Schaulinie der stetig gekrümmte Linienzug zu verzeichnen, weil der geprüfte Stab aus gewalztem Magnesium keine *P*-Grenze zeigt. Wird dann die Spannung bei *A* längere Zeit, z. B. 5 Minuten lang, gleichbleibend erhalten, so streckt in dieser Zeit der Stab noch nach; bei dem ausgeführten Versuch fand beispielsweise bei der Spannung 1270 at [oder kg/qcm] ein Nachstrecken ϵ'' um 0,00075 cm statt. Das Maass der Nachstreckung ist durch die Länge der stark ausgezogenen wagerechten Linie bei *A* angedeutet. Geht man nach Verlauf der 5 Minuten mit der Spannung bis nach *B* voran, wartet dann wieder 5 Minuten, um hierauf den gleichen Vorgang bei *C* zu wiederholen, so ist das Maass für das Nachstrecken ϵ'' in der gleichen Zeit bei *B* etwas grösser als bei *A*, und bei *C* etwas grösser als bei *B*; ebenso würde man bei *F*, *G* und *H* immer mehr ein Anwachsen der Nachstreckung wahrnehmen. Beobachtet man die Grösse des Nachstreckens von Minute zu Minute, so kann man das Gesetz, nach dem die Nachstreckung ϵ'' verläuft, übersichtlicher darstellen, wenn man für jede Spannung von der Nulllinie aus nach rechts hin die Grösse der Nachstreckung für jede Minute aufträgt. Man erhält eine Liniengruppe ϵ'' 1, 2, . . . 5 u. s. w. (*L 108*, 1887, S. 72).

Wenn man von irgend einem Punkte, etwa *E* oder *J* aus, z. B. auf die Spannung 80 at entlastet, so geht die Dehnung nach der gestrichelten Linie auf den Punkt *D* oder *H* zurück und es erfolgt im Laufe der Zeit eine weitere Zusammenziehung, deren Grösse durch die Längen der starken Striche angedeutet ist. In gleicher Weise, wie vorher das Gesetz der Nachstreckung, kann man auch die Nachverkürzung auftragen; man erhält als Schaubild die gestrichelte Linie links von der Nulllinie.

Wie schon früher bemerkt, sind die Beträge des Nachstreckens und Nachkürzens sehr klein. Um ein Bild hierüber zu geben, ist Tab. 4 S. 30 entworfen, die diese Verhältnisse für einen Magnesiumstab enthält.

Die in Vorstehendem berührten Erscheinungen haben für Magnesium eine sehr eingehende Behandlung in meiner Veröffentlichung (*L 107*) erfahren. Ausserdem machte ich in den „Mittheilungen“ bei verschiedenen Gelegenheiten auf ähnliche Erscheinungen an anderen Körpern aufmerksam (*L 109* u. *110*). Aus den Ausführungen über das Magnesium füge ich hier noch einige Bemerkungen hinzu, die zeigen sollen, in welchem Maasse die Erscheinung der Nachwirkungen unser Interesse verdient.

Tabelle 4. Nachwirkungserscheinungen bei Magnesium.

σ at	ε'' in $\frac{1}{100000}$ cm ($=$ cm 10^{-5}) nach Minuten					ε cm 10^{-5}
	1	2	3	4	5	
1270	16	29	37	44	50	385
1350	20	29	36	46	51	417
1430	19	30	50	55	69	450
80	- 4	- 10	- 11	- 13	- 16	98
1430	33	51	61	72	77	464
1510	33	51	59	77	85	502
1590	47	72	107	114	132	548
80	- 11	- 17	- 28	- 31	- 34	158
1590	23	47	66	83	97	577
1670	30	63	95	125	137	628

Der Einfluss der Nachwirkungsverkürzung lässt sich selbst durch den folgenden Zustand der Nachstreckung infolge der Wiederbelastung des Materiales hindurch erkennen (a. o. O. S. 33), ebenso wie umgekehrt die Nachwirkungsstreckung auch von Einfluss sein wird auf die Grösse der bei der folgenden Entlastung vor sich gehenden Nachverkürzung. Mit anderen Worten, die Folgen irgend einer Einwirkung auf das Material hören nicht sofort mit dem Aufhören der Einwirkung auf, sondern sie beeinflussen auch die Folgeerscheinungen von späteren entgegengesetzten Einwirkungen. Unser Altmeister Bauschinger (*L 111*) hat auf ähnliche von der Zeit beeinflusste Erscheinungen, auf die zum Theil später besonders einzugehen sein wird (Abschnitt i. 2. Abs. 313), mehrfach aufmerksam gemacht.

Man erkennt den Einfluss der Vorbehandlung deutlich, wenn man einen Versuch, z. B. Zerreiassversuch bei stufenweiser Belastung mit gleichen Laststufen ohne Entlastungen, und einen zweiten mit ganz gleichem Material mit Entlastungen nach je 3 bis 4 Stufen ausführt. Im ersteren Falle wird man ein stetiges Fortschreiten in den Dehnungsunterschieden bemerken, während in der zweiten Reihe, die der Entlastung folgende nächste Stufe einen verhältnissmässig zu kleinen Unterschied zeigen wird, die Folge der während der Entlastung sich abspielenden Nachverkürzung, [Seite 69 des genannten Berichtes] (*L 110*). Diese Folgewirkungen laufen also, wenn man bildlich reden will, wie die Wellen auf der Wasseroberfläche, oft deutlich erkennbar und gesetzmässig, übereinander. Dem Betrage nach wiegt die Folgeerscheinung im Sinne des letzten Anstosses vor, während die voraufgehende des früheren, älteren Anstosses beträchtlich gedämpft wird und sich allmählich verliert.

Solche Vorgänge sind übrigens schon vielfach nachgewiesen worden. E. Warburg berichtet z. B.:

„Beim Kupfer zeigt sich die Schwingungsdauer [an aufgehängten, der Torsionsschwingung unterworfenen Drähten] abhängig von der seit einer Spannungsänderung verflossenen Zeit, und zwar mit wachsender Zeit abnehmend, mochte die Spannungsänderung in einer Zu- oder Abnahme der Spannung bestehen. Dasselbe haben Pisati und P. M. Schmidt für die Dämpfungskonstanten bei verschiedenen Metallen gezeigt.“ — „Wenn man einen Draht [Kupfer], dem eine gewisse permanente Torsion ertheilt worden ist, belastet, so entzieht man ihm dadurch, wie Wiedemann gezeigt hat, dauernd einen Theil seiner permanenten Torsion; bei einer folgenden Entlastung bleibt nämlich die verkleinerte Torsion bestehen oder verringert sich noch mehr. Wiederholte Belastung und Entlastung wirkt in demselben Sinne mit abnehmender Intensität und schliesslich gelangt der Draht in einen Zustand, in welchem eine dauernde Aenderung der permanenten Torsion durch Belastung und Entlastung nicht mehr eintritt.“

Aehnliche Versuche anderer Forscher haben ergeben, dass die Schwingungsnulldage bei Torsionsschwingungen von Drähten nach der Richtung des ersten Anstosses sich verschiebt, dass sie beim Anstoss in entgegengesetzter Richtung sich im gleichen Sinne zurückbewegt, so wie dass der Sinn der voraufgehenden Antriebe von Einfluss auf die Grösse der Wirkung der folgenden ist. Vergleicht man hiermit die von Bach, Hartig u. a. neuerdings veröffentlichten Prüfungsergebnisse an Mörteln, Beton, Leder und anderen Materialien, so kann es nicht entgehen, welche Fälle von interessanten und praktisch bedeutungsvoll werdenden Umständen das eingehendere Studium noch bringen wird (*L 112*).

54. Man sieht aus den voraufgehenden Darstellungen, dass die besprochenen Nachwirkungserscheinungen, so interessant ja ihr Studium an sich auch immer ist und so sehr sie vielleicht in der Folge auch bei den Materialprüfungen beachtet werden mögen, doch in der Regel keine wesentliche Bedeutung für den Konstrukteur haben. Sie sind erstens an sich nur von sehr kleinem Betrage und meistens noch viel geringfügiger als beim Magnesium, und treten zweitens besonders erst unter solchen Spannungen merklich hervor, die oberhalb der in der Konstruktion benutzten Grenzwerte liegen. Für die genaue Erkenntniss der Stoffeigenschaften behält ihr Studium natürlich seinen Werth.

Es giebt aber auch noch Nachwirkungserscheinungen, die sich bei Beanspruchungen innerhalb der *E*-Grenze abspielen, die sogenannten elastischen Nachwirkungen. Das Studium dieser Erscheinungen ist nur unter Anwendung der allerfeinsten Hilfsmittel der Beobachtungskunst möglich, es gehört unzweifelhaft zu den anregendsten Gebieten der Naturwissenschaft, hat aber für den Konstrukteur bis jetzt noch keinen unmittelbaren Nutzen, und deswegen soll hier nicht weiter auf den Gegenstand eingegangen werden.

Druckfestigkeit.

55. Die Verhältnisse und Begriffe beim Druckversuch sind ganz ähnlich denen beim Zugversuch; man hat sich nur die Kräfte in umgekehrter Richtung wirkend zu denken.

In Fig. 12 sei wiederum ein sehr langer, prismatischer Stab vorausgesetzt, auf dessen ausgewähltem Abschnitt *aa*, *bb* die Kräfte $-P$ (Fig. 12) zusammendrückend in der Mittellinie des Stabes wirken. Statt der Verlängerung λ beim Zugversuch entsteht eine Verkürzung $-\lambda$, statt der Querschnittsverminderung eine Querschnittsvergrößerung. Die Beziehungen zwischen Kräften, Spannungen und Formänderungen sind ähnlich wie bei der Zugbeanspruchung; führt man die alten Bezeichnungen erforderlichen Falles mit negativem Vorzeichen ein, so lassen sich diese Beziehungen wie folgt ausdrücken.

Die Beanspruchung in irgend einem Querschnitt *f* des prismatischen Körpers ist:

$$-p = \frac{-P}{f} \text{ oder}$$

die Spannung:

$$-\sigma = -p = \frac{-P}{f}.$$

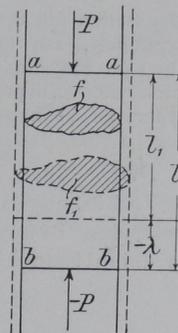


Fig. 12.

Die Verkürzung, die der Körper unter dem Einfluss der Druckspannung erfährt, ist:

$$-\lambda = l_1 - l.$$

Die Verkürzung der Längeneinheit, die Quetschung, ist:

$$-\varepsilon = \frac{-\lambda}{l}, \text{ oder}$$

in Procenten der ursprünglichen Länge:

$$-\delta = -\varepsilon 100 = \frac{-\lambda}{l} 100 = \left(\frac{l_1}{l} - 1 \right) 100.$$

Die Quetschungszahl α , d. h. die Quetschung der Längeneinheit für die Spannungseinheit ist:

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma} = \frac{-\lambda}{l} \cdot \frac{1}{-\sigma} = \frac{-\lambda}{l} \cdot \frac{f}{-P}.$$

Aehnlich wie früher, kann man auch schreiben:

$$-\varepsilon = \alpha \cdot -\sigma, \text{ und}$$

für die Quetschung des Stabes von der Länge l :

$$-\lambda = \alpha \cdot -\sigma l, \text{ und}$$

für die Spannung:

$$-\sigma = \frac{-\varepsilon}{\alpha}.$$

Der Elastizitätsmodul für Druck ist demnach:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{-\sigma}{-\varepsilon} = E.$$

Die unter dem Einflusse der Druckspannung erzeugte Querschnittsvergrößerung lässt sich durch:

$$S = f_1/f, \text{ oder}$$

in Procenten des ursprünglichen Querschnittes:

$$q = \left(\frac{f_1}{f} - 1 \right) 100$$

ausdrücken.

Sollen die Spannungen, ebenso wie in Absatz 36 S. 19, für den Zugversuch angegeben, auf den jeweils erreichten mittleren Querschnitt bezogen werden, d. h. also auf die Querschnittsfläche eines prismatischen Körpers, dessen Inhalt gleich dem Körperinhalt des zusammengedrückten und ausgebauchten Probekörpers ist, so kann man die Beziehung ohne weiteres schreiben

$$\sigma_1 = \sigma (1 - \varepsilon).$$

56. Auch beim Druckversuch erweisen sich bei vielen Materialien die Verkürzungen anfangs als proportional den Spannungen, sie haben also auch eine Proportionalitätsgrenze für Druckbeanspruchung (σ_P); bis dahin ist:

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma} = \text{konst.}; \text{ d. h. auch } \alpha = \frac{-\Delta\varepsilon}{-\Delta\sigma} = \text{konst.}$$

Das Verhältniss zwischen Verkürzungszuwachs und Spannungszuwachs ist gleichbleibend.

Zeichnet man für einen Körper mit deutlicher $-P$ -Grenze, z. B. für Eisen, ein Schaubild (Fig. 13), indem man in Ergänzung zu dem Schaubilde zur Zugspannung, die Druckspannungen nebst den zugehörigen Verkürzungen in negativem Sinne aufträgt, so erhält man das Bild, wie es in Fig. 13 dargestellt ist.

Die Proportionalitätsgrenze liegt bei $-P$, da wo die Schaulinie aufhört gerade zu sein. Sind die Dehnungszahlen des Materials für Zug und Druck gleich, so wird die Strecke $-POP$ eine Gerade. Die Streck- oder Fließgrenze für Druckbeanspruchung ist mehr oder minder deutlich ausgeprägt; man bezeichnet sie als Quetschgrenze $[-S]$. Die Bruchgrenze für Druck $[-B]$ ist nur bei spröden Stoffen, z. B. Gusseisen, Stein, Zement u. a., deutlich ausgesprochen, während zähe und bildsame Körper, wie z. B. Blei, Kupfer, Flusseisen u. a. nicht zu Bruche gebracht werden können, da sie ganz ausserordentlich grosse Formänderungen unter

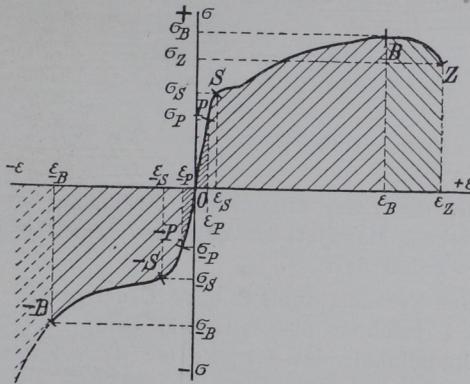


Fig. 13.

Druckbeanspruchung vertragen, ohne dass irgend ein Anzeichen von Bruch auftritt. Bei diesen Körpern kann man die Druckkraft sehr stark steigern, ohne Bruch zu erzeugen, wie dies durch den punktierten Verlauf der Druckschaulinie (Fig. 13) angedeutet worden ist.

Die letzten Sätze sind aus den landläufigen Anschauungen und Erfahrungen abgeleitet, die sich eigentlich immer nur auf Körper von im Verhältniss zu ihrem Querschnitt sehr beschränkter Länge beziehen. Der einfacheren Darstellung an Hand der täglichen Erfahrung zu Liebe wurde stillschweigend auf den kurzen Stab zurückgegriffen. Es ist in der That sehr schwer, den Druckversuch mit Ausschluss aller Nebenbeanspruchungen am langen Stabe durchzuführen. In diesem Falle würden aber die Verhältnisse sich wohl ein klein wenig anders gestalten, insofern als beim langen Stabe die Tonnenform der gedrückten Körper in vielen Fällen örtlich eintreten würde, ähnlich wie die Einschnürung beim Zugprobekörper.

57. Bei den Körpern, die beim Druck an sich nicht zu Bruch gehen, kann man also auch die Höchstspannung σ_B [Bruchgrenze] nicht als Gütemaassstab für das Material benutzen, weil sie nicht charakteristisch ist, sondern nur davon abhängt, wie weit zufällig der Versuch geführt worden ist. Für den Konstrukteur genügt es in den allermeisten Fällen die Lage der Quetschgrenze zu kennen, bei welcher das Material anfängt unter der Last in erheblichem Maasse nachzugeben. Als Gütemaassstab für die zähen Körper muss man daher die Quetschgrenze einführen, während man für die spröden die Bruchgrenze zu benutzen pflegt. Beide Maassstäbe sind also nicht unmittelbar vergleichbar; sie gelten, jeder für sich, nur in seinem Bereiche.

58. Bei elastischen Stoffen macht sich die Eigenschaft der Elasticität auch beim Druckversuch geltend. Man hat auch hier einen Abschnitt, in dem der Körper in seine frühere Gestalt wieder zurückkehrt. Demgemäss wird auch hier zwischen bleibender und elastischer Verkürzung unterschieden; man kennt den Verkürzungsrest und die Federung. Wie beim Zugversuch machen sich auch beim Druckversuch Nachwirkungerscheinungen bemerkbar.

59. Ebenso folgt die Querschnittsvergrösserung beim Druckversuch ähnlichen Gesetzen wie die Querschnittsverminderung beim Zugversuch; innerhalb der Elasticitätsgrenze gilt, wie dort:

$$\varepsilon_q = -\varepsilon \frac{1}{m}, \text{ oder}$$

$$\alpha_q = a \frac{1}{m},$$

worin m eine Zahl, die nach allgemeiner Erfahrung zwischen 3 und 4 liegt und bei gleichem Material für Zug- und Druckbeanspruchungen als gleich angesehen werden darf.

Die bleibenden Formänderungen beim Druckversuch an Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 erfolgen ebenfalls wie beim ZerreiBversuch in der Weise, dass der Rauminhalt des Körpers bei jeder Formänderung nahezu der gleiche bleibt.

60. Wie beim Zugversuch kann man aus dem Produkt der Spannungen und zugehörigen Verkürzungen die Arbeit ableiten, welche irgend ein Körpertheil entwickelt, indem er der versuchten Formänderung widersteht. Wie früher findet man die spezifische Arbeit a , welche die Raumeinheit des Materials der Formänderung entgegengesetzt:

$$a = \Sigma \sigma \cdot -\varepsilon.$$

Aus dem Schaubilde kann man, wie früher, die Gesamtarbeit ableiten.

Die Dreiecksfläche $O, -P, \varepsilon_P$ (Fig. 13) ist die Summe der spezifischen Arbeit bis zur $-P$ -Grenze oder das elastische Arbeitsvermögen:

$$a_{-P} = \frac{1}{2} \sigma_{-P} \cdot \varepsilon_{-P}.$$

Die bis zur Quetschgrenze $[-S]$ oder bis zur Bruchgrenze $[-B]$ zu überwindende Widerstandsarbeit ist durch den Flächeninhalt $O, -P, -S, \varepsilon_S, O$ oder durch $O, -P, -S, -B, \varepsilon_B, O$ (Fig. 13) gegeben. Wie aus dem Voraufgehenden einleuchtet wird, hat für den Konstrukteur der Theil jenseits der Streckgrenze verhältnissmässig wenig Werth; nur bei den wirklich zu Bruche gehenden Körpern ist ein bestimmter Betrag an Formänderungsarbeit dem Stoffe charakteristisch. Der Technologe wird aber auch den Theil über $-S$ hinaus nicht ohne weiteres ausser Acht lassen, weil er ihm in vielen Fällen Anhalt für die Beurtheilung der Verarbeitbarkeit des Materiales giebt.

2. Das Wesen der Probirmaschinen und Messwerkzeuge.

61. Bisher wurde das Verhalten eines sehr langen Stabes betrachtet, der dem Zerreißversuch oder dem Druckversuch unterworfen ist. Zur praktischen Ausführung des Versuches muss aber der Stab auf geeignete Weise in die Maschine, mit deren Hülfe die Festigkeitsversuche auszuführen sind, befestigt oder eingespannt werden. Weil aber dieser Umstand, so wie die Art und Einrichtung der zur Versuchsausführung benutzten Maschine einen gewissen Einfluss auf das Versuchsergebniss haben, so ist es nothwendig, hier ganz kurz auf die Hauptanordnung der Maschinen und der Einspannvorrichtungen einzugehen. Aus gleichem Grunde ist es auch nöthig, schon an dieser Stelle einen ganz kurzen Ueberblick über das Wesen der Messwerkzeuge für die Formänderung zu geben, obwohl die eigentliche eingehende Besprechung dieser Dinge und der praktischen Versuchsausführung auf die letzten Abschnitte dieses Buches verschoben werden soll.

Da die an dieser Stelle gegebene Beschreibung im Wesentlichen nur Gesichtspunkte über die Versuchsausführung geben und als Ausgangspunkt für die Besprechung des Einflusses der Versuchsausführung auf das Ergebniss dienen soll, so gebe ich die Beschreibungen hier nur in schematischer Form, das nähere Eingehen für die späteren Abschnitte vorbehaltend.

a. Festigkeitsprobirmaschinen.

62. Die Festigkeitsprobirmaschine besteht in der Regel aus drei Haupttheilen, nämlich aus

- A) der Antriebvorrichtung oder dem Spannwerk; meistens eine Schraube mit Schnecken- und Wurmrad oder eine hydraulische Presse;
- B) der Kraftmessvorrichtung, Kraftmesser, Messwerk; meistens eine Balken-, hydrostatische oder Federwaage;
- C) dem Maschinengestell.

Die Aufgabe des Spannwerkes ist es, die Kraft auf den Probestab zu übertragen, die in ihm die Spannung σ erzeugt.

Aufgabe des Kraftmessers ist es, die Grösse dieser Kraft mit hinreichender Genauigkeit zu messen.

Aufgabe des Maschinengestells ist es, die von dem Kraftmesser aufgenommene Kraft wieder auf das Spannwerk zurückzuführen und so den Kreislauf zu schliessen.

63. Zwischen Spannwerk und Kraftmesser ist der Probestab einzuspannen. Zu dem Zweck sind sowohl Spannwerk als auch Kraftmesser mit Vorrichtungen, den Spannköpfen oder Mäulern versehen, welche die Probestäbe an deren Enden erfassen.

64. Um in der Ausdrucksweise kurz sein zu können und das Wesentliche einer Maschine oder das Gemeinsame in einer ganzen Maschinengruppe leicht übersichtlich ausdrücken zu können, führte ich vor Jahren eine schematische Darstellungsweise ein (*L 113*), die auch hier beibehalten werden soll, so lange nicht auf die Besprechung von Einzelheiten eingegangen werden muss. Die zur Anwendung kommenden Bezeichnungen und Ausdrucksweisen sind folgende:

Die Bezeichnungen für die Art des Antriebes sind in Fig. 14 gegeben; es bedeutet Bild *a* eine Schraube, *b* bis *d* eine hydraulische Presse mit Tauchkolben (*b*), mit Ringkolben (*c*) oder mit Liderkolben (*d*).

65. Von den verschiedenen Bauarten für die Kraftmesser seien hier nur die Hauptarten in ihren wesentlichen Zügen angeführt und ihre schematische Darstellungsweise in den Fig. 15—22 angedeutet.

Man kann zwei Hauptgruppen unterscheiden, eine, bei welcher die auf den Probestab wirkende Kraft *P* [Belastung, Last] sprungweise [stufen-

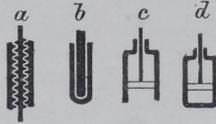


Fig. 14.

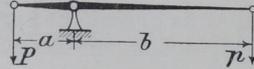


Fig. 15.

weise] erhöht und eine, bei der die auf den Stab wirkende Kraft *P* stetig erhöht wird.

In der ersten Gruppe wächst das Moment $Pa = pb$ (Fig. 15 und 16) sprungweise; man kann hierbei zwei Hauptarten unterscheiden:

65a. Hebelwaage, Fig. 15 [zweiarmig, einarmig, Winkelhebel]. Das Uebersetzungsverhältniss a/b des Hebelwerkes ist gleichbleibend; die Kraft *p* ist veränderlich; Aufsatzgewichte von Hand bethätigt [die einfache Hebelwaage findet sich z. B. an den Maschinen von Werder, Rudeloff, Mohr & Federhaff].

65b. Hebelwaage mit mechanisch aufsetzbaren Gewichten, Fig. 16. Das Gewicht *p* ist stufenweise veränderlich, das Uebersetzungsverhältniss a/b gleichbleibend [solche Einrichtungen finden sich an den Maschinen von Emery, Gollner, Martens].

Die Gewichte [Scheiben] *p* werden durch irgend eine mechanische Einrichtung aufgesetzt, die eine meistens hin- und hergehende Bewegung [durch

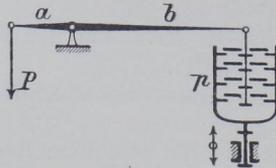


Fig. 16.

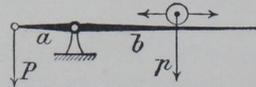


Fig. 17.

den nebengesetzten Doppelpfeil angedeutet] ausführt. [Die mit dem Maschinengestell fest verbundenen Theile (Stützpunkte, Führungen u. s. w.) sind in allen schematischen Zeichnungen durch Schraffirung gekennzeichnet].

Die Einrichtungen zweiter Art haben gewöhnlich den Vorzug, dass die Gewichte stossfrei aufgesetzt und keine heftigen Stöße und Erschütterungen auf den Probestab übertragen werden können; man kann auch nicht so leicht Irrthümer beim Aufsetzen und Auszählen der Gewichte begehen. Ferner kann man leichter als bei den Einrichtungen erster Art Entlastungen vornehmen. Man muss aber, wenn nicht die Einrichtungen gar zu verwickelt werden sollen, zur Erreichung feinerer Abstufungen auch bei Einrichtung *b* noch mit kleineren Aufsatzgewichten arbeiten.

Bei der zweiten Gruppe der Kraftmessvorrichtungen erfolgt eine stetige Vermehrung der Belastung P ; das kann auf verschiedene Weise geschehen.

65c. Laufgewichtswaage, Fig. 17. Hierbei ist a und p gleichbleibend und das Uebersetzungsverhältniss a/b veränderlich. Das Laufgewicht p kann von Hand verschoben werden, so dass entweder stufenweise Belastung [entsprechend den Fällen a und b] erfolgt, oder stetige, so dass der Hebel immer in der Gleichgewichtslage bleibt. Diese Arbeit wird häufig auch durch mechanische Einrichtungen aller verschiedenster Art selbstthätig von der Maschine bewirkt. Hierbei wirkt die Maschine meistens als Relais zur Auslösung und Steuerung der Bewegungsvorrichtung für das Laufgewicht [Laufgewichtswaagen haben die Maschinen von Riehle, Olsen, Wicksted, Martens].

65d. Neigungswaage, Fig. 18. Hierbei ist p gleichbleibend und a_1 und b_1 sind veränderlich, wenn man mit a_1 und b_1 die mathematisch in Betracht kommenden Hebellängen bezeichnet. Setzt man die übrigen Bezeichnungen als aus der Fig. 18 bekannt voraus, so kann man die Theorie der Neigungswaage in Kürze schreiben:

$$P a_1 = p b_1; \quad a_1 = a \cos \varphi; \quad b_1 = b \sin \varphi$$

$$P = p \frac{b_1}{a_1} = p \frac{b \sin \varphi}{a \cos \varphi} = p \frac{b}{a} \operatorname{tg} \varphi$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P a}{p b} = \frac{n}{m} \quad \text{oder}$$

$$P = n \left(\frac{p b}{m a} \right), \quad \text{d. i. abgekürzt}$$

$$P = n a.$$

Der Ausschlag n , gemessen auf einer Geraden im Abstände m vom Hebelrehpunkt, ist also das Maass für die Belastung des Probekörpers. Wie man erkennt, kann man durch Auswahl von m die Konstanten der Maschine, d. h. den Maassstab für n verändern. Hierdurch hat man es bei genügender Anordnung in der Hand, zu erreichen, was unter Absatz 40, S. 22 angedeutet wurde, nämlich den Maassstab für verschiedene Stabquerschnittsgrössen f so zu wählen, dass die Theilung für die Kraftanzeige nach Spannungen $[\sigma]$ ausgeführt werden kann. Man kann aber auch durch geeignete Uebertragungen die Kraftanzeige in vergrössertem Maassstabe oder in wechselndem Uebersetzungsverhältniss wiedergeben. [Die Neigungswaage findet sich bei den Maschinen von Pohlmeier, v. Tarnogrocki, Schopper.]

65e. Federwaage, Fig. 19. Bei der Federwaage wird die elastische Spannkraft der Feder zur Erzeugung der veränderlichen Kraft p benutzt, die meistens gleich der Belastung P ist, weil diese in der Regel unmittelbar an die Feder angreift. Der Weg, den das lose Federende zurücklegt, die Formänderung der Feder, dient als Maassstab für die Kraft p bzw. Belastung P . Die Federwaage ist fast nur für geringe Kraftäusse-

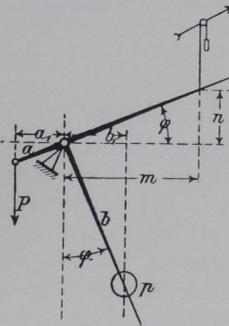


Fig. 18.

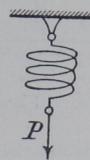


Fig. 19.

rungen [Belastung P] in Benutzung, weil bei starken Federn die Formänderungen zu klein und die Fehlerquellen zu gross werden. [Federwaagen sind in Benutzung bei zahlreichen älteren, sogenannten Dynamometern, Dasytmetern u. s. w., bei den Festigkeitsprobirmaschinen für Papier, Gewebe, Drähte u. s. w., z. B. bei den Apparaten von Hartig-Reusch, Wendler, Martens.]

65f. Hydrostatische Waagen, Fig. 20 u. 21. Bei diesen Waagen wird die Kraft p durch den Druck einer Flüssigkeitssäule gemessen, deren Höhe das Maass dieser Kraft, also auch von P ist. Die Uebertragung und

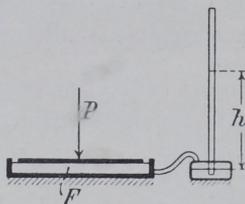


Fig. 20.

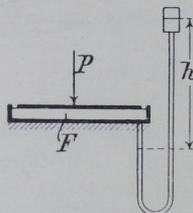


Fig. 21.

Vergrößerung von p auf P geschieht dann meistens auch auf hydraulischem Wege. Es möge genügen, hier zwei Formen dieser Art der Kraftmessung zu erwähnen.

Bei beiden wirkt die Kraft P unmittelbar, oder mittelbar durch Hebelwerk, auf den Kolben [Deckel] eines Gefässes, dessen Flüssigkeit meistens mit einem Quecksilbermanometer in Berührung steht. Bei der einen Bauart (Fig. 20) steigt die Quecksilbersäule im feststehenden Rohr [Maschinen von Amsler-Laffon, Chauvin & Marin Darbel, Maillard, Emery].

Die Steighöhe h ist das Maass für P . Bei der anderen Bauart (Fig. 21) wird das Quecksilbergefäss gehoben, bis das Einspielen einer Marke anzeigt, dass die Gleichgewichtslage herbeigeführt wurde. Die Erhebung h ist das Maass für P .

Es ist gegeben durch

$$P = \frac{h}{76} \cdot F,$$

worin F die wirksame Kolbenfläche des Gefässes und die Zahl 76 der Höhe der Quecksilbersäule für 1 at = 1 kg/qcm entspricht [Maschine von Martens].

65g. Federmanometer, Fig. 22. Man kann statt der Quecksilbermanometer Federmanometer anwenden und bekommt dann eine Bauart,

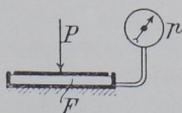


Fig. 22.

bei welcher eigentlich der unter e genannte Grundsatz benutzt wird, mit dem Unterschiede nur, dass statt des unmittelbaren Angriffes an die Feder eine Wasser-Übertragung stattfindet. Diese Art der Kraftmessung wird in der Praxis viel gebraucht. Für Probirmaschinen ist sie namentlich bei der grössten bis jetzt bekannten Maschine in Phönixville, Nordamerika, angewendet.

[Sonst findet man sie noch bei Maschinen von Whitworth, und Schmierölprobirmaschinen von Napoli, Martens. In der Versuchsanstalt zu

Charlottenburg ist sie bei Maschinen zur Gesteinsprüfung in Gebrauch. Die hydraulische Uebertragung und Kraftverkleinerung benutzt Emery in Verbindung mit einer Wage nach dem Grundsatz 65b Fig. 16.]

β . Einspannen der Probekörper.

66. Um die Probekörper in die Mäuler der Maschine einspannen zu können, werden sie entweder mit sogenannten Köpfen oder Schultern versehen, oder sie werden als prismatische Stäbe ohne Köpfe in Einspannvorrichtungen eingelegt, die den Stab mittelst Reibung an seiner Oberfläche erfassen und ihn so fest halten. Man pflegt für die Zerreißversuche meistens Stäbe von kreisförmigem oder rechteckigem Querschnitt, Rund- oder Flachstäbe, zu verwenden; bei Druckversuchen pflegt man die prismatischen Körper mit ebenen Endflächen zwischen ebenen Platten der Einspannvorrichtung der Maschine zu prüfen.

Einige charakteristische Formen der Einspannung seien in Folgendem angeführt; die Einzelheiten werden später am Schluss des Buches mitgeteilt werden.

Einspannung für den Zugversuch.

67. Rundstäbe werden entweder nach Maassgabe von Fig. 23 u. 24 mit dickeren Ansätzen, Köpfen, versehen, oder man lässt die Stäbe ganz und gar cylindrisch.

68. Bei Benutzung von Köpfen geschieht die Uebertragung der Kraft vom Maul auf den Stab entweder mit Hülfe der Ansatzfläche am Kopf, oder mittelst eines Schraubengewindes, welches auf die Mantel-

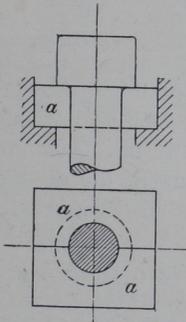


Fig. 23.

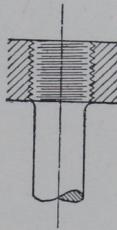


Fig. 24.

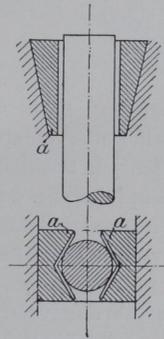


Fig. 25.

fläche des Kopfes aufgeschnitten ist. Im ersten Falle (Fig. 23) wird die Verbindung zwischen Stab und Maul vielfach mit Hülfe von getheilten Einlagestücken *a* bewirkt. Im zweiten Falle (Fig. 24) besorgt eine zweckmässig geformte Mutter die Verbindung zwischen Stab und Maul.

69. Die Einspannung eines völlig cylindrischen Stabes mit sogenannten Beisskeilen *a* ist in Fig. 25 gezeigt. Sie gleiten mit dem Rücken auf ebenen schrägen Flächen des Maules und pressen sich auf diese Weise bei wachsender Zugkraft immer fester mit den Zähnen ihrer Greifflächen in die Staboberfläche ein. Diese Greifflächen sind mit Feilenhieb versehen, der, ganz fein anfangend, nach dem Stabende hin immer gröber wird.

Wenn nun in Folge mangelhafter Bearbeitung oder in Folge mangelhafter Wirkung des Maules die Auflagefläche in Fig. 23 nicht senkrecht zur Stabachse steht, oder wenn in Fig. 24 die Mittellinie des Gewindes nicht mit der Mittellinie des Stabes zusammenfällt, oder wenn in Fig. 25 die Keile nicht so wirken, dass die Resultante aus allen Kräften mit der Stabachse zusammenfällt, so findet eine schiefe Beanspruchung statt. Hierdurch werden Biegungen im Stabe erzeugt und das Prüfungsergebniss kann erheblich beeinflusst werden. Man darf also die Einspannvorrichtungen Fig. 23—25 nur anwenden, wenn man sauber bearbeitete Probestäbe und gut konstruirte Maschinen hat, sonst aber muss man Vorkehrungen treffen, die solche schiefen Beanspruchungen möglichst ausschliessen.

70. Eine viel benutzte Einrichtung dieser Art ist die Lagerung in Kugelflächen. Anfangs erzeugte man die Kugelflächen unmittelbar an den Stabköpfen (Fig. 26), aber wenn die Flächen genau werden sollten, war das keine leichte Arbeit, und Stäbe, die an anderen Orten angefertigt waren, passten sehr selten in die Hohlkugelflächen der Einspannmauler der Maschinen. Deswegen ist man jetzt allgemein zu Formen übergegangen, die der in Fig. 27 gegebenen ähnlich sind.

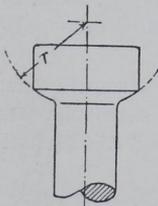


Fig. 26.

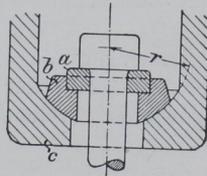


Fig. 27.

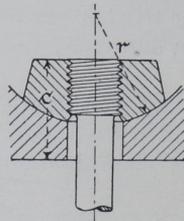


Fig. 28.

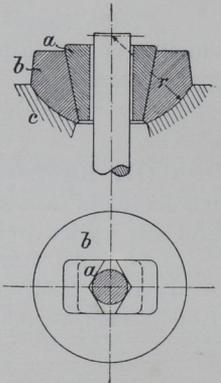


Fig. 29.

Hierbei hat man die Kugel *b* für sich aus gutem Stahl hergestellt; sie passt in eine entsprechende Hohlfläche des Maules *c*. Der Stab wird mit zwei halben Stahlringen *a* in der Kugel befestigt. Stäbe mit Gewinde an den Köpfen (Fig. 24), pflegt man in Muttern einzuschrauben, die die Kugelflächen an sich tragen (Fig. 28). Auch die Einspannung mit Beilagekeil hat man vielfach ähnlich ausgebildet, wie es beispielsweise Fig. 29 zeigt.

In einem in den „Mittheilungen“ (L 114) veröffentlichten Gutachten über die Ausführung von Festigkeitsversuchen sagte ich über die Kugellager Folgendes:

„Das Kugellager hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Erstens soll es etwaige Ungenauigkeiten in der Bearbeitung des Kopfes am Probestab ausgleichen, und zweitens soll es den etwa beweglichen Theilen der Einspannvorrichtungen der Maschinen gestatten, sich in die Zugrichtung so einzustellen, dass kein biegendes Moment auf den Stab ausgeübt wird. Letztere Bedingung ist übrigens wegen der Reibung in den Kugelflächen überhaupt nicht vollkommen zu erfüllen, und es dürfte daher nicht unzweckmässig sein, von der Einschaltung von beweglichen Gliedern soviel wie möglich Abstand zu nehmen und die Angriffstheile des Antriebes und der Kraftmessvorrichtung gegen Seitenbewegungen ganz zu sichern. Die beweglichen Glieder bringen häufig mehr Unsicherheit als Nutzen.“

„Die Berührung zwischen Vollkugel- und Hohlkugelflächen darf nicht derart sein, dass die eine oder die andere an zwei getrennten, womöglich gegen einander verschiebbaren Körpern gebildet ist; der Kugelkörper und die Kugelschale müssen vielmehr jede für sich ein Ganzes bilden. Beide Theile müssen derart geformt sein, dass mit Sicherheit darauf gerechnet werden kann, dass die

Kugelflächen als solche vollkommen sind und dass sie zusammenpassend geschliffen oder geschabt werden können. Die Kugelbewegung darf auf den Probestab keinen anderen Zwang ausüben als denjenigen, der durch die Reibung in den Kugelflächen bedingt ist; sie muss daher so konstruiert sein, dass bei allen vorkommenden Verschiebungen der beiden Flächen gegen einander die Mittelachse des Stabes durch den Kugelmittelpunkt geht.“ Bei der in Fig. 27 gegebenen An-

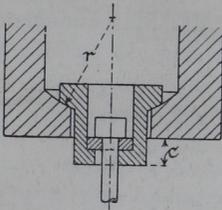


Fig. 30.

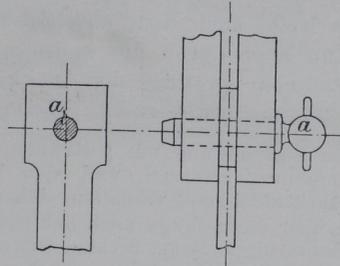


Fig. 31.

ordnung sind diese Bedingungen gewahrt. „Je näher die eigentliche Anlagefläche des Stabkopfes dem Kugelmittelpunkt liegt, desto grösser kann die Verschiebung der Kugel in ihren Hohlflächen sein, bevor die Stabmittellinie um ein bestimmtes [aber immer noch kleines] Maass aus dem Kugelmittelpunkt herausrückt; ein desto grösseres Maass von Ungenauigkeit des Kopfes vermag die Kugel auszugleichen.“

„Bei dem in Fig. 30 gezeichneten Kugellager liegt die Angriffsfläche des Stabes tief unter dem Kugelmittelpunkt und die Vollkugelfläche ist schwer genau herzustellen. Diese Einrichtung hat aber den praktischen Vortheil, dass der Stab eine grössere freie Länge für die Messung während des Versuches darbietet. Um diese bei der in Fig. 30 gegebenen Einrichtung so gross wie möglich zu machen, muss das Maass *c* möglichst klein gehalten oder der Stabkopf wie in Fig. 28 gezeichnet, unmittelbar mit dem Kugellager verschraubt werden“ [was aber nur ausnahmsweise geschehen sollte, denn das Gewinde wird nur dann mit hinreichender Genauigkeit passend zu machen sein, wenn es genau nach Originallehren hergestellt wird].

71. Stäbe mit kreisrunden Querschnitten können immer nur aus hinreichend dicken Stücken entnommen werden. Soll man aber Bleche

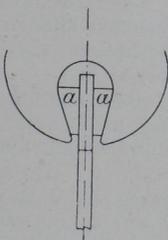


Fig. 32.

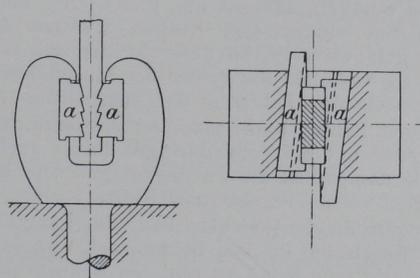


Fig. 33.

oder andere dünne plattenförmige Körper auf ihre Zerreiissfestigkeit prüfen, so pflegt man dem Probekörper einen rechteckigen Querschnitt zu geben, d. h. Flachstäbe zu benutzen.

Flachstäbe erhalten in der Regel eine gleichmässige Dicke, und die Köpfe werden breiter als der prismatische Theil gemacht. Der Kopf wird zuweilen mit einem genau in die Stabmittellinie fallenden Loch ver-

sehen, mit dessen Hilfe der Stab durch den Bolzen *a* (Fig. 31) in das Maul eingespannt wird. Man kann auch, wie in Fig. 32 gezeigt, den Stab an seinem breiten Kopfe mit Beisskeilen fassen, oder ihn mit eingefrästen Nuthen versehen. Die Beilagekeile werden im letzteren Falle mit dem gleichen Fräser hergestellt, so dass sie ganz genau passen. Alsdann brauchen die Beilagen eigentlich nicht keilförmig konstruirt zu sein, weil ja diese Keile auch ohne den Seitendruck schon den Stab sicher halten. Man kann aber durch die keilförmigen Beilagen die Einspannvorrichtung für Stäbe von verschiedener Dicke benutzen. In Fig. 33 ist die gleiche Möglichkeit auf etwas andere Weise erreicht worden.

Die Einspannung mit gefrästen Nuthen hat durch Bauschinger sehr viel Empfehlung erfahren, und man hat sich gegen die sogenannten Beisskeile häufig stark ablehnend verhalten. Ich glaube nach meiner Erfahrung verpflichtet zu sein, über diese Frage mich dahin zu äussern, dass jede dieser Einspannungsarten, rechtzeitig und am rechten Ort angewendet, ihre praktischen Vortheile hat. Die Beilagen mit eingefrästen Nuthen können nur dann fehlerfrei, d. h. ohne Biegungsspannungen auf den Stab auszuüben, wirken, wenn nicht nur die Nuthen, sondern auch die Beilagen ganz genau gearbeitet sind. Das ist aber fast ein Ding der Unmöglichkeit, was einleuchten wird, wenn man die Entstehung bedenkt. Zur Herstellung der Nuthen am Stab muss man in der Regel den Stab viermal umspannen, ihn jedesmal sehr genau ausrichten und darf ihn nicht verspannen, wenn die Nuthen ganz genau senkrecht zur Stabachse und auf den beiden Seiten einander genau gegenüberliegen sollen. Man kann ja bei einem genau mit parallelen Flächen bearbeiteten Stabe durch besondere Einspannvorrichtungen an der Fräsemaschine und durch Anbringung von Anschlägen einen ziemlich hohen Grad von Genauigkeit in oben genannter Beziehung erreichen, so lange man es immer mit Stäben bestimmter Form zu thun hat, aber auch dann wird die Sache sofort bedenklich, wenn die Fräser stumpf werden und nachgeschliffen werden müssen. Die Anfangs sehr gut passenden Beilagestücke passen nicht mehr, einzelne Nuthenflächen liegen an, andere nicht, und das satte Anliegen wird erst erzielt, wenn an den zuerst angreifenden Flächen die Quetschgrenze des Materiales erreicht ist. Dieser Vorgang kann aber nicht ohne vorausgehende Biegungsbeanspruchungen verlaufen. Wie wird nun die Sache erst da, wo keine guten Maschinen und sorgfältig geschulten Arbeiter zur Verfügung stehen? Aber selbst der ganz sorgfältig und genau hergestellte Stab wird mit den Beilagen nur ausserhalb der Maschine genau passen, denn es ist ja wieder ausserordentlich schwer, die vier Anlageflächen für die Beilagen so herzustellen oder in dem Zustande zu erhalten, dass sie alle gleichzeitig und voll zur Wirkung kommen. Die Beilagen mit eingefrästen Nuthen müssten ähnlich dem Kugelgelenk in den Mälern gelagert sein, so dass sie hier sich selbstthätig einstellen können, dann könnten sie vielleicht die Fehler der Einspannung im Maul beseitigen, aber immer noch nicht etwaige Fehler in der Bearbeitung des Stabes ausgleichen.

Einen Fehler kann man bei Anwendung gefräster Nuthen allerdings vermeiden oder auf ein sehr geringes Maass zurückführen, der bei Benutzung der Beisskeile namentlich die Feinmessungen sehr erheblich beeinträchtigen kann, das ist das ruckweise Vorgehen der Keile.

Gegen die Beisskeile hat man hauptsächlich eingewendet, dass sie das Material durch den starken Seitendruck und das Eindringen der Zähne schädigen und dass sie sehr leicht zu schiefen Beanspruchungen Anlass geben, weil sie an der einen Stabkante mehr zur Wirkung kommen können als an der anderen. Das kann alles nicht bestritten werden, wenn man schlecht konstruirte und schlecht benutzte Keile annimmt. Aber durch geschickte Wahl der Verhältnisse lässt sich vieles erreichen, und manche von den Einwendungen beruhen auf Vorurtheil.

Was den Einwand wegen zu starken Seitendruckes angeht, so ist er unter Umständen nicht unberechtigt, aber gegen den Seitendruck sind erstens die Materialien in verschiedenem Maasse empfindlich und zwar besonders die weichen, wie z. B. Zink (*L 115*), und zweitens kann man ja diesen Druck durch Ver-

grösserung der Angriffsflächen am Beilagekeil vermindern, auch selbst den Druck durch Wahl der Konstruktion so vertheilen, dass die Pressung gegen das Stabende hin allmählich zunimmt. Auch bei sehr hartem Material, z. B. hartem Stahl oder Bronzedrähten reissen die Proben häufig am Ende im Beginn der Einspannung; ich komme auf diesen Punkt noch zurück. Das Beschädigen der Proben durch eindringende Zähne lässt sich ja vermeiden, indem man ihre Form, Zahl und Grösse dem zu prüfenden Material anpasst. Wer Zinkblech prüfen will, wird die Keile vorn ganz glatt lassen und die weichbleibenden Flächen hinten nur eben mit der Feile aufrauen.

Der schiefe Angriff kann allerdings eintreten, wenn nicht die Beisskeile so konstruirt sind, dass sie, ähnlich wie das Kugellager, sich den Ungenauigkeiten am Probestab und den Anlageflächen im Maul der Maschine anpassen können. Das lässt sich aber, wenigstens bis zu einem ziemlich befriedigenden Grade erreichen, wie aus Folgendem hervorgehen wird.

72. Um auch beim Flachstabe die Ungenauigkeiten der Stabform, die zu schiefen Beanspruchungen Anlass geben könnten, möglichst auszugleichen, benutzt man auch hier vielfach die Kugellagerung. Sie kann etwa die in Fig. 34 angedeutete Bauart haben. Indessen kann man bei derartigen Einrichtungen immer nur verhältnissmässig schmale Stäbe prüfen, weil sich sonst leicht ungeschickte Abmessungen ergeben würden.

In der Praxis kann man nun nicht immer eine saubere Bearbeitung der Stäbe in allen Flächen eintreten lassen. Man findet daher vielfach

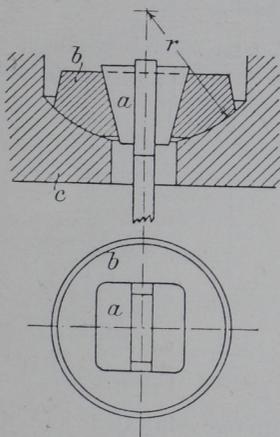


Fig. 34.

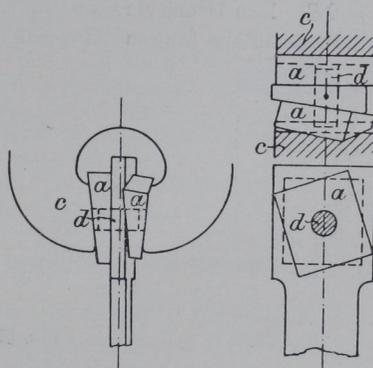


Fig. 35.

Einspannvorrichtungen, die es gestatten, selbst Stäbe mit Köpfen einzuspannen, die einen trapezförmigen Querschnitt haben, wie z. B. Stäbe, die aus den Schenkeln von Profileisen herausgeschnitten sind und roh geprüft werden sollen. Als Beispiel sei hier die Einrichtung von Mohr & Federhaff (Fig. 35) angeführt. Bei ihr wird der Stabkopf mit einem Loch versehen, in das der Bolzen des einen Beisskeiles passt, der zugleich auch in das Loch des zweiten Keiles eingreift. Hierdurch werden beide Keile vor der Verschiebung gegen einander und gegen den Probestab bewahrt. Dabei ist es aber den Keilen durch Drehung um den Bolzen d ermöglicht, auf den schiefen Seitenflächen des Probestabes sich so einzustellen, dass die Rückenflächen der Keile sich genau den Maulflächen des Einspannkopfes anpassen.

Es giebt aber noch einen anderen Weg, der in der Charlottenburger Versuchsanstalt seit Jahren mit praktischem Erfolge benutzt wird. Hier werden breite Keilbeilagen mit Feilenhieb benutzt, welche an die mittleren Kopfflächen angreifen, die durch ganz geringes Abfräsen an den Flanken des Kopfes entstanden sind (Fig. 36).

Bei der eben besprochenen Einrichtung ist dem Kopf seine Aufgabe gewahrt geblieben, nämlich das Abreissen des Stabes in seiner Mitte hervorzurufen, und die Möglichkeit ist ausgeschlossen, dass der Kraftangriff wesentlich ausserhalb der Mitte stattfinden kann. Bei den alten Beisskeilen, die namentlich dann, wenn die Mäuler bei häufiger Benutzung kleine Formänderungen erlitten hatten und wenn etwas schwache Beisskeile verwendet wurden [also bei dicken Stäben, die grossen Kraftaufwand erfordern], kam es vor, dass die an beiden Schmalseiten angesetzten Spiegelapparate verschiedene Dehnungen auf beiden Seiten anzeigten, ein Zeichen also, dass einseitige Inanspruchnahme erfolgte. Seit Anwendung des neuen Verfahrens hat sich die Sache wesentlich gebessert. Man muss sich hierbei nur hüten, die mittleren Angriffsflächen gar zu schmal und die Köpfe zu kurz zu machen, denn dann tritt in den Köpfen örtliche Ueberlastung ein, die betreffenden Stellen kommen zum Fliessen und beeinflussen [übrigens auch schon vorher] die Spannungsvertheilung im Versuchsquerschnitt, so dass die Spannung, also auch die Dehnung in der Mittelfaser, grösser wird als die der Seitenfasern. Praktisch wird man verlangen müssen, dass die Abmessungen so getroffen werden, dass die vorher ebenen Endflächen der Köpfe nach dem Versuch höchstens eine eben merkliche Ausbauchung zeigen. (Fig. 36).

Einspannung für den Druckversuch.

73. Den Druckversuch kann man nicht, wie den Zerreiissversuch, an verhältnissmässig langen Körpern ausführen; man muss sogar den Körper

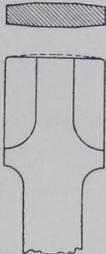


Fig. 36.

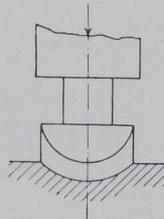


Fig. 37.

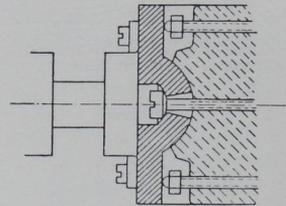


Fig. 38.

recht kurz machen, damit nicht verwickelte Vorgänge eintreten und der Körper nicht seitlich ausbiegt oder knickt.

In der Regel giebt man den für den Druckversuch bestimmten Körpern mit parallelen Endflächen einen kreisförmigen oder quadratischen Querschnitt und pflegt dann die Länge nicht viel grösser als den doppelten Durchmesser oder die doppelte Seitenlänge zu machen. Der Versuch wird zwischen zwei parallelen, hinreichend harten ebenen Flächen der Maschine ausgeführt, die also an Stelle der Einspannmäuler treten. Um eine ganz vollkommene Anlage dieser Druckflächen an die Endflächen der Probekörper zu erzielen, pflegt man eine oder beide Druckflächen einstellbar zu machen, indem man sie in einer Kugelfläche drehbar anordnet (Fig. 37 und 38). Um die Druckflächen namentlich in wagerecht angeordneten Maschinen parallel einstellen und erhalten zu können, werden die Hinterlager mit 3 oder 4 Schrauben versehen (Fig. 38), deren Kuppen gegen das Druckstück wirken.

Ein Fehler, den man bei vielen Maschinen, namentlich bei häufig benutzten, findet, ist der, dass die die Mäuler tragenden Glieder, oder die Mäuler selbst, mehr oder minder beträchtliche Seitenbewegungen zulassen. Dieser Fehler kommt besonders bei den Druckversuchen leicht zur Geltung, weil ja hier so zu sagen ein labiler Zustand herrscht, der den Theilen das Streben nach seitlicher Ausweichung von der Druckmittellinie giebt, während beim Zugversuch sich die Theile in die Zugmittellinie einzustellen streben. Er tritt beim Druckversuch um so mehr störend hervor, als er auf kurze Probestücke einwirkt. Diesem Fehler muss man selbstverständlich in erster Linie durch Verbesserung der Konstruktion der Maschine zu begegnen suchen, aber ein umsichtiger Beobachter wird ihn stets als vorhanden annehmen und ihn auszuschliessen streben. Besonders störend tritt er bei Versuchen zur Feststellung der elastischen Formänderung bei Druckversuchen hervor.

Für die mechanisch-technische Versuchsanstalt zu Charlottenburg konstruirte ich deswegen den in Fig. 39 angegebenen Apparat, der die beiden sauber eingeschliffenen Druckstempel in einem gusseisernen Rahmen so führt, dass jede Seitenbewegung der Druckflächen ausgeschlossen ist. Damit aber auch der Maschinendruck möglichst centrisch übertragen und genau die Kraft P gemessen wird, werden die Stempelenden selbst in Kugelschalen gelagert. Das Streben nach Seitenverschiebung in den Maschinentheilen ist vermindert, weil der Abstand der ausweichenden Punkte [Probenlänge plus Länge beider Stempel bis zu deren Kugelmittelpunkten] wesentlich grösser ist, als wenn nur die Probenlänge in Betracht kommt.

Einen Fehler hat übrigens auch diese Einrichtung, der aber praktisch wohl von unwesentlicher Bedeutung sein dürfte. Bei solchen Körpern, die nicht homogen sind, würde bei Anwendung einer [reibunglosen] Kugelbewegung die Druckfläche, entsprechend dem verschiedenen Widerstande der Körpertheile, sich neigen. Das ist natürlich bei der Konstruktion nach Fig. 38 ausgeschlossen; man kann indessen hierfür durch Anbringung eines Kugellagers im unteren Stempel nach Maassgabe von Fig. 37 Gelegenheit geben. Aber dabei muss man beachten, dass die Reibung im Kugellager auch hier hindernd wirkt. Die Einrichtung, Fig. 39 hat sich bei zahlreichen, zum Theil schwierigen Untersuchungen bisher gut bewährt.

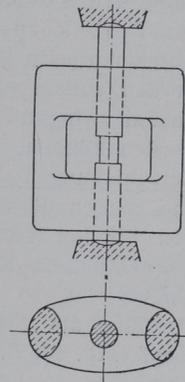


Fig. 39.

γ . Formänderungs-Messung und Messwerkzeuge.

74. An dieser Stelle soll auf die bei der Materialprüfung vorkommenden Messungen und die hierzu benutzten Messwerkzeuge nur ganz kurz und nur so weit eingegangen werden, als dies für die Entwicklung der folgenden Absätze nothwendig ist.

Ueber die Ausführung der Messungen werden im Laufe der folgenden Absätze gelegentlich weitere Bemerkungen einfließen müssen; über die verschiedenen Bauarten der Instrumente im Einzelnen und über die Fehlerquellen soll später im Zusammenhange noch ausführlicher gesprochen werden.

Man kann unterscheiden zwischen den gewöhnlichen groben Messungen zur Feststellung der Abmessungen und der Formänderungen an Probestäben und den sogenannten Feinmessungen, bei denen es sich zu meist um die Feststellung von Längenänderungen mit Ablesungen bis auf weniger als $0,001\text{ cm}$ [oder $10\ \mu$; $\mu = 0,001\text{ mm} = \text{mm } 10^{-3}$] handelt. Auch die Selbstaufzeichnung der Schaulinien der Maschinen könnte man hier in Betracht ziehen; indessen wird vorgezogen, sie am Schluss des Buches ausführlicher zu behandeln.

75. Die groben Ausmessungen zur Festlegung der Stababmessungen werden mit den als bekannt vorauszusetzenden Messwerkzeugen, Anlegemaassstäben, Tastern, Schublehren, Schraubenlehren u. s. w. ausgeführt. Die Ablesungen an den Theilungen erfolgen in der Regel bis auf 0,01 oder 0,001 cm, und Zehntel dieser Theile pflegt man zuweilen noch zu schätzen. Die Messwerkzeuge dürfen selbstverständlich keine groben Fehler haben, was vor der Benutzung festgestellt werden muss, und die Messung selbst muss mit Vermeidung der beim Messen leicht vorkommenden Fehler ausgeführt werden.

Für die Ausmessung der Formänderungen muss man meistens schon besondere Vorkehrungen treffen, sobald man sie während des Versuches feststellen will.

Hierbei soll man im allgemeinen als Grundsatz festhalten, dass die Formänderungen, wenn irgend möglich, unmittelbar am Probekörper selbst und nicht mittelbar als Verschiebungen der Maschinentheile [Mäuler, Querhäupter u. s. w.] gegen einander, gemessen werden sollen. Letzteres ist nur dann zulässig, wenn praktische Rücksichten zwingend sind und wenn man sich über die Fehler, die begangen werden können, völlige Klarheit verschafft hat. Diese Fehler können durch Verschiebungen der Maschinentheile gegen einander, durch elastische Formänderungen dieser Theile und andere Ursachen entstehen; sie müssen durch den blinden Versuch festgestellt oder berechnet werden, wenn sie von beträchtlichem Einfluss sein könnten. War der Stab mit Keilbeilagen eingespannt, so können die Rutschungen beim Anziehen der Keile in die Messung als Fehler eingehen. Wenn der Stab mit Uebergängen zum Kopf (Fig. 36, S. 44) versehen ist, oder sonst von der prismatischen Form abweicht, so ist die wahre Länge l , auf welche die gemessene Formänderung sich bezieht, meist nicht klar zu ermitteln und ändert sich dann auch während des Versuches. Die gefundenen Zahlenwerthe können hierdurch wesentlich beeinflusst sein.

76. Die groben Messungen unmittelbar am Stab geschehen meistens durch Ermittlung der Veränderungen des Abstandes zweier Marken am Probekörper.

In Charlottenburg werden für Zugversuche An-

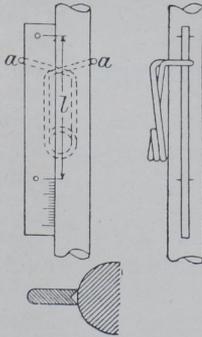


Fig. 40.

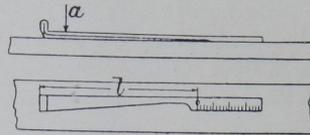


Fig. 41.

legemaassstäbe benutzt, die in Millimeter oder in Procente der ursprünglichen Länge l [Messlänge] getheilt und an der Anlegeseite mit einer Nuth versehen sind. Solche Holzmaassstäbe werden nach Fig. 40 mit einer Drahtklemme a am Stab befestigt, so dass die Nullmarke mit einer Strichmarke am Stabe zusammenfällt, während die andere Stabmarke als Zeiger die Verlängerung in Millimeter oder in Procent der Länge l anzeigt. Man hat darauf zu achten, dass der Nullstrich auf der Endmarke verbleibt, was durch ein

kleines Stückchen an dieser Stelle untergelegten Waxes leicht erreicht werden kann. Ein ähnlicher, sehr praktischer Maassstab, aus dünnen Blechstreifen verfertigt, ist in Fig. 41 angegeben; er legt sich mit seiner messerartigen Endschneide in die Strichmarke ein und wird bei in wagerechter Lage zu prüfenden Flachstäben einfach aufgelegt und nöthigenfalls bei a etwas beschwert. An senkrechten Stäben wird er mit Drahtklemmen befestigt. So lange die Theilungsgrösse zwischen 0,07 bis 0,15 cm bleibt, kann man Zehntel, also gegebenen Falles Zehntel Procenle noch recht gut schätzen, was ja für sehr viele Zwecke völlig ausreichend ist.

77. Zu Druckversuchen werden meistens so kurze Probestücke benutzt, und die Druckplatten der Maschinen sind oft mit Rücksicht darauf, dass sie für alle möglichen Fälle geeignet sein müssen, so gross, dass eine unmittelbare Messung am Probekörper ausgeschlossen ist. Sehr viele der hierfür gebauten Messinstrumente beruhen daher auf Messung der gegenseitigen Bewegung der Druckplatten, wobei diese Platten natürlich ihre parallele Lage nicht ändern dürfen, oder Vorsorge getroffen sein muss, dass etwaige Aenderungen gemessen oder unschädlich gemacht werden.

Einen einfachen Messapparat konstruirte Bauschinger (*L 116*). Dieser für wagerechte Anordnung besonders praktische Apparat ist nach dem in Fig. 42 gegebenen Grundsatz gebaut, den man natürlich in mannigfacher Form abändern kann. Auf die eine Druckplatte wird eine Schneide a gesetzt oder mit etwas Wachs befestigt, auf die andere ein Körper, der eine zwischen Spitzen laufende Rolle trägt. Auf Schneide und Rolle wird ein Holzstab b gelegt, der nöthigenfalls noch etwas beschwert wird. Da die Reibung über der Schneide a grösser ist als die Rollen- und Spitzenreibung in r , so wird beim Zusammengehen der Platten der mit der Rolle fest verbundene Zeiger auf dem Bogenmaassstab diese Bewegung in starker Vergrösserung anzeigen. Man kann das Verhältniss zwischen Rollen- und Messbogenhalbmesser sowie die Theilung des Bogens leicht so wählen, dass der Apparat 0,01 cm ohne weiteres anzeigt und 0,001 cm noch schätzen lässt. Die Uebertragungen erfolgen erfahrungsmässig mit recht grosser Sicherheit, und daher ist der hier benutzte Grundsatz vielfach angewendet worden.

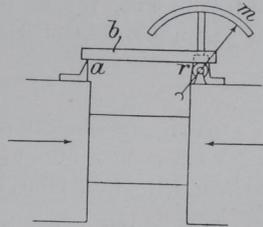


Fig. 42.

In den Uebungen, zu denen die jungen Leute leider meistens recht unvorbereitet kommen, pflege ich, nachdem sie die Arten der Versuchsausführungen und Messungen durch eine Reihe von Schauversuchen kennen lernten, einen oder zwei Tage auf die Ausführung der Fehlerbestimmungen an Maassstäben und Messwerkzeugen zu verwenden. Hierbei werden die Fehlerquellen kurz erörtert, zugleich wird die Gelegenheit zu den ersten eigenen Arbeiten im Laboratorium gegeben.

78. Die Feinmessungen dienen vorwiegend zur Feststellung der elastischen Eigenschaften der zu prüfenden Körper und dann auch zur Bestimmung der S -Grenze. Für sie gilt nicht nur der bereits ausgesprochene Grundsatz, dass die Messungen unmittelbar am Probekörper selbst vorgenommen werden müssen, sondern ganz besonders auch der fernere, dass sie stets mindestens an zwei gegenüberliegenden

Fasern des Körpers vorzunehmen sind. Dies ist nothwendig, um die immer vorhandene geringfügige schiefe Einspannung, das Krümmwerden der Stäbe oder Ungleichheiten im Material zu erkennen oder unschädlich zu machen. Diese Ursachen veranlassen nämlich, dass die Ablesungen an den beiden Apparaten verschieden ausfallen. Zugleich aber werden auch durch die Mittelbildung die entstehenden Fehler in der Bestimmung der Längenänderung ausgeglichen, wenn sie nicht zu erhebliche Beträge erreichen.

Die Zahl der für die Ausführung von Feinmessungen konstruirten Apparate ist sehr gross; hier kann daher nur auf das Wesen der Hauptarten eingegangen werden, und zwar seien für die Betrachtung Mikrometerschrauben und Spiegelapparate herausgegriffen.

79. Die elastische Dehnung der Materialien ist fast immer klein, und da man auch die Probestäbe möglichst klein zu machen pflegt, um an Material, Bearbeitungs- und Betriebskosten für die Maschinen zu sparen, so müssen die Instrumente für die Feinmessungen sehr kleine Längenänderungen mit grösster Zuverlässigkeit zu messen gestatten.

Die kleinste Dehnungszahl, die bei den Materialprüfungen vorzukommen pflegt, ist wohl diejenige für harten Stahl; sie wird kaum unter:

$$\alpha = 0,0000003 = 3 \cdot 10^{-7}$$

fallen.

Führt man den Zerreißversuch mit Belastungsstufen von 1 kg/qmm = 100 at aus, wie es praktischen Verhältnissen entspricht, so ergibt sich für jeden Centimeter Messlänge eine Dehnung:

$$\varepsilon = \alpha \sigma = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 10^2 = 0,00003 \text{ cm.}$$

80. Mit einer feinen Mikrometerschraube, die 5 Schraubengänge auf 1 mm, also 50 auf 1 cm enthält und deren Trommel in 100 Theile getheilt ist, kann man bis auf:

$$\frac{1}{50 \cdot 100} = 2 \cdot 10^{-4} = m \text{ [Messwerth einer Theilung]}$$

messen und bis auf 0,1 m, also bis auf 0,00002 cm schätzen; die Schätzungen würden aber schon mit merklichen Fehlern behaftet sein.

Wollte man also mit einer solchen Mikrometerschraube die Verlängerung für $\Delta \sigma = 100$ at bei hartem Stahl mit einiger Zuverlässigkeit messen, so müsste die Verlängerung Δl für 100 at ein hinreichend grosses Vielfaches von m betragen, damit nicht die Messfehler ein zu grosses Gewicht bekommen. Nimmt man an, dass 5 m bereits genügen, so würde für $\Delta \sigma = 100$ at werden müssen:

$$\Delta l = 5 m = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 10^{-3} \text{ cm.}$$

Um diese Verlängerung zu erhalten, müsste die Entfernung der Marken, zwischen denen die Feinmessung ausgeführt werden soll, die Messlänge für die Feinmessung, werden:

$$l_e = \frac{5 m}{\varepsilon} = \frac{10^{-3}}{3 \cdot 10^{-5}} \text{ oder } \infty 33 \text{ cm.}$$

Mikrometerschrauben mit so feinem Gewinde sind aber unpraktisch für die Handhabung, ihre Prüfung und Fehlerbestimmung ist sehr zeitraubend und die Erhaltung des Apparates in tadellosem Zustande ist bei

mit den anderen Enden gegen die Rollen r gepresst werden. Erfährt nun die Messlänge l_e eine Verlängerung, so werden die Röllchen infolge der Reibung an den Federn in Drehung versetzt. Die Federn wirken also an einem Hebel von gleichbleibender Länge, nämlich dem Rollenhalbmesser r , und die Anzeige erfolgt gewissermassen mit einem langen gewichtslosen Hebel, dem Lichtstrahl, der wegen der Spiegelwirkung den doppelten Winkel durchläuft wie die Rolle. Deswegen ist die Länge dieses idealen Hebels gleich dem doppelten Abstände A des Maassstabes M von der Drehachse des Spiegels.

Das Uebersetzungsverhältniss und damit die Vergrösserung, in welcher der Apparat die Verlängerung λ des Stabes anzeigt, ist also das Verhältniss $r/2A$. Dies würde ganz streng der Fall sein, wenn der Maassstab M Theil eines Kreises um den Rollenmittelpunkt wäre. Da aber bei kleinen Drehungen der Rolle der Fehler, den man bei Ablesung am geraden Maassstabe begeht, klein ist und für unsere Zwecke, bei denen es sich meist auch nur um Vergleiche handelt, praktisch als verschwindend klein betrachtet werden darf, so zieht man es aus Bequemlichkeitsrücksichten vor, den geraden Maassstab anzuwenden. Diesen kann man dann in jeder beliebigen Entfernung vom Rollenmittelpunkt aufstellen. Hierdurch hat man die anzuwendende Vergrösserung von λ ganz in der Hand.

83. Als das Uebersetzungsverhältniss des idealen Hebelwerkes ist also einzuführen:

$$n = \frac{r}{2A},$$

und da immer zwei Apparate gleichzeitig angewendet werden, so giebt die halbe Summe beider Ablesungen $a + a_1$:

$$\frac{a + a_1}{2} n = \lambda = (a + a_1) \frac{r}{4A}.$$

Der Maassstab ist in Millimeter [oder in Procente der Messlänge l_e] getheilt. Soll die Ablesung $(a + a_1) = 1$ mm, d. i. 0,1 cm, einer Verlängerung des Probestabes $\lambda = 0,0001$ cm entsprechen, d. h. in dem unter 80 (S. 48) erläuterten Sinne der Maasswerth einer Maassstabtheilung

$$m = 10^{-4} \text{ cm}$$

sein, so ist bei einem Rollenhalbmesser $r = 0,3$ cm:

$$m = (a + a_1) \frac{r}{4A} \text{ oder } 10^{-4} = \frac{10^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{-1}}{4A}$$

oder der Abstand des Maassstabes vom Rollenmittelpunkt:

$$A = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-4}} = 75 \text{ cm.}$$

84. Ist die Vergrösserung des Fernrohres so gewählt, dass das Bild der Maassstabtheilung gegen die scheinbare Fadenkreuzdicke hinreichend gross erscheint, so kann man mit grosser Sicherheit noch Zehnteltheilungen schätzen. In dem vorgenannten Falle würde sich also, da $m = 10^{-4}$ cm, die Schätzung von λ auf $m/10 = 10^{-5}$ cm erstrecken. Man kann nach den Erfahrungen vieler Anstalten darauf rechnen, dass oft wiederholte Ablesungen niemals um mehr als etwa 0,3 Theilungen [d. h. also im vorliegenden Falle $3 \cdot 10^{-5}$ cm Verlängerung] von einander abweichen. Man erkennt also aus diesen Erfahrungszahlen leicht, dass nicht nur die

Schätzungen noch grosse Sicherheit haben müssen, sondern dass auch die Uebertragung der Bewegung durch die Reibung zwischen Feder f und Rolle r (Fig. 44) recht sicher erfolgt.

85. Legt man nun, wie bei der Betrachtung des Mikrometers, für die Spannungsstufe $\Delta\sigma = 100$ at wiederum den fünffachen Betrag von m zu Grunde, so muss bei dem gleichen Stahlstabe die angewendete Messlänge:

$$l_e = \frac{5m}{\varepsilon} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-5}} \text{ oder } \infty 17 \text{ cm}$$

betragen. Wegen der grossen Sicherheit der Ablesungen kann man aber die Messlänge in der That noch erheblich kleiner machen.

86. Streng genommen ist, wie schon angedeutet, die Gleichung:

$$n = \frac{r}{2A}$$

für das Uebersetzungsverhältniss des Apparates nicht richtig. Es ist nöthig, sich ein Urtheil über die Grösse des etwa begangenen Fehlers zu verschaffen.

Ist α der Drehwinkel der Rolle (Fig. 45) und A die Maassstabentfernung, so würde die wahre Ablesung die Länge des Bogenstückes a' sein, während in Wirklichkeit eine andere Länge a an der Tangente abgelesen wurde. Es ist:

$$a = A \operatorname{tg} 2\alpha, \text{ oder } = \operatorname{tg} \cdot 2\alpha \text{ für } A=1.$$

Die Bogenlänge für den Halbmesser 1 und einen Bogengrad ist:

$$\Delta a' = \frac{2 \cdot 1 \pi}{360} = 0,017453.$$

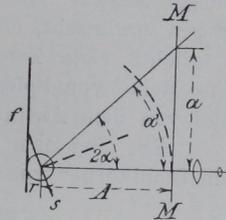


Fig. 45.

Berechnet man für verschiedene Rollendrehungen α die Werthe $a = \operatorname{tg} \cdot 2\alpha$ und a' und drückt den Unterschied zwischen beiden Werthen in Procenten von a' aus, so erhält man die Fehler, um welche a gegen die Ablesung a' zu gross gefunden wird, wie folgt:

Tabelle 5. Fehlertabelle für Spiegelablesung am geraden Maassstab.

$a =$	1	2	3	4	5	10	15°
$a =$	0,03492	0,06993	0,10510	0,14054	0,17633	0,36397	0,57735
$a' =$	0,03491	0,06981	0,10472	0,13962	0,17453	0,34906	0,52359
$\frac{a-a'}{a'} 100$	0,03	0,17	0,36	0,66	1,03	4,27	10,27 %

Will man auf Grund der bisherigen Ueberlegungen sich ein Bild von der Grösse der etwa bei einem praktisch durchgeführten Zerreiassversuch begangenen Fehler machen, so kommt man auf folgende Verhältnisse.

Liegt bei dem oben betrachteten Stahlstabe die P -Grenze bei 3000 at und war $l_e = 15$ cm, so wird für $\alpha = 3 \cdot 10^{-7}$

$$\lambda = \alpha \sigma l_e = 3 \cdot 10^{-7} \cdot 3000 \cdot 15 = 135 \cdot 10^{-4} \text{ cm.}$$

Wenn weiter der Rollenhalmesser $r = 0,3$ cm und $U = 2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 = 1,88$ der Rollenumfang ist, so wird der Winkel α , um den sich der Spiegel für $\lambda = 0,0135$ cm drehen muss:

$$\sphericalangle \alpha = \frac{\lambda}{U} \cdot 360 = \frac{0,0135}{1,88} \cdot 360 = 2,58^\circ$$

Der bei der Ablesung am geraden Maassstab begangene Fehler wird also nach Tab. 5 kleiner als $0,4\%$.

Kommt es wirklich einmal auf grössere Genauigkeit an, so ist es ein Leichtes, die Korrektur mit Hilfe der Rechnung oder durch Entnahme aus den für die Gauss'sche Ablesung vielfach herausgegebenen Fehlertabellen vorzunehmen. Wie sich aus Fig. 45 ohne weiteres einsehen lässt, kann man den Fehler auf weniger als die Hälfte bringen, wenn man den Maassstab so aufstellt, dass Anfangs- und Endablesung gleich weit vom Fusspunkt des Lothes aus Spiegelmittelpunkt auf Maassstabebene absteht. Ausserdem liesse sich, wenn diese Arbeit erspart werden soll, der Fehler durch geringe Veränderung von A in der Weise verkleinern, dass man ihn für einen Theil der in Frage kommenden Ablesungen negativ macht.

87. Der Bauschingersche Apparat wird durch seine Befestigungs-einrichtungen etwas schwer; er ist, weil in erster Linie mit Rücksicht auf die Verhältnisse der Werderschen Prüfungsmaschine konstruirt, namentlich in senkrechten Maschinen schwieriger zu handhaben. Für die Charlottenburger Anstalt, die viel mit Maschinen letzter Art arbeitet, war es deswegen erwünscht, einen Apparat zu besitzen, der leicht, handlich und für möglichst viele Zwecke benutzbar ist. Dies war für mich Veranlassung, eine Reihe von Spiegelapparaten nach folgendem Grundsatz zu entwerfen und von dem Anstaltsmechaniker ausführen zu lassen.

88. Bei dem Spiegelapparat von Martens ist an Stelle der Rolle ein Stahlkörper von rhombischem Querschnitt angewendet, der die Spiegel

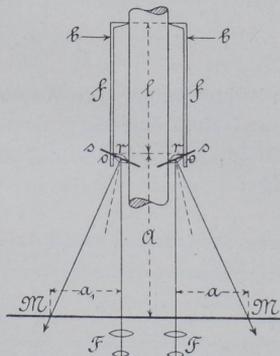


Fig. 46.1)

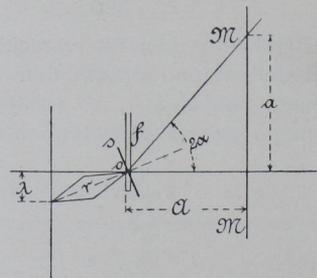


Fig. 47.

trägt [Fig. 46]. Dieser Körper wird mit der einen Schneide o in eine Nuthe der Feder f eingelegt und stützt sich mit der anderen Schneide gegen den Probestab, gegen den er mittelst Federklammern b durch die Messfedern f angepresst wird. Das andere Ende der Feder stützt sich mit seiner Schneide gegen den Probestab. Der Rollenbügel des Bauschingerschen Apparates fällt hier also ganz fort. Bei der Verlängerung des Stabes machen die Spiegel eine Drehung, die, wie beim Bauschingerschen Apparate, mittelst Fernrohr F am Maassstab M abgelesen wird. Die

1) Die Messlänge l_e ist in Fig. 46 mit l bezeichnet.

Entfernung der beiden gegenüberliegenden Schneidkanten des Spiegelkörpers giebt hier das Maass für r . Die Spiegelfläche liegt in der Drehachse o [Fig. 47].

Wenn der Spiegelkörper um o den Winkel α durchläuft, so durchleitet der Lichtstrahl wieder den Winkel 2α . Es wird also:

$$\lambda = r \sin \alpha \text{ und}$$

$$a = A \operatorname{tg} 2\alpha \text{ oder}$$

das Uebersetzungsverhältniss:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r \sin \alpha}{A \operatorname{tg} 2\alpha}$$

Da es sich nur um kleine Winkel α handelt, so kann man für n angenähert setzen:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r}{A} \frac{1}{2}$$

Da auch hier mit zwei Apparaten gleichzeitig gearbeitet wird, so folgt, dass, durch die Summe beider Ablesungen a und a_1 ausgedrückt:

$$\lambda = \frac{a + a_1}{2} n = (a + a_1) \frac{r}{4A}$$

wird, wie beim Bauschingerschen Apparat.

89. Berechnet man, um einen Ueberblick über die bei Benutzung der Gleichung $n = r/2A$ begangenen Fehler zu bekommen, für die gleichen Winkel α , wie beim Bauschingerschen Apparat, eine Fehlertabelle, so erhält man folgende Werthe:

Tabelle 6. Fehlertabelle für den Spiegelapparat von Martens.

Uebersetzungsverhältniss	$\alpha =$	1	2	3	4	5	10	15
angenähertes $n = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{A} \right)$		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
wahres $n' = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} 2\alpha} \left(\frac{r}{A} \right)$		0,49977	0,49909	0,49798	0,49637	0,49431	0,47710	0,44829
Also Ablesungsfehler $= \frac{n' - n}{n'} \cdot 100$		0,05	0,18	0,41	0,73	1,15	4,80	11,54%

Um die Beträge der letzten Reihe sind die wahren Werthe für λ kleiner als die nach der angenäherten Formel berechneten.

Man sieht beim Vergleich dieser Zahlenreihe mit derjenigen aus Tabelle 5, S. 51, dass dieser Apparat, bei Anwendung der angenäherten Gleichung und unter Benutzung gleicher Werthe von r , theoretisch ungenauer arbeitet als der Bauschingersche. Aber durch seine sonstigen Eigenschaften kann man praktische Vortheile erzielen und durch die geschickte Auswahl von r und geringe Aenderung von A [wie im Absatz 86 gesagt] kann man ihn in gleichem Maasse fehlerfrei machen, als es der

Bauschinger-Apparat ist, trotzdem theoretisch noch weitere Fehlerquellen in Betracht kommen.

a. Es ist nämlich nicht leicht, beim Anbringen des Apparates an den Probestab die Schneiden stets in die gleiche Anfangslage zu bringen, und man muss

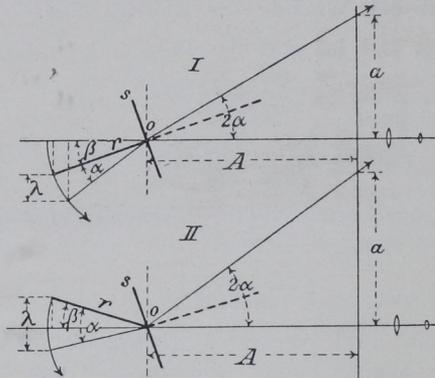


Fig. 48.

daher untersuchen, welchen Einfluss es hat, wenn die Schneide schon von vornherein einen Winkel β gegen die Normale zum Probestab einschliesst. Dann wird nach Fig. 48:

$$\lambda = r (\sin (\alpha + \beta) - \sin \beta), \text{ wenn Fall I, oder}$$

$$\lambda = r (\sin (\alpha - \beta) + \sin \beta), \text{ wenn Fall II vorliegt.}$$

Es wird also, da $a = A \operatorname{tg} 2 \alpha$ bleibt:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r (\sin (\alpha \pm \beta) \mp \sin \beta)}{A \operatorname{tg} 2 \alpha}.$$

Rechnet man unter gleichen Verhältnissen wie früher und mit den Winkeln $\beta = 0, 1, 2$ und 3° nach Fall I und II die procentischen Abweichungen der wahren Übersetzungsverhältnisse n' gegen die bei Benutzung der angenäherten Gleichung angenommenen Werthe $n = \left(\frac{r}{A}\right) \cdot \frac{1}{2}$ aus, so erhält man die Tabelle:

Tabelle 7. Fehler des Martensschen Spiegelapparates in Folge falscher Anfangsstellung.

($\alpha =$ Ausschlagwinkel des Spiegels, $\beta =$ Winkel um den der Körper falsch angesetzt wurde.)

		Werthe von $\frac{n'-n}{n'} \cdot 100$ für						
		1	2	3	4	5	10	15°
Fall I (Fig. 48): $n' = \frac{\sin (\alpha + \beta) - \sin \beta}{\operatorname{tg} 2 \alpha} \left(\frac{r}{A}\right)$	$\beta = 3$	0,23	0,41	0,70	1,07	1,54	5,43	12,47
	2	0,12	0,30	0,56	0,92	1,37	5,19	12,11
	1	0,06	0,21	0,46	0,80	1,25	4,98	11,81
	$\beta = 0$	0,05	0,18	0,41	0,73	1,15	4,80	11,54
Fall II (Fig. 48): $n' = \frac{\sin (\alpha - \beta) + \sin \beta}{\operatorname{tg} 2 \alpha} \left(\frac{r}{A}\right)$	$\beta = 1$	0,06	0,18	0,39	0,69	1,09	4,66	11,30
	2	0,06	0,18	0,39	0,68	1,06	4,55	11,09
	3	0,12	0,21	0,41	0,69	1,06	4,46	10,89

Aus Tab. 7 ergibt sich, dass die Aufstellung II die günstigere ist. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, die Entfernung zwischen Nuthe und Schneide an der Feder f (Fig. 46) ein klein wenig grösser zu machen als die anzuwendende Messlänge l_e am Probestabe.

b. Nimmt man etwa die bei den Apparaten der Versuchsanstalt vorhandenen Abmessungen als Ausgangspunkt an und rechnet wie beim Bauschingerschen Apparat den Winkel α aus, der unter den gleichen Voraussetzungen wie dort (86 S. 51) sich ergibt, so findet man, wenn

$$\sigma_P = 3000 \text{ at; } l_e = 15 \text{ cm; } \alpha = 3 \cdot 10^{-7};$$

und wenn wie dort: $\lambda = 135 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ bei einer Schneidenbreite $r = 0,4 \text{ cm}$:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{r} = \frac{135 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-1}} \text{ oder } \sphericalangle \alpha = 1,56^\circ$$

Der bei der Ablesung am geraden Maassstab und bei Benutzung des angenäherten Werthes $n = 0,5$ begangene Fehler wird nach Tab. 7 selbst bei einer sehr ungünstigen Anfangsstellung ($\beta = 3^\circ$) $0,4\%$ nicht übersteigen; man arbeitet also unter eben so günstigen Verhältnissen wie beim Bauschingerschen Apparat, was, wie man sieht, durch die Möglichkeit der Anwendung eines grösseren r bedingt ist.

Ich will an dieser Stelle nicht auf die mannigfache Verwendungsfähigkeit des von mir benutzten Grundgedankens eingehen, sondern begnüge mich damit, auf die späteren Sätze in den letzten Abschnitten dieses Buches zu verweisen und hier nur besonders darauf aufmerksam zu machen, dass ich dort auch Mittel und Wege angeben werde, die vorhin berechneten Fehler noch wesentlich zu vermindern.

90. Neben den einseitig auftretenden Fehlern der Theorie kommen bei beiden Formen von Spiegelapparaten noch die Fehler der Instrumente und der Beobachtungsmethode, sowie die durch äussere Einflüsse bedingten Fehler in Betracht. Es kann indessen nicht Aufgabe dieses Handbuches sein, die ganze Reihe dieser Fehlerquellen erschöpfend zu besprechen, aber es ist doch vielleicht wünschenswerth, auf die wichtigsten einzugehen, weil manchem Beobachter seine Arbeit erleichtert und ihm gelegentlicher Verdruss erspart werden wird, wenn er kurz auf Dinge verwiesen wird, die man zu Anfang leicht zu vergessen oder zu überschätzen pflegt. Es ist ja die vornehmste Kunst des Beobachters, die Fehlerquellen thunlichst zu vermeiden und sie in ihrer Wirkung so klein wie möglich zu machen.

91. Der Genauigkeitsgrad, mit dem der Spiegelapparat wirkt, ist in erster Linie davon abhängig, dass die beiden Hauptfaktoren, nämlich die Grössen r und A , mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden, und dass die Maassstabtheilung richtig ist.

Die Länge A kann man sehr leicht bis auf $0,05 \text{ cm}$ genau messen. Die Genauigkeit beträgt dann $\pm 0,05/A$, oder wenn man den thatsächlichen Verhältnissen entsprechend A etwa zu 100 cm annimmt, so wird der Genauigkeitsgrad der Messung von $a = 0,05/100 = 1/2000$. Will man für die Messung von r gleiche Genauigkeit anstreben, so wird man bis auf $r/2000$ genau messen müssen, d. h. wenn $r = 0,4 \text{ cm}$, so muss r bis auf $0,4 \cdot 1/2000 = 1/5000 \text{ cm}$ ausgemessen werden.

92. Hierzu sind natürlich wieder besondere Feinmessinstrumente erforderlich, deren Fehler genau bestimmt und die unter beständiger Kontrolle gehalten werden müssen. Instrumente dieser Art sind später am Schluss des Buches beschrieben, sie sind kostbar, und nur wenige öffentliche Anstalten sind mit ihnen ausgerüstet. Wer sie nicht besitzt, thut gut, seine Spiegelapparate von Zeit zu Zeit in einer solchen Anstalt vergleichen zu lassen, denn es ändern sich nicht sowohl die Durchmesser der Rollen am Bauschingerschen, als auch die Schneiden beim Martensschen Spiegelapparat während des Gebrauches. Beim ersteren ist die Veränderung der

Rollen meistens nicht äusserlich erkennbar, während man Aenderungen an den Schneiden in der Regel mit dem Auge wahrnehmen wird; die anfänglich scharfen Kanten werden blank. Dieser Zustand kann ziemlich weit vorschreiten, ehe man messbare Aenderungen wahrnimmt.

93. Die Rollen des Bauschingerschen Apparates hat man noch daraufhin zu untersuchen, ob sie überall genau gleichen Durchmesser haben und ob der Rollenmantel genau centrisch zu den Spitzen der Achse ist. Beim Martensschen Apparat ist festzustellen, ob die beiden Schneidkanten in einer Ebene liegen und überall gleichen Abstand von einander haben.

94. Die spiegelnde Fläche soll bei beiden Apparaten möglichst in der Drehachse liegen, denn wenn sie excentrisch sitzt, so wird, wie aus Fig. 49 erkannt werden kann, die Ablesung entweder zu klein (a_1) oder zu gross (a_2). In Fig. 49 ist m das Mass für die Excentricität der Spiegelfläche s übertrieben gross gezeichnet und angenommen, dass die Fläche einmal richtig im Drehpunkt (Index 0), im andern Falle (Index 1) gegen den Maassstab hin und im dritten Falle (Index 2) vom Maassstab abgerückt

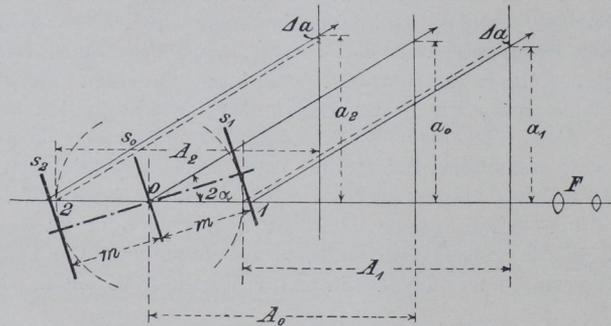


Fig. 49.

liegt. Die Abstände A werden in der Regel nach dem Ansetzen der Apparate an den Probestab durch Anlegen eines Kontrollmaassstabes eingestellt. Der Kontrollstab legt sich mit dem einen Ende fest gegen den Ablesemaassstab, während mit dem andern, aus einem Stück Aktendeckel gefertigten Ende unter Verschiebung des Ablesemaassstabes so lange getastet wird, bis die Spiegelfläche vom Papier gerade berührt wird. Die Entfernungen A_0 , A_1 und A_2 können also bei unserer Betrachtung in allen Fällen als gleich angenommen werden. Sei nun in allen drei Fällen die Spiegeldrehung α , so wird der vom Fernrohr kommende Lichtstrahl den vom ausgezogenen Pfeil bezeichneten Weg machen; es ergeben sich die Ablesungen a_0 , a_1 , a_2 , von denen a_0 der richtigen Aufstellung entsprechen würde. Würde die Drehung der Spiegel s_1 und s_2 um den Winkel α in den ursprünglichen Auftreffpunkten 1 und 2 stattgefunden haben, so würden die Ablesungen nach den gestrichelten Linien erfolgt und in allen drei Fällen gleich a_0 geworden sein. Wegen der Excentricität findet aber eine andere Ablesung a_1 und a_2 statt, die die Fehler Δa bedingen; a_1 ist zu klein, a_2 zu gross gefunden. Man erkennt leicht, dass man in der Art der Aufstellung der Spiegel ein Mittel haben würde, um die in den Sätzen 86 und 89 entwickelten Fehler

der Annäherungsrechnung und der 'Ablesung' am geraden Maassstab zum Theil zu beseitigen. Das würde aber geringen praktischen Werth haben, wie später gezeigt werden wird.

a. Die Spiegelapparate von Bauschinger und Martens sind so eingerichtet, dass die Spiegel um ihre parallel zum Maassstab stehende Axe [senkrecht zur Drehaxe der Rollen beziehentlich Schneiden] um ein Geringes geneigt werden können, so dass man die Absehnlinie auf die Längsaxe der Theilung einstellen kann. Ist es gelegentlich nothwendig, die Neigung der Spiegelfläche gegen die Drehaxe beträchtlich zu machen, so darf man bei genau auszuführenden Messungen die hierdurch entstehenden Fehler nicht ausser Acht lassen. Diese Neigung wird nothwendig, wenn die Aufstellung von Fernrohr und Ablesemaassstab sich weit von der durch die Spiegelmitte gehenden zur Drehaxe senkrechten Ebene entfernt. Der Ablesestrahl bleibt dann nicht hinreichend genau in dieser Ebene, sondern läuft auf einer krummen Fläche, deren Durchdringung mit der Bildfläche des Ablesemaassstabes eine parabolische Linie wird, anstatt einer Geraden. Es ist zu beachten, dass der entstehende Fehler noch vergrössert wird, wenn man A bei einer stark von der Normalebene abweichenden Aufstellung der Stäbe vom Spiegel bis zum Maassstab messen wollte. A muss vielmehr stets als senkrechter Abstand von der Drehaxe gemessen werden. Dann wird auch bei ziemlich starker Abweichung aus der Normalebene der Fehler keinen allzugrossen Betrag erreichen.

b. Vielfach haben Konstrukteure versucht, Spiegelapparate zu konstruiren, bei denen die Messung zwar an zwei gegenüberliegenden Fasern des Probestabes geschieht, bei denen aber die Uebertragung eine solche ist, dass die Ablesung an einem einzelnen Spiegel erfolgt, so dass also auch nur ein einziges Ablesefernrohr benutzt wird. Die Sache erscheint auf den ersten Blick bestechend, weil ja auch an Beobachtungsarbeit gespart wird; aber sie hat zwei Seiten. Die Anwendung zweier Spiegel mit entgegengesetztem Drehungssinn hat den praktisch sehr grossen Vortheil, dass Drehbewegungen des Probestabes und der daran befestigten Spiegelapparate in der genannten Normalebene des Spiegels von keinem Einfluss auf das Messungsergebniss werden können, so lange mit ihnen keine Veränderung von A verbunden ist. Drehbewegungen der Probe mit den Apparaten in irgend einer anderen Ebene werden ja ohne weiteres als Seitenverschiebung der Maassstabbilder gegen das Fadenkreuz erkannt. Die Drehbewegungen in der Normalebene geben sich dadurch zu erkennen, dass sich die Ablesungen im einen Spiegel um eben so viel vergrössern, als sie sich im anderen verkleinern; sie können also das Ergebniss nicht trüben, wenn zwei Spiegel benutzt werden.

Wendet man nun nur einen Spiegel an, so giebt man diesen Vortheil auf und verliert die Möglichkeit, die begangenen Fehler sofort zu erkennen.

Lagenänderungen der Probestäbe im Raum werden aber bei den meisten Maschinen nicht ganz ausgeschlossen sein. Die Maschinen mit seitlich unbeweglichen Einspannvorrichtungen sind hier im Vortheil; aber bei genauen Messungen soll man auch ihnen nicht ohne weiteres frauen.

95. Da es sich bei den Feinmessungen stets darum handelt, kleine Längenänderungen an Körpern von verhältnissmässig grosser Länge zu messen, so darf man in den Fällen, wo es auf grosse Genauigkeit ankommt, auch die Längenänderungen in Folge etwaigen Wärmewechsels im untersuchten Körper und im Spiegelapparat nicht vernachlässigen. Nimmt man als Beispiel hierfür den bereits mehrfach besprochenen Stahlstab, dessen Längendehnungszahl für eine Wärmeänderung von 1 C.° $\beta = 124 \cdot 10^{-7}$ gesetzt werden kann, so wird die scheinbare Längenänderung der Messlänge $l_e = 15$ cm für jeden C° Aenderung im Wärmeunterschiede zwischen dem Probestab und der Messfeder:

$$\Delta l_e = \beta l_e = 124 \cdot 10^{-7} \cdot 15 = 0,00019 \text{ cm.}$$

Wenn das Uebersetzungsverhältniss des Spiegelapparates, wie früher, $n = 1/1000$ ist, so würde die Summe der Ablesungen am Maassstab für Δl_e

$$19 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 = 0,19 \text{ cm sein.}$$

Hundertel Centimeter können aber mit ziemlicher Sicherheit geschätzt werden; man begreift also, dass Aenderungen im Wärmeszustand zwischen Stab und Feder von nur $1/20$ C⁰ bereits die Messungen zu beeinflussen beginnen.

Aus diesem Grunde darf man bei feinen Untersuchungen den Versuch erst beginnen, wenn unter der Nulllast der Spiegelapparat während 10 Minuten keine Ablesungsunterschiede mehr zeigt, d. h. wenn die durch das Anfassen der Theile beim Ansetzen des Apparates erzeugte Wärmeänderung völlig ausgeglichen ist.

96. Man kann übrigens den Einfluss der Wärme auf die Federn des Spiegelapparates durch die Wahl geeigneten Materials selbstverständlich verändern, wenn man Materialien mit geringer Wärmedehnungszahl, oder Stoffe anwendet, die die Wärme langsam aufnehmen. Ich benutzte z. B. für die später beschriebenen Spiegelapparate zu der 500 t-Maschine der Versuchsanstalt Federn von kastenförmigem Querschnitt aus Holz, und H. T. Bovey hat die Feder seines Unwischen Spiegelapparates (Schluss des Buches) aus Holz hergestellt, das zur Vermeidung des Einflusses der Feuchtigkeit mit Paraffin getränkt wurde. Bovey will den Einfluss der Wärme hierdurch auf $1/15$ gegenüber demjenigen der vorher benutzten Feder herabgedrückt haben. Man darf indessen hierbei nicht vergessen, dass nicht allein die Feder die Fehlerwirkung wegen der Wärmeänderung bedingt, sondern muss dessen eingedenk bleiben, dass auch der zu prüfende Körper dem Wärmewechsel unterworfen ist. Was die Messung fehlerhaft beeinflusst, ist immer nur eine Aenderung des gegenseitigen Wärmeszustandes zwischen Feder und Probe.

Die Darstellung der Fehlerquellen der Spiegelapparate und Mikrometer-schrauben gebe ich in meinen Vorlesungen hinreichend ausführlich, aber keineswegs erschöpfend, um in den jungen Leuten von vornherein das Bewusstsein zu erwecken, dass alle unsere Messverfahren und Apparate mit Fehlern behaftet sind und dass in allen Fällen, wo Zahlen durch Beobachtung in der Praxis gewonnen werden, diese Zahlen stets mit Fehlern behaftet sein müssen. Die Rechnung aus den theoretischen Grundsätzen kann mit aller Schärfe durchgeführt werden; die Ergebnisse dieser Rechnung können richtig sein, wenn die Grundsätze richtig waren. Aber man kann nicht erwarten, dass Zahlen, welche beim Versuch gewonnen wurden, ganz vollkommen mit den aus der Theorie gewonnenen übereinstimmen, selbst wenn die Theorie richtig und der Versuch ganz einwandfrei durchgeführt wurde. Die Kunst des Beobachters besteht in allen Fällen darin, den Versuch so vollkommen zu gestalten, dass alle methodischen Fehler vermieden werden und das Ergebniss womöglich nur mit den unvermeidlichen zufälligen Fehlern behaftet bleibt. Diese kann man, was aber praktisch in den allermeisten Fällen unnöthig ist, nach den Methoden der Ausgleichsrechnung (*L 103. 104* u. a.) behandeln und hierbei sich ein Urtheil über die Sicherheit der Beobachtungen verschaffen.

Der Beobachter muss sich stets ein klares Urtheil über die möglichen und wahrscheinlichen Fehler der von ihm gefundenen Zahlenwerthe bilden. Wer klar erkennt, mit welchen Fehlern die von ihm gewonnenen oder von Anderen gefundenen Zahlen behaftet sind oder behaftet sein müssen, der wird ganz gewiss nicht den leider viel betriebenen Unfug begehen, den zuverlässigen Zahlen nichtsagende, einzig aus der Rechnung hervorgehende Ziffern oder Decimals anzuhängen oder gar mit solchen Zahlen zu rechnen. An solchem Gebahren wird gar zu leicht erkannt, wess Geistes Kind der Urheber ist.

97. Glücklicherweise ist nun für das Materialprüfungswesen an sich die Sachlage bei weitem nicht so schwierig, wie sie nach der voraufgehenden Darstellung der Fehlerquellen erscheinen könnte. Die zu prüfenden Körper sind an sich schon so ungleichmässig, dass es überhaupt keinen Werth haben würde, jeden für sich mit den feinsten physikalischen Methoden zu untersuchen, oder gar alle Korrektions- und Ausgleichsrechnungen durchzuführen. Auch unsere Maschinen haben hinsichtlich des Genauigkeitsgrades der Kraftmessung keine allzu hohe Leistung aufzuweisen, wie sich aus einer eingehenden Prüfung leicht ergibt. Wenn wir die Spannungen σ_P , σ_S und σ_B bis auf 10 at mit Sicherheit bestimmt haben, dürfen wir sehr zufrieden sein, denn schon das wird thatsächlich selten erreicht. In diesem Werke werden diese Ergebnisse, wie das auch sonst fast allgemein gebräuchlich ist, stets auf 10 at abgerundet geschrieben, wenn sie nicht als Mittelwerthe aus einer grossen Reihe von Versuchen hervorgegangen sind.

98. Die Anwendung von Feinmessinstrumenten bei den Materialprüfungen hat übrigens nur sehr selten den Zweck, eigentliche Längenmessungen im absoluten Maass auszuführen; in diesen Ausnahmefällen muss man allerdings alle erwähnten Fehlerquellen sorgfältig in Rechnung stellen. Die Spiegelapparate dienen vielmehr in den weitaus meisten Fällen, wie das Galvanoskop dem Elektriker, eigentlich nur als ein sehr empfindliches Anzeigemittel für die Ueberschreitung der Proportionalitäts- und Streckgrenze. Diese Bestimmung könnte man aber schliesslich, wie ja aus der Begriffserklärung (37 und 38) der P - und S -Grenze ohne weiteres hervorgeht, auch vornehmen, ohne die Verlängerung λ in absolutem Maasse zu messen, man könnte sie auch dann finden, wenn das Uebersetzungsverhältniss des Spiegelapparates gar nicht bekannt ist.

Die Bestimmung der Dehnungszahl a und des Elasticitätsmoduls E erfordert allerdings streng genommen die Feststellung im absoluten Maass, indessen ist bei reinen Materialprüfungen diese Zahl von untergeordneter Bedeutung, und man kann sich in den allermeisten Fällen mit dem Genauigkeitsgrad begnügen, den die Apparate bei gewöhnlicher Sorgfalt ohnehin gewähren.

3. Einfluss der Stabköpfe.

99. Bei der Ausführung eines Festigkeitsversuches ist nun der im Absatz 33 gemachten Voraussetzung eines Stabes von sehr grosser Länge im Verhältniss zum Querschnitt nicht mehr zu entsprechen. Die Stäbe müssen vielmehr nicht nur verhältnissmässig kurz, beim Druckversuch sogar sehr kurz genommen werden, sondern sie müssen beim Zerreiassversuch, zwecks Einspannens in die Maschine, auch noch mit Köpfen (68) versehen werden, an deren Stelle beim Druckversuch die die Kraft P auf den Körper übertragenden ebenen Flächen (73) treten. Diese Formen der Einspannung üben immer einen Einfluss auf die Ergebnisse des Versuches aus, und es ist daher nöthig, sich ein Urtheil über die einschlägigen Verhältnisse zu bilden.

Zugversuch.

100. Wenn der Probestab lang und der Einspannkopf (Fig. 50) nicht vorhanden wäre, so würde der Querschnitt [z. B. der Durchmesser des gezeichneten Rundstabes] unter der Wirkung der Kraft P sich vermindern; d würde in d'' übergehen (35). Wenn aber ein Einspannkopf vorhanden ist, so kann das Material unmittelbar am Kopf nicht freinachgeben (*L 105, 118 u. 119*), es bilden sich widerstehende Kräfte q , die veranlassen, dass in der Auflagerfläche des Kopfes nur eine sehr kleine, praktisch unmerkliche Querschnittsverminderung eintritt. Im nächstfolgenden Stabquerschnitt ef kommt die Wirkung des Stabkopfes schon weniger zur Erscheinung. Die Querschnittsverminderung wird daher stärker hervortreten, die Punkte e und f werden nach $e' f'$ wandern. Hierbei bleiben die Körperinhalte der Abschnitte $abef$ und $ab e' f'$, sofern ein Material vom Dichtigkeitsgrade 1 vorliegt, gleich gross. Die der Querschnittsveränderung widerstrebenden Kräfte q' im Querschnitt $e' f'$ sind kleiner als q . Vergl. Barba (*L 118, S. 686; 119, S. 1—75*).

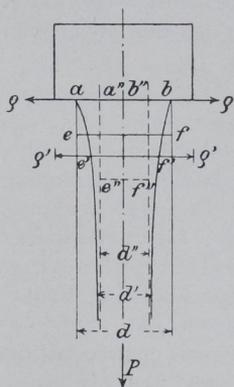


Fig. 50.

Ist der Stab lang genug, so werden die Kräfte q schliesslich bei grosser Entfernung vom Kopf verschwindend klein und der Stabquerschnitt nimmt alsdann diejenige Grösse an, welche ihm zukommen würde, wenn der Stabkopf gar nicht vorhanden wäre. Ohne den Einfluss des Kopfes wären die Punkte a und b nach a'' und b'' , die Punkte e und f nach e'' und f'' gewandert, so dass der Inhalt $a'' b'' e'' f'' = abef$ blieb.

Die in Wirklichkeit unter dem Einfluss der Kraft P eintretende Form eines Rundstabes mit Köpfen ist also keine vollkommen cylindrische; der Stab bildet vielmehr einen Umdrehungskörper, dessen Erzeugende durch den Punkt a geht und den idealen Cylinder $a'' e'' b'' f''$ vom Durchmesser d'' in der Mitte des Stabes berührt, falls die benutzte Stablänge dies noch zulässt, d. h. hinreichend gross ist.

101. Die Kraft P , welche für den vorausgesetzten Zustand des Stabes auf alle seine Querschnitte gleichzeitig wirkt, muss in den einzelnen Querschnitten, wegen deren verschiedener Grösse, verschiedene Spannungszustände hervorrufen. Obwohl dies nicht ganz zutreffend ist, sei zunächst angenommen, dass die Kraft P über jeden Querschnitt gleichmässig verteilt sei. Ueber die vergleichsweise Grösse der Beanspruchungen in den einzelnen Stababschnitten kann man sich dann ein Bild machen, ohne sie gerade rechnerisch zu verfolgen.

Entwirft man nach den vorausgehenden Annahmen zunächst über der Linie A (Fig. 51) als Nulllinie, ein Schaubild von der zu jedem Stabquerschnitt gehörenden Flächengrösse f und Dehnung ε , so erhält man für die Darstellung von f die Linie $f_1 f_2 f_3$ und von ε die Linie $\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$. Wegen der Voraussetzung $V = \varepsilon f = \text{konst.}$ muss $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ verschwindend klein sein, weil sich am Kopf der Querschnitt nur ausserordentlich wenig ändert; ferner muss ε_2 für das mittlere Stabelement ein Maximum sein, weil f_2 ein Minimum ist. Durch Division der Kraft P durch die Fläche f erhält man

die Spannung σ ; man kann also auch diese in einem Schaubild mit der Linie CD als Nulllinie darstellen. Hierin muss $\sigma_2 > (\sigma_1 = \sigma_3)$ werden.

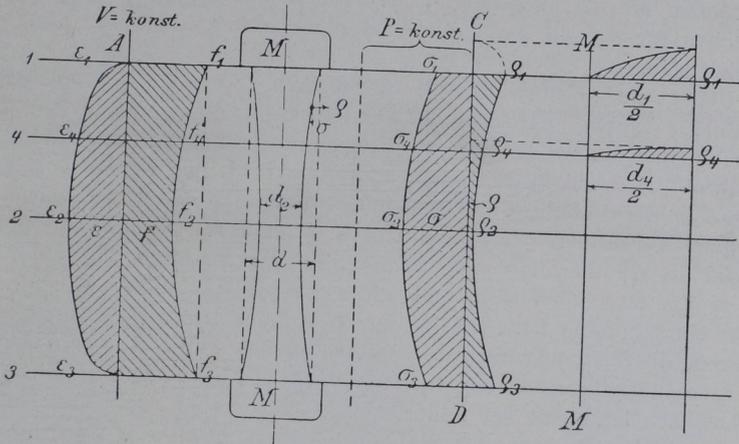


Fig. 51.

101a. Die aus der Einwirkung des Kopfes entstehenden Spannungen ϱ sind in den Querschnitten 1 und 3 am grössten und im Querschnitt 2 klein, oder verschwindend klein, wenn der Stab sehr lang ist. In der Stabmittellinie ist aber offenbar ϱ in allen Querschnitten gleich Null; ϱ wird also in allen Querschnitten von der Staboberfläche gegen die Stabmitte abnehmen müssen, wie dies durch die Schaubilder über den Linien 1 und 4 als Nulllinie für die Stabquerschnitte 1 und 4 dargestellt ist.

Denkt man sich nun in irgend einem Meridianschnitt des Stabes alle diejenigen Punkte verzeichnet, die ursprünglich in gleichem Abstände von der Mittellinie lagen [Fasern], so kennen wir bereits die von der äusseren und der mittleren Faser nach geschehener Formänderung angenommene Gestalt. Für die Spannungen, welche die einzelnen Fasern in ihrer eigenen

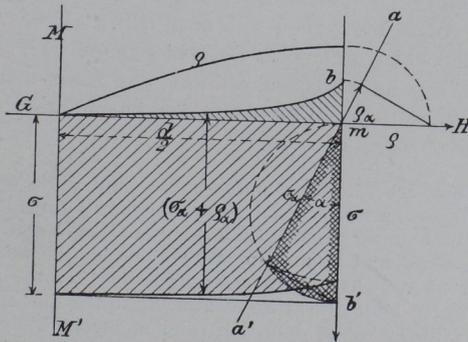


Fig. 52.

Richtung erfahren, kann man wieder die Schaulinien für jeden Stabquerschnitt verzeichnen, indem man die Spannungen σ und die Kräfte ϱ über GH (Fig. 52) verzeichnet und sie für jeden Punkt des Stabhalbmessers nach den herrschenden Faserrichtungen zerlegt. Man erhält das Schaubild $G b b' M'$, in dem $a a'$ die Richtung der Randfaser, $b b'$ diejenige der Mittel-

faser MM' darstellt; α ist der Neigungswinkel, den die Fasern in irgend einem Punkte des Halbmessers mit der Stabmittellinie MM' bilden; er ist am grössten für die äusserste Faser. Die Konstruktion der beiden Schaubildflächen für σ_a und ϱ_a dürfte wohl ohne weiteres aus der Fig. 52 verständlich sein.

Ueber die absolute Grösse der Kräfte σ , ϱ und $(\sigma_a + \varrho_a)$ sagen die Schaubilder nichts aus; auch die Frage kann nicht entschieden werden, wo in einem Querschnitt die Maximalspannung herrscht. Die Spannung in der Mittellinie ist in allen Stabquerschnitten $=\sigma$ und demnach relativ am grössten in der Stabmitte. Die Spannung der äussersten Faser ist abhängig von dem Verhältniss ϱ zu σ und dem Winkel α . Da in der Stabmitte [Querschnitt f_2] überall $\alpha=0$, so ist hier die Spannung in jeder Faser, auch in der äussersten $=\sigma$, und diese ist ein Maximum, weil der Querschnitt ein Minimum ist. Ob in der äussersten Faser, ebenso wie in der mittleren, die Spannung nach den Stabenden hin abnimmt, kann man ebenfalls nicht mit Sicherheit sagen; man darf dies aber wohl annehmen, weil es Thatsache ist, dass bei fehlerfreien Zerreiisstäben sich Einschnürungen [und Bruch] immer nahe der Stabmitte bilden (*L 119*, S. 1—75).

102. Man kann aus den obigen Ueberlegungen und aus dieser Thatsache den praktisch wichtigen Schluss ziehen, dass wie auch immer die Einspannvorrichtung und das Stabende konstruirt ist, die Hauptaufgabe beider die Verhinderung der Querschnittsverminderung am Uebergange von der Einspannstelle zum zu prüfenden Stabtheil ist.

103. Da wegen $v = \text{konst.}$ die Querschnittsänderung und die Längenänderung Hand in Hand gehen, so erfüllen auch diejenigen Einspannvorrichtungen ihren Zweck, welche die Längenänderung des Stabes innerhalb der Einspannung verhindern. Aus diesem Grunde gelingt es leicht, auch Stäbe ohne Köpfe z. B. zwischen Beisskeilen so einzuspannen, dass sie im mittleren freien Theil des Stabes zerreißen. Diese Einspannungsweise kann aber zuweilen aus anderen Gründen (71) das Versuchsergebniss beeinflussen, so dass man die Beisskeile im Allgemeinen nur zu rohen Versuchen zulassen will. Unter Absatz 71 ist aber schon darauf aufmerksam gemacht, dass hier manches Vorurtheil unterläuft. Die Emerysche Einspannung [Beschreibung am Schluss des Buches] ist ein Beweis, dass der vorgenannte Grundsatz der Aufhebung der Längendehnung mit Vortheil benutzt werden kann.

a. Den Einfluss des Einspannkopfes sollte man übrigens auch schon innerhalb der Elasticitätsgrenze nachweisen können, wenn man mit sehr empfindlichen Messinstrumenten und unter Anwendung kleiner Messlängen l_e einmal hart am scharf angesetzten Kopf und einmal in Mitte eines langen Stabes misst. Ich versuchte dies, bisher aber nicht mit durchschlagendem Erfolg, an Flusseisenstäben. Die Nebenspannungen oder die Ungleichförmigkeiten im Material müssen den Einfluss des Kopfes überwiegen, denn ich fand mehrfach bis zu mehr als 1 Procent kleinere Dehnungen am Kopf, während zuweilen sogar grössere Werthe als in Stabmitte gefunden wurden.

Bauschinger hat bei seinen Gesteinsuntersuchungen [Druckversuche] deutlich die Wirkung der Einspannflächen auf die elastische Zusammendrückung nachgewiesen.

b. Die vorhin gepflogenen Ueberlegungen führen aber noch zu anderen Schlüssen, auf die hier kurz eingegangen sein möge. In Folge der Wirkung der Stabköpfe würde man in einem cylindrischen Stabe die Querschnittsverminderung,

und damit die Längendehnung verringern und zugleich die Festigkeit erhöhen können lediglich dadurch, dass man den Stab in kurzen Abständen mit einigen Wulsten versieht. In einer so verstärkten Stange müsste der Bruch immer innerhalb derjenigen Strecke stattfinden, die die grösste Länge l von einem Wulst zum andern hat. Die Wirkung des Gewindes auf einer [durch schneidende Werkzeuge hergestellten] Schraube ist eine ganz ähnliche; das Gewinde oder die in stetiger Folge neben einander eingedrehten Ringe von gleichem Querschnitt (Fig. 53 bis 55) übernehmen hier die Rolle der Stabköpfe und daher ist die Schraube fester als der Cylinder vom Durchmesser des Kernes aus gleichem Material. Die Schraubenspindel [Flusseisen vorausgesetzt] erfährt aber während des Versuches eine ziemlich bedeutende Verlängerung. Macht man diese Verlängerung an einzelnen Stellen durch Aufschrauben von gut passenden Muttern unmöglich, so erreicht man wiederum eine Erhöhung der Festigkeit des Versuchsstückes¹⁾ [wenn sie auch durch den Versuch schwerlich noch festgestellt



Fig. 53.

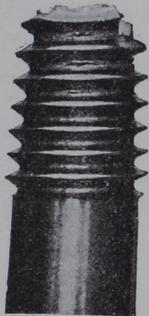


Fig. 54.

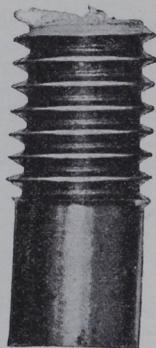


Fig. 55.

werden kann]. Zugleich kann man aussagen, dass nunmehr der Bruch innerhalb der längsten Strecke zwischen zwei Muttern erfolgen muss. Thatsache ist jedenfalls und in der Praxis wohl bekannt, dass nur auf Zug beanspruchte Schrauben fast niemals innerhalb der Muttern abreißen.

c. Warum sind einzelne Stoffe beim Zugversuch so wenig empfindlich gegen geringe Querschnittsverletzungen, während andere fast immer an diesen Stellen zu Bruche gehen? Warum sind ganz besonders harte und spröde Körper so empfindlich gegen Einspannung mittelst Keilen? Warum reißen harte Körper mehr ausserhalb der Stabmitte und häufiger neben oder in den Einspannvorrichtungen als weiche? Ein Theil der Ursachen ist hierbei als „Wirkung der Köpfe“ anzusehen.

Die geringe Querschnittsverwächung braucht nicht nothwendig eine Festigkeitsverminderung im Gefolge zu haben. Davon kann man sich bei der Ausführung von Zerreißversuchen jeden Tag überzeugen. In sehr vielen Anstalten versieht man ja die Stäbe mit einer ganzen Reihe von Querstrichen [der Theilung (137 u. 156)]; ja es ist sogar gebräuchlich die Marken zum Ansetzen der Spiegelapparate rings um den Rundstab einzureißen. Trotzdem kommen Brüche in diesen Theilmarken so selten vor, dass die doch gewiss mit aller Vorsicht arbeitenden öffentlichen Anstalten dieses Verfahren ohne Bedenken ausüben.

Dass harte und auch spröde Körper so leicht nahe oder in den Einspannungen reißen, ist neben anderen Ursachen besonders darin begründet, dass hierbei weder die Köpfe noch die Einspannvorrichtungen in ausgesprochenem Maasse die „Wirkung der Köpfe“ zur Geltung bringen können. Da diese Körper eine geringe Dehnbarkeit haben, ist die Querschnittszusammenziehung eine geringe.

¹⁾ Wegen der Verkürzung der freien Stablänge zwischen den Spannköpfen [Muttern], wodurch die Kräfte ρ (Fig. 50 S. 60) in der Mitte der durch die aufgeschraubten Muttern abgegrenzten Stabtheile grösser werden als in der Mitte des langen Stabes; es bleibt also auch f grösser, und σ_B muss deswegen ebenfalls grösser werden.

Die Wirkung der Köpfe kann also nicht stark hervortreten, eben so wenig kann auch die Verhinderung der Längenänderung in den Einspannungen zum Ausdruck kommen. Besonders schon aus diesen Gründen ist also die Einspannung von Material mit geringer Dehnbarkeit [hart gezogene Drähte, Gusseisen u. s. w.] schwer; sie vertragen aber auch sonst die kaum zu vermeidenden geringen Biegungsspannungen und die geringfügigen Beschädigungen nicht, weil bei ihnen jede Beschädigung sofort als Querschnittschwächung zum Austrag kommt.

Weiche Körper sind besonders empfindlich gegen zu starken Seitendruck. Wenn die Einspannbacken so starke Seitenpressung ausüben, dass unter der gleichzeitig wirkenden Zugspannung Fließen in der Einspannvorrichtung entsteht, so kann diese ihren Zweck — Verhinderung der Quer- oder Längsdehnung (103) natürlich nicht erfüllen. Zink, Papier, Leder u. s. w. sind empfindlich gegen Seitendruck, daher müssen die Druckflächen gross gemacht werden.

d. Die vorstehend erwähnten Thatsachen finden zum Theil durch die Versuche Tab. 8 eine Bestätigung.

Tabelle 8. Zugversuche mit Schrauben und Stäben mit eingedrehten Ringen.

Material: Flusseisen. Die Zahlen sind Mittelwerthe aus je 2 Versuchen.

(Nach Martens, Einfluss der Gewindeform auf die Festigkeit der Schraubenbolzen. Ztschr. d. V. d. Ing. 1895 S. 505.)

Art des Gewindes und der Ringe (Fig. 56 bis 59)	Gewindeform (l = Länge des prismatischen Stabtheiles)	Kerndurchmesser $\sim 2,4$ cm				Kerndurchmesser $\sim 1,3$ cm			
		Bruchspannungen		Verhältniss- zahlen		Bruchspannungen		Verhältniss- zahlen	
		σ_B		Stab 5 = 100		σ_B		Stab 5 = 100	
		Ringe	Gewinde			Ringe	Gewinde		
		a	b	a	b	a ₁	b ₁	a ₁	b ₁
		at	at			at	at		
1) scharf unter 55°	$l_1 = 0$	4390	4330	116,8	115,2	5000	4960	114,9	114,0
2) Whitworth	$l_2 \sim 0$	4370	4310	116,2	114,4	4760	4880	109,4	112,2
3) Verein deutscher Ingenieure	l_3 } klein	4270	4300	113,6	114,4	4870	5180	112,0	119,1
4) Sellers	l_4 }	4240	4220	112,2	112,8	4940	4790	113,6	110,1
5) glatter Normal- stab	l_5 sehr lang	3760		100		4350		100	

Die Versuche wurden ausgeführt um den Einfluss der Gewindeform auf die Festigkeit der Schrauben festzustellen. Dem entsprechend wurden auf der Drehbank die in Fig. 56 bis 59 dargestellten Gewindeformen in Stäbe vom

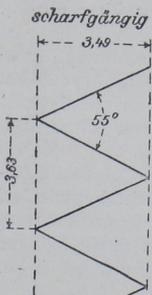


Fig. 56.

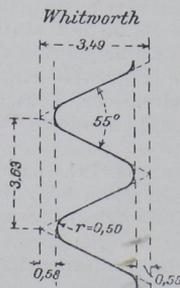


Fig. 57.

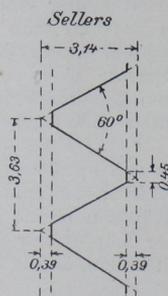


Fig. 58.

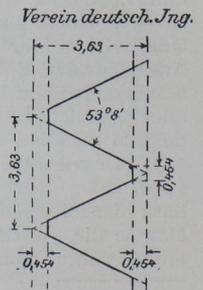


Fig. 59.

Kerndurchmesser 2,4 und 1,3 cm sowohl als Gewinde eingeschnitten als auch als Ringe eingedreht. Die mit solchen Stäben gewonnenen Ergebnisse sind dann mit den

an glatten Stäben gleichen Durchmessers verglichen. Die Art des Bruches und der Formänderungen geht aus der Fig. 53 bis 55 S. 63 [Ringe] hervor.

Aus den Verhältnisszahlen sieht man sofort, dass die Wirkung der Ringe auf 9–17% Festigkeitserhöhung und diejenige des Gewindes auf 10–19% veranschlagt werden darf.

104. In der Praxis sucht man den Einfluss des Kopfes auf ein möglichst geringes Maass zu beschränken. Zu dem Zweck giebt man dem Stabe einen allmählichen Uebergang vom Kopf zum Versuchsquerschnitt, wie es in Fig. 60 für den Rundstab angedeutet ist. Ausserdem stellt man die Längenmessungen nicht an der ganzen Stablänge [Gebrauchslänge] an, sondern benutzt nur einen Theil der prismatischen Stablänge hierzu.

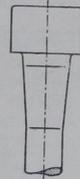


Fig. 60.

a. Auf Grund der dem Absatz 103 angeschlossenen Betrachtungen darf man wohl die Frage aufwerfen, ist es denn überhaupt richtig, den Stab mit einem allmählichen Uebergange zum Kopf zu versehen?

Diese Frage lässt sich allerdings nur bedingungsweise beantworten.

Für Materialien mit geringer Dehnbarkeit wird nach Voraufgehendem der sanfte Uebergang zum Kopf immerhin Nutzen haben, weil hierbei den als Folge mangelhafter Einspannung auftretenden schädlichen Wirkungen von Biegungsspannungen in gewissem Maasse entgegengewirkt wird. Bei dehnbaren Körpern wird der allmähliche Uebergang nichts nützen, weil ja in dem konischen Theil wegen der allmählichen Querschnittsvergrößerung die Spannung σ sowie damit die Verlängerung λ schnell abnehmen und nun ein ganz ähnlicher Vorgang sich abspielen wird, wie vom Kopf des Stabes aus.

Ich liess, um dies festzustellen, eine Anzahl von Versuchen ausführen, und zwar eine Reihe A an Stäben mit schlankem Uebergange zum Kopf, wie etwa in Fig. 60 gezeigt, und eine Reihe B, bei der der cylindrische Schaft unmittelbar in den Kopf überging, scharfer Uebergang. Die Stäbe hatten gleichen Durchmesser (2,0 cm) und waren aus ganz gleichem Material unmittelbar neben einander entnommen; sie waren mit Centimetertheilung versehen, deren Länge vor dem Versuch und nach dem Bruch ausgemessen wurde. Die Mittelwerthe für die Dehnungen δ in den Eintheilungen der Stäbe sind in Fig. 61 mit einander verglichen, indem diese Dehnungen als Abscissen [über den einzelnen Theilungspunkten] aufgetragen wurden.

Man erkennt, dass in beiden Fällen die letzten Theilungen [in A unmittelbar am Beginn des Ueberganges zum Kopf, in B unmittelbar neben dem Kopf selbst gelegen] wesentlich geringere Dehnungen zeigen, und dass die Dehnungen gegen die Stabmitte [mit wachsenden Theilstrichnummern] wachsen; ganz so wie in Absatz 101 vorausgesetzt. Vergleicht man die Linien A u. B, so ist zwar die Wirkung des scharfen Ueberganges [Linie B] schwach zum Ausdruck gekommen [δ ist um etwa 2% geringer als bei A], aber schon in der zweiten Theilung hört der Unterschied auf.

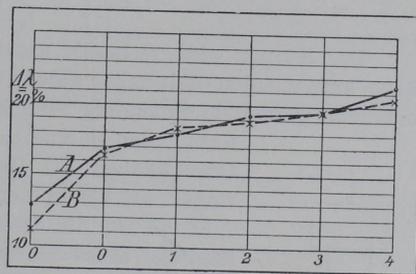


Fig. 61.

b. Man würde offenbar den Einfluss der Einspannköpfe auf die Dehnbarkeit bei diesem weichen Material [Flusseisen von $\sigma_B = 4000$ at] besser ausgeschlossen haben, wenn man den cylindrischen Theil um die Länge der konischen Uebergänge bis zum Kopf [sie betrug bis zum 3,5fachen Durchmesser an jedem Ende] länger gemacht hätte. Den hierdurch erzielten Erfolg kann man ungefähr aus Fig. 61 ermessen, wenn man weiss, dass die ursprüngliche Grösse der Theilungen 1,0 cm [bei 2,0 cm Stabdurchmesser] betrug. Es wären also 7 Theilungen an jedem Ende zur Stablänge hinzugekommen, und da in Fig. 61 der Einfluss des Kopfes schon bei den Theilstrichen 2–4 gering

ausfällt [die Linien sind nur sehr wenig gegen die Nulllinie geneigt], so würde durch Anwendung der einfachen prismatischen Fortsetzung statt der konischen, trotz gleicher Stablänge jedenfalls ein Vortheil erzielt worden sein.

Man braucht wohl kaum nochmals darauf aufmerksam zu machen, dass der Einfluss der Köpfe bei verschiedenem Material verschieden stark bemerkbar wird.

Druckversuch.

105. Wie man gesehen, haben die Einspannköpfe oder die ihre Stelle ersetzenden Einspannvorrichtungen einen Einfluss auf die Spannungsvertheilung und auf die Formänderungen in einem auf Zerreißen beanspruchten Stabe, und es liegt nahe zu fragen, wie steht es um den Einfluss der Einspannvorrichtungen auf die Ergebnisse des Druckversuches?

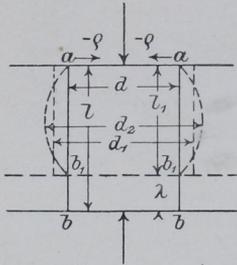


Fig. 62.

Beim Druckversuch, der ja fast immer mit kurzen prismatischen Körpern zwischen den ebenen Druckflächen der Maschine ausgeführt wird, wirken diese Endflächen auf den Körper ein, indem sie der Querschnittsvergrößerung einen Reibungswiderstand entgegensetzen. Ein zylindrischer Probekörper aus Flusseisen wird beispielsweise, wenn er die Verkürzung $-\lambda = l_1 - l$ (Fig. 62) erfährt, nicht, wie es den Betrachtungen in Absatz 55, S. 31 entspräche, einen neuen Cylinder bilden, dessen Durchmesser, sofern die Elasticitätsgrenze nicht überschritten wurde,

$$d_1 = d a_q = d \varepsilon \frac{1}{m}$$

sein würde, und dessen Rauminhalt nach dem Beginn der bleibenden Formänderung nahezu konstant bliebe, nämlich

$$i = d_1^2 \frac{\pi}{4} l_1 = d^2 \frac{\pi}{4} l, \text{ d. h.}$$

$$d_1 = \sqrt[3]{d^2 \frac{l}{l_1}}$$

Der Körper wird vielmehr unter der Einwirkung der an der Druckfläche auftretenden Reibung, durch welche die nach dem Mittelpunkt der Endfläche gerichtete Spannung $-\rho$ hervorgerufen wird, in eine Tonnenform vom Rauminhalt i übergeführt, derart dass an den Druckflächen die Durchmesservergrößerung erheblich geringer ist, als in der Mitte des Körpers.

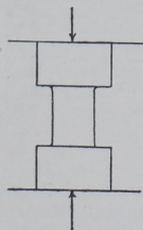


Fig. 63.

Ueber die Spannungsvertheilung im Körper könnten ähnliche Betrachtungen angestellt werden, wie es im Absatz 101 über die gleichen Verhältnisse in einem dem Zugversuch unterworfenen Körper geschah. Aber es ist wohl ohne weiteres klar, dass es nicht möglich ist, einen Druckversuch ganz der Theorie gemäss und ohne die Wirkung der Einspannflächen, oder wenn etwa die Probe nach Fig. 63 geformt sein sollte, ohne die Wirkung der Einspannköpfe auszuführen. Also auch der Druckversuch ist in Wirklichkeit, ebenso wenig wie der Zugversuch, ein ganz einfacher Vorgang.

a. Auch bei den auf Druck beanspruchten Körpern kann man, wie bereits Bauschinger und Andere nachgewiesen haben, durch die Feinmessungen mit dem Spiegelapparat den Nachweis liefern, dass die Zusammendrückungen für gleiche Belastungen in den verschiedenen Körpertheilen verschieden gefunden werden. Bei der Prüfung des elastischen Verhaltens von Steinprismen erhält man z. B. merklich andere Werthe, wenn man an kurzen Messlängen in der Nähe der Druckplatten misst, als wenn man mit gleichen Messlängen die Verkürzungen in der Probenmitte bestimmt; man erhält selbst etwas verschiedene Werthe, wenn man in der Probenmitte einmal mit kleiner und ein andermal mit möglichst grosser Messlänge arbeitet. Alles dieses ist bedingt durch die ungleiche Spannungsvertheilung in Folge der Wirkung der Stabköpfe.

b. Die Beschaffenheit der Druckflächen ist von wesentlichem Einfluss auf das Ergebniss des Druckversuches. Bauschinger hat diesen Gegenstand seit 1873 (*L 2*) wiederholt behandelt. Er hat besonders nachgewiesen, dass die Druckflächen eben bearbeitet [gehobelt, geschliffen u. s. w.] sein müssen, und zwar sowohl die Endflächen am Probekörper als auch die Druckflächen der Maschinen. Die letzteren müssen besonders hart sein, wenn sie für alle Fälle ausreichen sollen. Weiche Druckflächen, etwa durch Zwischenlage von weichen Materialien erzeugt, würden das Ergebniss der Bruchfestigkeit in schwer kontrollirbarer Weise beeinflussen, sobald sie so weich und nachgiebig sind, dass beim Versuch ihre Quetschgrenze überschritten wird und sie vom Mittelpunkt der Druckflächen nach dem Umfang zu fliessen beginnen. Liegt die Quetschgrenze der weichen Zwischenlagen hoch genug, so wird der Körper, etwa ein unvollkommen bearbeiteter Steinwürfel, in fast gleicher Weise zu Bruche gehen, wie wenn er mit ebenen Flächen bei voller Anlage beansprucht war; die Brucherscheinungen werden ganz ähnliche und die Festigkeit erscheint wenig beeinträchtigt. Liegt dagegen die Quetschgrenze der weichen Zwischenlage verhältnissmässig tief, so werden die Bruchformen wesentlich andere, und damit wird auch die Festigkeit verringert. Dies geschieht sowohl in Folge der Veränderung der widerstehenden Kräfte q (Fig. 62), die in den Auflagerflächen die Querausdehnung zu hindern streben, als auch in Folge der sprengenden Wirkung der als zähe Flüssigkeit wirkenden weichen Zwischenlagen, die die etwa zugänglichen Vertiefungen und Höhlungen ausfüllend den Körper gleichsam durch inneren Druck auseinander sprengt. Durch das seitliche Auseinanderfliessen der Zwischenlagen können die Kräfte q nicht nur den Betrag Null erreichen, sie können sogar ihre Richtung umkehren und müssen dann eine beträchtliche Verminderung der Druckfestigkeit hervorrufen. „Daher kann es kommen [sagt Bauschinger], dass Beilagen aus einer und derselben Bleiplatte die Druckfestigkeit eines weichen Sandsteines gar nicht ändern, die eines härteren, festeren Sandsteines oder eines weicheren Kalksteines nur wenig und dagegen die eines Granites sehr bedeutend, bis auf die Hälfte, verringern können, wobei sich in ersterem Falle immer Pyramiden, im zweiten Pyramiden oder solche mit Lamellen gemischt und im dritten Falle stets Lamellen als Bruchstücke bilden. In letzteren Fällen ist dann selbstverständlich auch die Druckfestigkeit von der Höhe der Probestücke bis zu einem gewissen Grade nach auf- und abwärts unabhängig“ (*L 2* Heft 18).

4. Fliesserscheinungen bei der Formänderung.

106. Bei Erreichung der Streckgrenze oder gleich nach dem Ueberschreiten derselben treten, namentlich bei den Metallen, häufig sehr regelmässige und eigenthümliche Erscheinungen auf, die zum Theil sich auf die Wirkung der Einspannköpfe [Abschnitt 3 S. 59] zurückführen lassen.

Beim Zugversuch wirft beispielsweise ein noch mit der vom Auswalzen herrührenden Hammerschlagschicht versehener Eisenstab diese Schicht in dem Augenblick ab, in welchem er anfängt zu fliessen. Diese Schicht hat nämlich eine geringere Dehnbarkeit als das Metall selbst, und deswegen springt sie ab, sobald ihre eigene Dehnbarkeit überschritten wird; man sagt, der Stab wirft ab. Das Abwerfen beginnt in der Regel an den

Köpfen und schreitet gegen die Stabmitte vor; beim Flachstab bildet die fortschreitende Grenze meistens einen Winkel von etwa 45 bis 60° gegen die Stabaxe.

Ein blank polirter oder mit feinem Schmirgel abgezogener Eisenstab bekommt nach Ueberschreiten der *S*-Grenze eine matte Oberfläche, während ein harter, wenig dehnbarer Stab [z. B. Gusseisen oder harter Stahl] seine Oberfläche bis zum Bruch fast gar nicht verändert und blank bleibt. Die matt gewordene Oberfläche sieht aus, als ob sie mit einem feinen Hauch oder Thau bedeckt wäre. Meistens wird der Thau allmählig gröber, die Oberfläche bekommt ein narbiges Aussehen, das bei gleichmässig weichen Materialien [weiches Flusseisen, Kupfer u. s. w.] schliesslich in längliche runzelige Körperchen gleichlaufend mit der Stabaxe, oder in Längsfurchen und Fältelungen übergeht. Bei anderen Metallen bekommt die Staboberfläche ein ganz unregelmässiges eigenthümlich knitteriges Aussehen.

Aehnliche Erscheinungen machen sich auch beim Druckversuch geltend.

Es ist praktisch und erleichtert das gegenseitige Verständniss ganz wesentlich, wenn man sich daran gewöhnt, gleichartige und immer wiederkehrende Erscheinungen in den Versuchsprotokollen und Veröffentlichungen stets wieder mit der gleichen Benennung zu belegen. Deswegen seien die hier genannten Erscheinungen auf Taf. 1 dargestellt und die in der Charlottenburger Anstalt üblichen, zum Theil von anderen Anstalten übernommenen und in weitere Kreise eingebürgerten Bezeichnungsweisen hier mitgetheilt.

Den Eintritt der Thaubildung und sehr feiner Narben bezeichnet man: der Stab wird krispelig (Fig. 1 und 2 Taf. 1). Werden die Körnchen



Fig. 64.

gröber, so sagt man: der Stab wird narbig; er bekommt Längsfurchen oder Fältelungen (Fig. 9 Taf. 1); er wird knitterig (Fig. 64).

107. Bei den Metallen, namentlich bei Benutzung blank bearbeiteter Flachstäbe, kommen häufig noch andere ausserordentlich charakteristische Erscheinungen, die sogenannten Fliessfiguren vor. Diese Erscheinungen sind deswegen von grösserem Interesse für den hier zu behandelnden Gegenstand, weil sie wieder Einblick geben in die Wirkungsweise der Spannköpfe und zugleich überzeugend darthun, dass die Spannungsvertheilung in einem Zerzeiss- oder Druckprobekörper durchaus keine so einfache ist, wie es vielfach angenommen zu werden pflegt. Zugleich giebt die genaue Beobachtung und das Studium dieser Erscheinungen nicht nur zu interessanten theoretischen Forschungen Anregung, sondern sie hat für das Materialprüfungswesen eine praktische Bedeutung, indem sie Licht auf manche Vorkommnisse bei Ausführung der Feinmessungen wirft, die sonst wohl unverstanden bleiben würden. Sehr grossen praktischen Nutzen kann auch die Kenntniss und Beachtung dieser Erscheinungen gewähren, weil man auf überanstrengten Konstruktions-theilen zuweilen ähnliche Erscheinungen bemerken kann und

diese dann ein Warnungszeichen oder ein Beweismaterial für die Art der geschehenen Ueberanstrengungen werden können.

Solche Flussfiguren sind auf Taf. 1 mehrfach abgebildet. Es ist übrigens schon an dieser Stelle darauf aufmerksam zu machen, dass sie nicht bloß beim Zug- und Druckversuch, sondern auch bei allen anderen Arten von Festigkeitsversuchen bemerkbar werden, und dass aus diesen bei den Metallen beobachteten Erscheinungen schliesslich gewisse Folgerungen auf andere Körper übertragen werden können, bei denen Flussfiguren nicht aufzutreten scheinen.

108. Man kann unter den beim Zerreißversuch auftretenden Flussfiguren mehrere Gruppen unterscheiden, die in der Charlottenburger Anstalt mit verschiedenen Benennungen belegt sind, um sich kurz ausdrücken zu können.

In der Regel tritt [bei Flachstäben aus Flusseisen] eine Gruppe von Flussfiguren, von den Köpfen aus beginnend, auf, deren erste Anzeichen durch einen schmalen, am Ende spitzen Streifen gegeben werden, der, an den Kopfecken [bei scharf angesetzten Schultern, Fig. 15, Taf. 1] beginnend, die breite Stabfläche unter einem Winkel von etwa 45° durchschneidet. Von diesem schmalen Streifen aus schieben sich in mehr oder minder regelmässigen Abständen ähnliche in Spitzen auslaufende Streifen vor, die senkrecht zur Stabaxe verlaufen und an den Enden oft wieder in der Richtung von etwa 45° zur Axe einlenken (Fig. 14—20).

Im weiteren Verlauf entsteht nun entweder ein Streifennetz, das sich unter nahezu rechten Winkeln kreuzt und zuweilen ausserordentlich regelmässig gebildet ist (Fig. 3, 14—20), oder die Streifen schieben sich, nur von der einen Ecke des Stabendes ausgehend, unter einem Winkel von $45-60^{\circ}$ gleichlaufend zu einander von dem Kopf aus gegen die Mitte des Stabes vor (Fig. 5), indem eine Linie vor der andern, immer durch eine schmale nicht veränderte Fläche von einander getrennt, entsteht. Diese trennenden Flächenstreifen werden dann von senkrecht zur Stabaxe auftretenden Linien in mehr oder minder regelmässigen Abständen durchbrochen (Fig. 15).

Die zuletzt geschilderten Erscheinungen dürften die Regel bilden; sie sind auch die Ursache für das vorhin besprochene Abwerfen des Zunders nach Grenzlinien, die unter 45 bis 60° zur Stabaxe verlaufen. Man bezeichnet diese Gesamtheit der Erscheinungen, wegen der besonders hervortretenden Linien, als Diagonallinien oder als Netzbildung; das Netz wird als engmaschig oder weitmaschig benannt.

109. Zuweilen treten aber auch vorwiegend senkrecht zur Stabaxe verlaufende Streifungen auf, die entweder flammenförmig vom Rande auslaufend [Randflammen] vorschreiten (Taf. 1, Fig. 6, 10), oder sich aus den vorbeschriebenen Erscheinungen entwickeln und als deutliche Querstreifungen oder Querlinien hervortreten (Fig. 6).

Im weiteren Verlaufe des Versuches verschwinden die Flussfiguren meistens ganz vollständig.

110. Man kann, wie dies von Pohlmeier geschehen, diese Erscheinungen an Eisenstäben, deren sauber geschlichtete Oberfläche man durch Glühen in Wasserdampf mit der Barfschen Oxydschicht bedeckte, ganz besonders deutlich sichtbar machen, indem dann beim Fluss an so vorbereiteten Stäben die blauschwarze Oberfläche von silberweissen Adern

durchzogen wird. Vor kurzem wurde mir ein Buch von L. Hartmann¹⁾ (*L 120*) bekannt, welches sich eingehend mit den Fließfiguren beschäftigt und eine sehr grosse Zahl von Abbildungen giebt, die die bei allen möglichen Beanspruchungsformen auftretenden Fließfiguren nach Zeichnungen darstellen. Leider habe ich diese werthvolle Arbeit nicht mehr bei meiner Erläuterung des Gegenstandes berücksichtigen können.

a. Ich machte weiter oben auf die praktische Bedeutung der Fließvorgänge für die Versuchstechnik aufmerksam und möchte hier den Nachweis für meine Worte bringen, indem ich eine verdienstvolle und leider nicht genug beachtete Arbeit von B. Kirsch zum Theil wörtlich wiedergebe. Diese Arbeit fasst, unter Hinzufügung von theoretischen Betrachtungen, die Ergebnisse langjähriger Beobachtungen und Erfahrungen zusammen, die von dem Personal der Versuchsanstalt in Charlottenburg und besonders von Kirsch, bei Ausführung sehr umfangreicher Versuche mit Eisenbahnmateriale (*L 122*) gemacht wurden.

Kirsch schreibt etwa Folgendes (*L 108*):

„Die treffende Bezeichnung „Fliesen“ ist von Tresca (*L 123*) „für die unter dem Einfluss äusserer Kräfte bei bildsamen Körpern stattfindende Verschiebung der Massentheilchen“ eingeführt worden. Kick (*L 100 S. 75*) bemerkt hierzu, dass nicht blos für bildsame Körper von einem Fliesen gesprochen werden kann, „man kann vielmehr auch bei spröden Körpern, wenn dieselben von einer genügend festen Hülle umschlossen sind und mit dieser der Formänderung unterworfen werden, ganz wohl von einem Fliesen der Theilchen reden, denn auch solche Körper lassen eine Verschiebung ihrer Theilchen in ganz gleichförmiger Weise wie die bildsamen Körper zu; auch spröde Körper können ihre Form bleibend verändern, ohne dass dadurch ein Zusammenhang der Theilchen aufgehoben wird“ (*L 124*).

Kirsch stellt dann 6 Sätze über den Fließvorgang auf, wie er verläuft, wenn man, wie in der Versuchsanstalt, die Maschine mit gleichbleibender Geschwindigkeit vorgehen lässt, so dass der Stab um 1 Procent in der Minute [$1\%/\text{min}$] gedehnt wird. Der Inhalt dieser Sätze ist zum Theil früher schon besprochen, zum Theil wird das später geschehen müssen; hier möge nur Platz finden, was gerade in diesen Abschnitt gehört.

b. In Satz 6c wird darauf aufmerksam gemacht, dass „das Fliesen im Allgemeinen vom Kopf des Stabes seinen Anfang nimmt“ und dass man dies oft durch Feststellung der Breitenunterschiede in den geflossenen und nicht geflossenen Theilen des Stabes feststellen kann, die zuweilen 0,03 bis 0,04 cm auf 4,0 cm Stabbreite betragen.

c. Satz 6d lautet: „Am besten ist der Fließbeginn natürlich mit Spiegelapparaten zu beobachten. Die nachfolgenden Bemerkungen beziehen sich ausschliesslich auf die Anwendung des Bauschingerschen Spiegelapparates. Man hat, um ein klares Bild über die Vorgänge der Maassstabbewegung [scheinbare] zu erhalten, auf verschiedene kleine Umstände zu achten. So ist die Trägheit der anzuhebenden Gewichte und etwaige Undichtigkeit am hydraulischen Kolben der Maschine von Einfluss auf diese Bewegung. Wenn nämlich ein Fliesen noch nicht stattfindet und eine bestimmte Last einspielt, so wird eine Undichtigkeit am Kolben den Hebel langsam zum Sinken bringen, ohne dass der Stab durch Fliesen nachgiebt. Der niedergehenden Bewegung der Gewichte entspricht wegen der Trägheit eine geringe Entlastung, ein geringes Zurückweichen der Spiegel, bis die Wagschale des Gewichtshebels zum Aufsitzen kommt, worauf sich der Stab, wenn man lange genug wartet, langsam bis zu dem Betrage der Reibung des hereingehenden Kolbens entlastet. Ist also die Dichtung des Kolbens keine ganz vollkommene, so ist eine genaue Beobachtung des Fließbeginnes allein am Hebel der Maschine undurchführbar. Wird nun der gesunkene Hebel wieder bis zur Gleichgewichtslage angehoben, so ist die wegen der Trägheit der Massen entstehende Vergrösserung der Last unterhalb der Fließgrenze unschädlich, d. h. ohne Einfluss auf die Richtung der

¹⁾ Man vergleiche auch D. Kirkaldys Abbildungen der Fließfiguren bei Zerreißversuchen mit Nietverbindungen (*L 121*).

Ablesungen, wenn man mit den Ablesungen wartet, bis der Hebel nicht mehr schwingt. Befindet man sich dagegen direkt vor dem Flussbeginn, so kommt es gar nicht selten vor, dass die Lastvergrößerung wegen der Trägheit der Massen die tatsächliche Belastung des Stabes über seine Flussgrenze hinaus steigert; der Stab fließt dann ein wenig während des Anhebens, und es verändert sich an den Ablesungen nichts mehr, wenn der Hebel einspielt, weil dann die wirkliche Belastung unterhalb der Flussgrenze liegt. Ist dann der Hebel nach einiger Zeit wieder wegen Undichtigkeit gesunken und man hebt nochmals an, so fließt der Stab wiederum ein wenig. Man kann das fünf-, sechsmal hintereinander machen und jedesmal ein Stück strecken. Ist der Kolben vollständig gedichtet und hat man die erste Laststufe hinter der Flussgrenze erreicht und zum Einspielen gebracht, so muss der Hebel langsam sinken, gleichviel ob der Stab innerhalb oder ausserhalb der Messlänge fließt; zum Unterschied gegen das Verhalten der Spiegel bei Undichtigkeiten müssen sich aber jetzt gleichzeitig die Ablesungen ändern, und man beobachtet die Fälle:

- 1) beide Spiegel gehen vorwärts;
- 2) beide Spiegel gehen rückwärts;
- 3) einer geht vorwärts, der andere rückwärts.“

c. „Im ersten Falle fließt der Stab innerhalb der Messlänge, und es ist in der Versuchsanstalt die Bestimmung getroffen, dass auf den Protokollen die Flussgrenze als erreicht zu verzeichnen ist, wenn innerhalb einiger Zeit, etwa einer Minute, eine rücksichtlich der Genauigkeit der Ablesungen ($2 \cdot 10^{-5}$ cm) sichtbare Aenderung nach vorwärts sich zeigt.“

d. „Im zweiten Falle fließt der Stab ausserhalb der Messlänge. Hierbei lässt sich eine nicht uninteressante Beobachtung machen. Man kann nämlich, wenn die Laststufen nicht zu gross sind, noch eine geringe Zahl derselben zum vorübergehenden Einspielen bringen, ehe das Fließen in die Messlänge eintritt und auf diese sich verbreitet. Hält man eine derselben im Einspielen, durch entsprechend langsames Vorgehen mit dem Kolben, so herrscht also wegen dieser Bewegung kein Gleichgewicht zwischen der durch die aufgesetzten Gewichte angezeigten gleichbleibenden Zugkraft am bewegten Stabkopf und den inneren Spannungen. Der tatsächlich vom Stabtheil innerhalb der Messlänge getragene Theil der Zugkraft ist also kleiner, als die aufgesetzten Gewichte anzeigen. Die Verlängerung der Messlänge muss demnach für die letzte Lastvergrößerung eine kleinere sein als bei der gleichen Lastvergrößerung vor dem Flussbeginn.“

„Das nachstehende Protokoll [Tab. 9 S. 72] zeigt dies ganz deutlich:

e. „Jetzt bleibt noch der dritte Fall zu besprechen, in dem ein Spiegel vorgeht, der andere langsam zurückweicht, und zwar während die Last im Einspielen gehalten wird. Dies ist der meist vorkommende Fall. Wenn man lange genug wartet, so ändert sich diese Bewegung häufig derart um, dass der eben vorgegangene Spiegel stehen bleibt und dann zurückweicht, während der andere umkehrt und sich jetzt vorwärts bewegt. Noch später tritt ein Augenblick ein, in welchem beide Maassstabbilder sich rasch vorwärts bewegen. Diese Vorgänge sind leicht erklärlich, wenn man berücksichtigt, dass das Fließen unter einer schrägen Richtung sich fortpflanzt (Taf. 1. Fig. 5). Ist z. B. das Flussgebiet $a b$ (Fig. 65) rechts (R) mit der Spitze a in die Messlänge vorgeschritten,

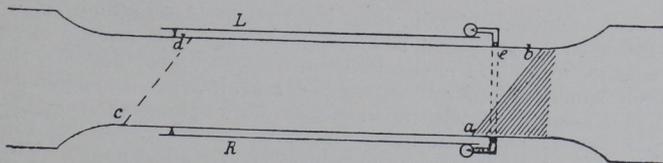


Fig. 65.

so bewegt sich der rechte Spiegel vorwärts, während für die linke Seite des Stabes (L) noch Fließen ausserhalb der Messlänge herrscht. Durch diese Ungleichmässigkeit auf beiden Seiten bewegt sich erstlich der Stab im Ganzen nach rechts herüber, dann aber dreht sich auch der ganze Spiegelapparat um die Be-

festigungsschneide *e*. Beide Bewegungen äussern sich links in einer Abnahme der Ablesung, rechts in einer Zunahme; dass die im Fernrohr beobachtete Maassstabbewegung wirklich links eine rückgängige werden muss, erklärt sich also sofort daraus, dass die Messlänge, so lange *b* ausserhalb bleibt, bei einspielender Last unverändert bleibt, oder sogar, durch Vorwärtsgen des Punktes *b* und dem damit verbundenen lebhafter werdenden Fliessen ausserhalb entsprechend, noch allmählig mehr entlastet wird, wodurch gleichfalls Rückgang entsteht. Das Wechseln¹⁾ der Spiegelbewegung aus rechts vor, links zurück in rechts zurück, links vor erklärt sich dadurch, dass das Fliessen am Kopfe bei *a b* vorübergehend aufhört und dafür ein eben solcher Fliessbereich mit *c d* von der anderen Kopfseite in die Messlänge eindringt.“

„Bei raschem Vorwärtsgen beider Spiegel ist entweder der eine Bereich auch mit dem zurückliegenden Punkt in die Messlänge gelangt, oder beide Spitzen *a* und *d* gehen gleichzeitig vor; jedenfalls steht fest, dass ein Fliessen der Messlänge als des eigentlich geprüften Materialstückes schon bei raschem Vorwärtsgen eines Spiegels stattfindet“ [bei einspielender Belastung].

Tabelle 9. Fliessen ausserhalb der Marken.

Belastung <i>P</i> kg	Spannung σ at	Ablesungen			
		links $\frac{1}{50000}$ cm	rechts $\frac{1}{50000}$ cm	ΣA cm 10^{-5}	ΔA cm 10^{-5}
1	2	3	4	5	6
		Berechnetes A für $\sigma = 0$		— 60	
250	80	0	0	0	—
1000	320	105	75	180	180
2000	640	221	185	406	226
3000	970	342	290	632	226
4000	1290	468	390	858	226
5000	1610	594	490	1084	226
250	80	22	12	10	—
5000	1610	611	477	1088	—
6000	1930	734	577	1311	223
7000	2250	855	681	1536	225
8000	2570	970	790	1760	224
250	80	18	3	15	—
8000	2570	964	800	1764	—
9000	2900	1070	918	1988	224
10000	3220	1155	1060	2215	227
11000 ²⁾	3540	1200	1235	2435	220
12000	3870	1210	1444	2654	219
13000	4180	1240	1620	2860	206
13250	4270				

Fliessen

f. Kirsch schliesst hieran eine theoretische Abhandlung über die Beziehungen zwischen dem Fliessen und den Spannungen an, auf die ich den Leser verweisen möchte, weil darin einige hübsche Gesichtspunkte gegeben sind. Diese Betrachtungen kommen, unter Benutzung der Mohrschen Darstellungsweise für die auf einen Massenpunkt wirkenden Kräfte, darauf hinaus, „dass das Fliessen fester Körper darauf zurückzuführen ist, dass an der Stelle des Körpers, an welcher er ins Fliessen kommt, die Schubfestigkeit τ überwunden wird und dass

¹⁾ Bei Rundstäben verursacht die schräge Richtung häufig nur ein Vor- oder Rückwärtsneigen des Apparates, d. h. Heben oder Senken der Maassstabbilder, weil sie in jeder Lage zur Stabaxe sich finden kann.

²⁾ Streckt, Skalen sinken (Fliessen ausserhalb).

bei Auftreten eines Bruches in der Bruchfläche die Zugfestigkeit σ überwunden wurde.“

111. Aus den beim Fließen an der Staboberfläche auftretenden, vor-
aufgehend beschriebenen, mehr oder weniger ähnlichen Erscheinungen kann
man zuweilen auf die Behandlung schliessen, die das Material vor der
Bearbeitung des Probestabes erfahren hat, ja zuweilen giebt sie sich sogar
ganz unmittelbar zu erkennen.

Hat beispielsweise ein Flachstab aus Flusseisen beim Richten vor dem
Abschlichten der Oberfläche einzelne Schläge mit dem Hammer er-
fahren, deren Spuren nach dem Schlichten gar nicht mehr erkennbar zu
sein brauchen, oder hat auf den Stab ein Seitendruck gewirkt, der ihn
örtlich bis über die Quetschgrenze beanspruchte, so kommen diese Stellen
beim Fließen wieder zum Vorschein. Es bilden sich schliesslich förmliche
Knoten, von denen aus die Streckfiguren mehr oder minder regelmässig
auslaufen, ähnlich wie an den Köpfen. Die betreffenden Stellen sind
schwerer dehnbar als das umgebende Material, sie treten deswegen erhaben
hervor und behalten einen grösseren Querschnitt als die geflossenen Stab-
theile (Taf. 1, Fig. 11). Eingeschlagene oder eingewalzte Zeichen oder die
Zähne der Schraubstockbacken, können vollkommen wieder sichtbar werden
(Taf. 1, Fig. 13 u. 12). Flachstäbe, die aus dem Fuss von Schienen ent-
nommen wurden, welche vorher dem Biegeversuch unterworfen waren,
liessen beim Zerreißversuch deutlich die Stellen erkennen, mit denen sie
beim Biegeversuch auf den Auflagerrollen aufgelegt hatten (Taf. 1, Fig. 11).

Unter diese durch die Vorbehandlung des Materiales bedingten Fliess-
erscheinungen hat man auch zu rechnen, was auf Tafel 1, Fig. 7 dargestellt und
von mir früher wie folgt beschrieben wurde (L 122 S. 20).

„Moiré. Mit dieser Bezeichnung wurden einstweilen, in Ermangelung einer
besseren und gleichzeitig kurzen Ausdrucksweise, Erscheinungen belegt, welche
namentlich an sauber geschlichteten Flachstäben aus Schienenstegen und Füßen
auftreten. Sie stellen sehr zarte Zeichnungen dar, welche den Zeichnungen auf
dem bekannten, „Moiré antique“ benannten Zeugstoffe ähnlich sind. Diese Zeich-
nungen verdanken der Wirkung der Walzen auf das Material ihre Entstehung,
indem beim Fließen unter der Walze, ganz ähnlich wie beim Fließen unter der
Wirkung der Zugkraft, der Bewegungszustand des Materiales kein stetiger ist.
Beim Verlassen der Walze und beim Abkühlen werden die entstandenen Ungleich-
förmigkeiten im Material nicht völlig ausgeglichen; sie werden deswegen beim
Zugversuch später zum Ausdruck kommen müssen und die Bewegung der Theil-
chen beim Fliessvorgang beeinflussen. Die Folge ist, dass die genannten Zeich-
nungen auf der Oberfläche entstehen, und zwar werden die schwerer fließbaren
Theile an der Oberfläche Erhöhungen, die leichter fließbaren, Vertiefungen bilden.
Hierbei spielen selbstverständlich auch noch die Unebenheiten der Walzenober-
flächen eine Rolle, indem ihre Erhabenheiten einen stärkeren Druck auf das
Material, also dessen schnelleres Fließen, ihre Vertiefungen aber einen geringeren
Druck, also langsames Fließen unter der Walze erzeugen; die am meisten
gedrückten Stellen erscheinen dann beim Fließen auf der vorher polirten Stab-
oberfläche als Erhabenheiten.

112. Auch aus den vorbesprochenen Erfahrungen erkennt man leicht
den Werth, den das Studium der Fliesserscheinungen beim Zerreißversuch
haben kann, denn es ist klar, dass Stäbe, die die beschriebenen örtlichen
Erscheinungen zeigen, nicht die ganze Dehnbarkeit des Materiales entwickeln
können, also gewissermassen zu ungünstiger Beurtheilung führen müssen.
Man erkennt aber auch schon an dieser Stelle, dass die Vorbearbeitung,
die das Material vor der Herstellung der Probestäbe zum Festigkeitsversuch
erfuhr, von sehr grossem Einfluss auf das Prüfungsergebniss sein muss.

Auf die Flieberscheinungen an den Staboberflächen ist von manchen anderen Beobachtern auch früher schon aufmerksam gemacht worden, indessen wird an dieser Stelle wohl das bisher Mitgetheilte genügen.

5. Einschnürung.

113. Führt man den Zugversuch über die Streck- oder Fliebergrenze hinaus, so erhält man, wie bereits mitgetheilt (44), bei weichen, dehnbaren Materialien vor dem Eintritt des Bruches eine Einschnürung, indem das Material an dieser Stelle schneller zu fließen beginnt, als in allen übrigen Querschnitten des Stabes, wo dann bald ein Stillstand eintritt. Die benachbarten Stabtheile übernehmen gewissermassen die Rolle des Stabkopfes, indem sie der Einschnürung einen Widerstand entgegensetzen. Betreibt man die Maschine, wie es bisher stillschweigend vorausgesetzt wurde und wie es in der Regel geschieht, derartig, dass die Stabverlängerung λ mit gleichförmiger Geschwindigkeit vor sich geht, so muss nach Ueberschreiten der Höchstlast die Kraft P abnehmen, wenn die Streckgeschwindigkeit gleich bleiben soll, und in diesen Zeitpunkt pflegt auch der Beginn jener Einschnürung zu fallen. Wegen der schnell wechselnden Kräfte und Querschnitte, deren gegenseitiges Verhältniss beim Versuch ausserordentlich schwer fortlaufend festzustellen ist, kann man sich kein ganz klares Bild von den Spannungszuständen während der Einschnürung verschaffen.

Barba (*L* 105, 118) hat durch folgende Betrachtung versucht, einen Einblick in die Vorgänge und in das Wesen der Einschnürung zu gewinnen. Er denkt sich, wie es in Absatz 101, S. 60 geschah, den Stab in einzelne Längsfasern zerlegt und schliesst, da die äusseren Fasern wegen ihrer Krümmung grössere Länge haben als die gerade gebliebene Mittelfaser, dass sie deswegen auch die grösste Spannung haben und daher eher zu Bruche gehen müssten. Nun sei es aber Thatsache, dass der Bruch immer von der Mittelfaser aus erfolge. Daher müssten in der Einschnürstelle die Aussenfasern auf die Mittelfaser einen Einfluss ausüben, der veranlasse, dass die Mittelfaser am stärksten gespannt sei. Er versucht dies wie folgt zu erklären.

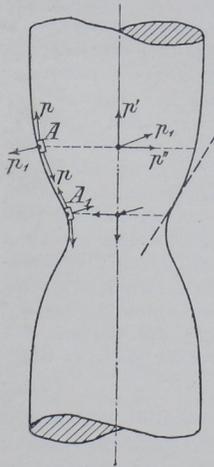


Fig. 66.

114. Irgend ein Element A (Fig. 66) der Aussenfaser im Meridianschnitt ist von zwei gleichen aber entgegengesetzten Kräften p beansprucht, die entsprechend der Faserkrümmung einen Winkel mit einander bilden. Damit Gleichgewicht bestehe, müssen die Nachbartheilchen eine Kraft p_1 auf das Element A ausüben, welche gleich der Resultante aus den Kräften p ist. Indem man diese Betrachtung nach einander auf alle Längsfasern desselben Schnittes anwendet, findet man, dass die Mittelfaser eine Summe von Reaktionskräften p_1 aufzunehmen hat, deren Komponenten p'' sich wegen der Symmetrie zur Stabaxe aufheben, während die Komponenten p' sich summieren und der als Folge der Zugbeanspruchung auftretenden Spannung σ entgegenwirken oder sich zu ihr addieren, je nach der Krümmungsform der Längsfasern in dem betrachteten Querschnitt.

Hieraus würde sich ergeben, dass im Beginn der Einschnürung die Mittelfaser die geringste Beanspruchung [kleiner als σ] erfährt, dass an der Stelle, wo die Fasern ihre Wendetangente haben, die Spannung der Mittelfaser gleich σ ist, und dass im mittleren Theil der Einschnürung, wegen der Umkehr der Richtung der Komponente p' , die Spannung der Mittelfaser grösser als σ wird, dass also der Bruch von der Mittelfaser aus erfolgen muss.

115. Die Thatsache dieser Erscheinung kann man an Stäben mit rechteckigem Querschnitt ganz leicht beobachten, wenn man die Bruchenden wieder an einander zu fügen versucht. Stark eingeschnürte Stäbe werden in der Mitte stets mehr oder weniger auseinander klaffen. [Unter Anderen bildete Gollner (Technische Blätter 1892) solche Stäbe ab.]

Howard fand (*L 125*) nach einem Bericht von Ledebur, dass bei Stäben mit grosser Querschnittsverminderung, welche in hoher Temperatur geprüft wurden, sich feststellen liess, dass der Bruch nicht plötzlich erfolgt war, sondern in der Mitte des Querschnittes begonnen und von hier aus bis zum Rande sich fortgesetzt hatte. Als man einen Versuch bei etwa 800 C^0 unterbrach, nachdem die Querschnittsverringerung 94% erreicht hatte, und dann den Rand wegfeilte, zeigte sich im Innern der zusammengeschnürten Stelle ein Hohlraum.

116. Ueber die Spannungsvertheilung kann man sich ebenfalls durch den Versuch einen Ueberblick verschaffen, wenn man den Stab, wie das von vielen Autoren ausgeführt worden ist, mit einem Liniennetz oder mit Kreisen versieht und deren Formänderung während des Versuches oder nach dem Bruch studirt. Man wird dann finden, dass die Linien ursprünglich gleichen Abstandes nach dem Bruch solche Formänderungen erfahren haben, dass neben der Bruchstelle (Fig. 67) der Abstand $a_1 a_1 < a' a_1$ [ohne die Rissbreite verstanden], während in den folgenden Stabtheilen umgekehrt $ab > a' b'$ ist, was also ganz unserer Ableitung entsprechen würde. Unter Anderem findet man derartige mit Netzen versehene Bruchstücke bei Barba (*L 118*, Taf. 6) abgebildet und in dem genannten Aufsatz eingehend erläutert.

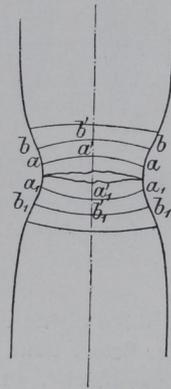


Fig. 67.

6. Bruchformen.

Zugversuch.

117. Von besonderer Wichtigkeit für die Beurtheilung der Güte und technischen Verwendungsfähigkeit eines Materials sind oft die Erscheinungen an den frischen Bruchflächen. Daher ist in die Aufzeichnungen über den Verlauf des Zerreißversuches regelmässig auch eine möglichst leicht verständliche Beschreibung der Bruchformen und Bruchflächen aufzunehmen. Wenn es auch nicht möglich ist, hier die typischen Formen für alle Materialien zu beschreiben, so muss doch auf die wichtigsten Erscheinungen bei den Metallen eingegangen werden, weil sie uns wieder einen Schritt weiter in der Erkennung der Spannungsvertheilung im Probestabe führen werden, und ganz besonders um die Nothwendigkeit und den Nutzen für eine einheitliche Bezeichnungsweise darzuthun.

Da ein Theil der Brucherscheinungen nicht als besondere Eigenthümlichkeit des Materiales an sich aufgefasst werden kann, vielmehr der Art und Weise, wie der Bruch erzeugt wurde, oder der zufälligen äusseren Form des Probestückes zugeschrieben werden muss, so soll an dieser Stelle besonders über den letzteren Theil gesprochen werden, während die durch besondere Materialeigenthümlichkeiten bedingten Bruchformen später zu behandeln sind.

118. Die grösste Einschnürung geben sehr zähe und weiche Materialien, wie Blei, Zinn, Pech, hellglühendes Eisen u. a., die geringste Einschnürung aber die spröden Körper, wie Glas, harter Stahl, Gusseisen, Steine u. a.

Bei sehr zähen Materialien ziehen sich die Rundstäbe vollkommen zu Spitzen aus, Flachstäbe erhalten schneidenförmige Querschnitte,

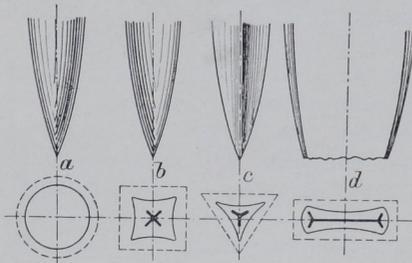


Fig. 68.

Stäbe mit dreieckigem oder quadratischem Querschnitt nehmen kreuzförmige Gestalt an, wie es in Fig. 68 in dicken schwarzen Strichen angedeutet wurde. Bei sehr spröden Körpern bemerkt man fast gar keine Aenderung der Querschnittsform; nur die Querschnittsgrösse ändert sich um ein Geringes.

Zwischen diesen beiden Endformen giebt es Uebergänge jeder Abstufung. Gewöhnlich zeigt der Bruch eines Rundstabes eine kreis-

förmige ebene Grundfläche, um welche Zacken stehen geblieben sind. Wenn der Bruch ganz vollkommen ausgebildet ist, so findet man, ausser der ebenen Grundfläche, an dem einen Bruchstücke einen rundherum laufenden hervorragenden Rand, an dem anderen einen Kegel (Fig. 69). Dieser Erscheinung entsprechen die Zacken (Fig. 70) des unvollkommenen Bruches. Sie be- weisen, dass die Trennung der Theile, wenn sie ganz vollkommen ausfällt,



Fig. 69.

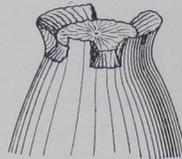


Fig. 70.

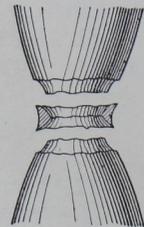


Fig. 71.

eigentlich drei Bruchstücke, nämlich zwei Kegel und einen Ring ergeben müsste (Fig. 71). Die Grundfläche hat nun, je nach den Materialeigenthümlichkeiten, einen kleineren oder grösseren Antheil an der Bruchfläche. Man findet zuweilen fast vollständige Trichter- und Kegelform (Fig. 72), zuweilen aber nur einen ganz schwachen (Fig. 73), oft kaum sichtbaren Rand an der ebenen Bruchfläche. Diese Erscheinung wird als Trichterbildung [wobei der Kegel als selbstverständlich zugehörig betrachtet wird] und als Rand-

bildung oder Bruchrand bezeichnet; man sagt auch wohl: Trichter mit ebenem Grund (Taf. 2, Fig. 9. 10), wenn die Trichterfläche den grösseren Antheil an der Bruchfläche hat, oder Bruchfläche eben, mit Rand, wenn die ebene Grundfläche vorherrscht. Rand zackig (Taf. 2, Fig. 18) schreibt man in beiden Fällen, wenn der Rand theils an dem einen, theils an dem anderen Bruchstück sitzt. Es kommt auch wohl vor, dass die eine

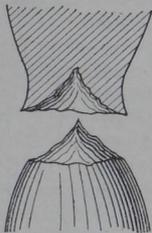


Fig. 72.

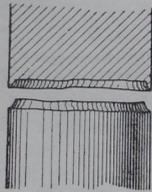


Fig. 73.

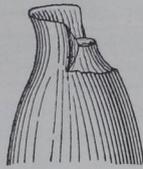


Fig. 74.

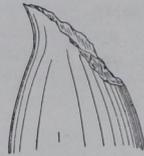


Fig. 75.

Hälfte des Randes an dem einen, die andere Hälfte an dem anderen Bruchstück sitzt (Fig. 74) und dass gleichzeitig die Grundfläche nur klein ausfällt. Dann ist der Charakter der Trichterbildung fast verschwunden und auf den ersten Blick oft kaum noch zu erkennen (Fig. 75).

119. Dies tritt namentlich bei Flachstäben leicht ein, bei denen übrigens die Trichterbildung (Taf. 2, Fig. 1—8) ebenso scharf ausgesprochen vorkommt, wie bei den Rundstäben, nur sind die Formen ein wenig anders (Fig. 76). Die ebenen, einwärts gekrümmten Langseiten und bei Ueber-



Fig. 76.

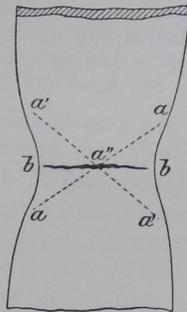


Fig. 77.

schreitung eines bestimmten Verhältnisses von Breite zur Stabdicke, auswärts gekrümmten Schmalseiten entsprechen den äusseren Umgrenzungen des Bruchquerschnittes und der in Fig. 68 d gegebenen Endform für weiche Körper.

Auf eine andere Eigenthümlichkeit der Einschnürung an Flachstäben muss übrigens noch aufmerksam gemacht werden. Bei stark einschnürendem Material bildet sich nämlich das sogenannte Einschnürungskreuz derart, dass die Dicke in den beiden punktirten Linien *aa* und *a'a'* (Fig. 77) am geringsten ist; sie ist also in den Punkten *a* kleiner als in den Punkten *b*.

Auch auf Flachstäbe wendet man die vorhin bereits benutzten Bezeichnungsweisen an. Sitzt die eine Hälfte des Randes am einen, und die

andere am andern Bruchstück (Fig. 76), so pflegt man zu sagen Bruch schief zur Axe [des Stabes], obwohl dies streng genommen nicht geschehen sollte, weil diese Bezeichnungsweise die Vorstellung erwecken kann, als ob hier eine besondere Erscheinung vorliegt, während man es mit einer ganz regelrechten Trichterbildung auch dann zu thun hat, wenn die ebene Grundfläche kaum noch zu erkennen ist.

a. In den vorausgehenden Absätzen 101 bis 104 und 106 bis 110 ist schon mehrfach darauf hingewiesen, dass die Spannungsvertheilung in einem auf Zerreißen beanspruchten Probestabe keine einfache sein kann. Dies erkennt man bei aufmerksamer Betrachtung leicht auch aus den gesetzmässigen Erscheinungen an den Brüchen und auf den Bruchflächen. Von den Köpfen ausgehend und mit ihrer Spitze gegen die Stabmitte gekehrt, geben, in einem Rundstabe aus durchweg gleichartigem Material, Kegel- oder Trichterflächen die Flächen grösster Schubspannung an. Diese Kegel liegen von den Köpfen ausgehend mit ihren Spitzen in den Stabaxen, sich gegenseitig durchdringend, wie es in Fig. 78 angedeutet ist.

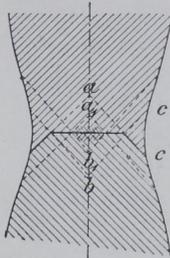


Fig. 78.

b. Kirsch unternahm es in den früher schon angeführten Aufsätzen (*L 108*. 1889. S. 11), diese Anschauungsweise und die Trichterbildung näher zu begründen. Er versucht die durch Beobachtung feststellbare Thatsache klar zu machen, dass der Bruch in der Einschnürung von der Axe aus beginnt und sich dann zunächst über eine Kreisfläche, der ebenen Grundfläche des Trichters, fortsetzt, um darauf, den Flächen gleicher [grösster] Schubspannung folgend, die Trichterflächen zu bilden; es wird also in dem mittleren ebenen Theil die Zugfestigkeit σ und in den Kegelflächen die Schubfestigkeit τ überwunden. In welchem gegenseitigen Maass-

stabe die eine oder die andere Erscheinung eintritt, ist von den Materialeigenschaften abhängig.

Zuweilen findet man in den Bruchflächen auch die Gegenkegel ganz deutlich ausgebildet, indem von der einen Seite aus der Hauptkegel sich bildet und von der anderen Seite her sich der Gegenkegel in die Spitze des ersteren einsenkt. Ein derartiger Bruch ist auf Taf. 2 Fig. 6 und 7 abgebildet.

120. Das Aussehen der regelrechten Bruchflächen ist aber, abgesehen von der Form, auch sonst noch ganz besonders kennzeichnend für die Art der Inanspruchnahme des Probstückes, und man kann sich deswegen die charakteristischen Formen nicht scharf genug einprägen, weil man, ganz abgesehen von den eigentlichen Materialprüfungen, aus dem Bruchaussehen zerbrochener Maschinentheile häufig auf die Bruchursachen schliessen muss. Aber man sollte auch aus anderem Grunde keine Gelegenheit versäumen, die hier behandelten und namentlich die weiterhin noch zu besprechenden Erscheinungen, auf Grund von Musterstücken zu studiren, denn sie lassen sich durch Beschreibung und Zeichnung nicht vollkommen darstellen. Wo Gelegenheit zur Ausführung vieler Versuche gegeben ist, sollte man nach bestimmten Gesichtspunkten geordnete Sammlungen von allen Arten der Brucherscheinungen anlegen. Dies dürfte um so nöthiger sein, als in der Praxis recht häufig Brucherscheinungen dem Material als Ungleichartigkeit oder Ungängen zur Last gelegt werden, die durchaus nothwendige Folgen des Prüfungsvorganges, beziehentlich der Inanspruchnahme während desselben, sind und keineswegs als Fehler des Materiales gelten können.

Auf Grund solcher Sammlungen lassen sich dann leicht bestimmte einheitliche Ausdrucksweisen für die Bruchbeschreibung aufstellen, und es empfiehlt sich sehr, auch hier eine gewisse Einheitlichkeit anzustreben, da

man alsdann kürzer und allgemeinverständlicher sein kann. Eine gute und wirklich werthvolle Bruchbeschreibung zu geben, ist keineswegs leicht, und deswegen wurde beispielsweise für die Charlottenburger Versuchsanstalt nicht nur eine wohl geordnete Sammlung von Bruchstücken angelegt, sondern es wurden mit Rücksicht auf das häufig wechselnde Personal auch besondere Regeln für die Bruchbeschreibung aufgestellt (L 122, S. 22 und Vorbemerkungen zu den Tabellen). Hiernach ist die Reihenfolge: Farbe, Korn, Glanz, Gefüge, Bruchform, Fehler innezuhalten und als Hauptausdrucksweisen sind die im vorausgehenden und in den folgenden Absätzen gesperrt gedruckten Bezeichnungen gebräuchlich.

121. Der Grund der Bruchfläche [bei Metallen] kann mehr oder weniger eben sein. Ist er uneben, so pflegt er zugleich ein mattes Aussehen zu haben. Dieses ist, abgesehen von etwaigen besonderen Materialeigenschaften, meistens dadurch entstanden, dass sich in der Fläche äusserst zahlreiche kleine Trichter (Fig. 79) bildeten. Hat das Material an sich krystallinisches Gefüge, wie z. B. Stahl, Flusseisen u. a. m., so erscheint der Grund krystallinisch, und zwar in der Regel in der Mitte matter als nach dem Rande zu, wo sich häufig auch bei sonst matter Fläche [bei Flusseisen u. s. w.] glänzende Punkte finden. Der dunklere Kern in der Mitte ist oft ziemlich scharf abgegrenzt. Man bezeichnet diese Erscheinungen in den Bruchbeschreibungen zweckmässig mit: Grundfläche matt, oder

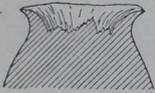


Fig. 79.

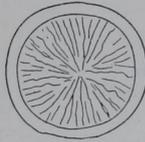


Fig. 80.

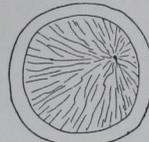


Fig. 81.

krystallinisch-glänzend, mit mattem oder dunklerem Kern u. s. w. Taf. 2, Fig. 11, 12, 15—17 zeigen derartige Brüche.

122. Die Trichterflächen [Randflächen] haben immer eine mehr oder minder rauhe, zackige, stets etwas glänzende Fläche; ein Aussehen, wie es später als den beim Scheerversuch gewonnenen Bruchflächen eigenthümlich erkannt werden wird.

Sehr häufig bemerkt man auf der Grundfläche feinere oder gröbere, meist radiale Strahlen (Fig. 80), die ebenfalls eine Folge der Vorgänge beim Zerreißversuch sind, und deren Ursache erst später erklärt werden kann; hier sei nur auf Folgendes aufmerksam gemacht. Die Strahlen laufen nicht immer in der Mitte der Fläche zusammen; sie strahlen zuweilen auch von einem seitlich gelegenen Punkte aus, Fig. 81 (Taf. 2, Fig. 14). In diesem Falle wird man bei aufmerksamer Untersuchung des Bruchstückes in dem Strahlungspunkte fast immer eine Fehlstelle im Materiale entdecken, die die Ursache für das Eintreten des Bruches im gegebenen Stabquerschnitte war. Die Strahlung geht immer von der Stelle aus, in welcher der Bruch zuerst eintrat. In der Charlottenburger Anstalt wurden aus diesem Grunde die Erscheinungen Bruchlinien (Taf. 2, Fig. 11, 14, 16, 18 u. 19) benannt.

Eine andere Erscheinung, deren Ursache noch nicht genau erkannt ist, stellt sich, wie in Fig. 82 gezeichnet, als ebenfalls radial verlaufende

Erhöhungen dar, von denen die eine Fläche in der Regel senkrecht, die andere geneigt zur Grundfläche steht (Taf. 2, Fig. 13). Diese Strahlen pflegte man bisher als grobe Bruchlinien zu bezeichnen.

a. Diese zuletzt genannten Vorkommnisse, die besonders stark ausgeprägten Kernbildungen und andere Erscheinungen, pflegt man in der Praxis häufig als Materialfehler zu betrachten. Man muss hiermit indessen vorsichtig zu Werke gehen; sie sind meistens Eigenthümlichkeiten, die durch den regelmässigen Gefügebau bedingt sind. Das wird man leicht erkennen, wenn man an der Hand einer nach den Brucherscheinungen geordneten Sammlung sich unterrichtet. Hierbei wird sich ergeben, dass die Bruchlinien und Kernbildungen sich z. B. in einem Rundstabe genau ebenso symmetrisch zur Stabmittellinie entwickeln, wenn man die Probe aus dem Rande eines grossen Körpers herausschneidet, als wenn man sie aus einem Rundstabe entnimmt, der aus einem grossen ausgewalzten Block entstammt. Im letzteren Falle könnte man sich ja denken, dass namentlich die groben Bruchlinien (Fig. 82) nichts weiter seien, als die Ueberbleibsel der Blasenzone im Blockquerschnitt. Denn wenn ein solcher mit einem Ring von Blasen behafteter Stahlblock (Querschnitt Fig. 83) zum Rundstabe ausgewalzt wird,



Fig. 82.

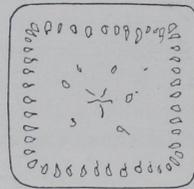


Fig. 83.

so werden hierbei die Blasen nach der Walzrichtung gestreckt, ihre Wandungen flach gedrückt, und diese flachgedrückten Wandungen können sich im radialen Sinne symmetrisch zur Stabaxe einstellen. Beim Bruch solcher blasiger Stäbe erhält man dann auch scharf begrenzte, senkrecht zur Bruchebene stehende (Spalt-) Flächen. Es fehlen dann aber meistens die daran anstossenden schrägen Flächen. In der Regel wird man die durch die Blasen erzeugten Linien und Flächen von dem, was oben als grobe Bruchlinien bezeichnet wurde, leicht unterscheiden können.

b. Kirsch (*L 108*. 1889 S. 15) glaubt die groben Bruchlinien wie folgt erklären zu können, er sagt:

„Ist das Material sehr gleichmässig, wie ausgeglühtes Flusseisen oder Kupfer, so können sich die elementaren Trichter [K. nimmt an, dass die ebene Grundfläche des Bruches unter Umständen aus lauter neben einander liegenden elementaren Trichtern gebildet ist (*121*)] in sehr verschiedener Weise zu ganzen schrägen Trennungsfächen gruppieren. Es giebt neben dem Flächenelement einer Trichterfläche in jedem Punkt derselben noch zwei Flächenelemente, welche die gleiche Schubspannung haben und sowohl zu einander, als auch zu dem Trichterelement senkrecht stehen; die Gesammtheit dieser Flächenelemente bildet zwei Schaaeren von Schraubenregelflächen, die dem Stabe coaxial sind und die Staboberfläche in Schraubenlinien schneiden. Diese Schraubenlinien kommen bei Festigkeitsversuchen vielfach zum Ausdruck. In Taf. 2 Fig. 24 ist das Bruchende eines Kupferstabes abgebildet, welches deutlich neben der auf der einen Seite der Bruchstelle zum Ausdruck gekommenen Doppeltrichterbildung zwei solche schraubige Flächen, sogar ein bedeutendes Stück in den Stab hinein fortgesetzt, als Trennungsfächen besitzt.¹⁾ Die in Taf. 2 Fig. 13 abgebildete Bruchfläche von Flusseisen zeigt diese Schraubenflächen an ihren Ausmündungen und in ihrer radialen Anordnung gleichfalls sehr deutlich;²⁾ solche Brüche zeigen regelmässig auch noch Trennungsebenen, welche durch die Stabmittellinie radial verlaufen.“

¹⁾ Die eine Linie zog ich mit der Reissnadel, soweit als sie deutlich erkennbar war, etwas nach, weil sonst nicht beide Risse zu gleicher Zeit sich photographiren liessen.

²⁾ Kirsch meint die schrägen („schraubigen Flächen“), die weiter oben Fig. 82 als grobe Bruchlinien bezeichnet wurden.

123. Abgesehen von den besprochenen Erscheinungen, die gleich nach Ueberschreiten der Fliessgrenze an der Oberfläche von Metallstäben gleichmässigen Gefüges auftreten und abgesehen von der Krispelung, Runzelung, Knitterung u. s. w. (106) kommen häufig, z. B. bei Stahl, Eisen u. a., ganz regelmässig in Reihen angeordnete Querrisse vor, deren Auftreten wieder einen Beleg für die vorhin entwickelten Anschauungen über Kegel- und Trichterbildungen geben und deswegen hier kurz angeführt seien. Diese Erscheinungen, in Charlottenburg Längsnähte genannt, sind in Fig. 84 (und Taf. 1, Fig. 2, 4 u. 8) dargestellt. In meinem Bericht über Versuche mit Eisenbahnmaterialien (*L 122*, S. 23 u. f.) sagte ich hierüber:

124. „Wenn in einem Stahlblock eine harte Stelle, hartes Korn, Härteknoten u. s. w. vorhanden ist, so wird sie beim Walzen in die Länge gestreckt und eine zur Schienenachse gleichlaufende Faser bilden. Sind die Härteunterschiede gross, so wird die Schiene schon beim Walzen unganze Stellen erhalten, sind sie hingegen gering, so wird man diese harten Adern in der Regel kaum bemerken, auch nicht auf den Schnittflächen

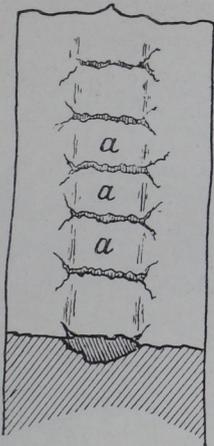


Fig. 84.

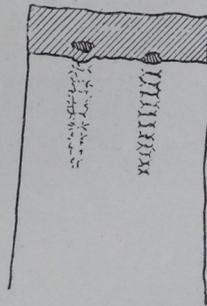


Fig. 84a.

der Schienen. Beim ZerreiBversuch treten sie aber unverkennbar auch dann hervor, wenn sie noch mehrere Millimeter unter der Staboberfläche liegen. Während des Fliessens sieht man die Härteadern oder das Material über denselben anquellen. Die Ader tritt, wenn auch nur äusserst wenig, aus der Oberfläche heraus [vergl. Querschnitt in Fig. 84]. Dies ist eine nothwendige Folge der grösseren Härte, welche veranlasst, dass das Material der Adern schwerer fliesst als die weiche Hauptmasse; die Querschnittsverminderung der harten Theile ist eine geringere als diejenige der weichen; das harte Material hat eine geringere Dehnbarkeit als das weiche. Die Folge dieser Eigenschaften ist eine ungleichmässige Spannungsvertheilung. Das harte Material ist hierbei stärker beansprucht als das weiche, weil es den Massenbewegungen des weichen Theiles nicht folgen kann.“ In der Ader treten alsdann Querrisse ein, die in ganz bestimmten Abständen auf einander folgen müssen, deren Grösse durch die Festigkeitsverhältnisse der harten Adern zum weichen Material und durch die Grösse der Reibung in der Berührungsfäche zwischen den beiden Materialien gegeben ist, wie es Kirsch in seiner Besprechung dieser Erscheinungen (*L 108*,

1888, S. 44 u. 45) folgendermaassen entwickelte: „Aber auch das weiche Material wird in dem Augenblick des Entstehens dieser Risse durch die nunmehr schnell eintretende Bewegung örtlich überanstrengt; es bilden sich kurze Trennungsfugen nach den Kegelflächen gleicher Schubspannung. Da diese Kegel die Staboberfläche in regelmässiger Aufeinanderfolge durchkreuzen, so gewinnt das Oberflächenaussehen den in Fig. 84 gezeichneten Ausdruck. Das Auftreten der Querrisse hört man oft beim ZerreiBversuch als knisternendes oder klingendes Geräusch auch dann, wenn die Risse äusserlich nicht bemerkbar sind.“

Dass die Längsnähte und damit die Härteadern nicht immer unbedingt gefährliche Stellen des Materiales bilden, führte ich im weiteren Verlauf meiner oben wiedergegebenen Auslassungen an (L 122 S. 26). An anderer Stelle behandelte ich aber einen Fall, der recht deutlich auch den verderblichen Einfluss feiner Querrisse im Material zeigte (L 126 S. 60 u. f.), indem ein Gussstahlraht im Inneren zahllose Höhlungen in regelmässigen Abständen von einander aufwies.

Druckversuch.

125. Wenn ein Cylinder aus sprödem Material, z. B. Marmor oder Gusseisen, durch Zerdrücken zum Bruch gebracht wird, so erhält man in der Regel die in Fig. 85 dargestellte Bruchform.

An den Druckflächen D bildet sich der Druckkegel, der in den Bruchstücken sehr deutlich erkannt werden kann, wenn es gelingt, die Stücke vor der Zertrümmerung durch die Schlagwirkung zu schützen, die beim plötzlichen Bruch in Folge der Auslösung der elastischen Spannungen in den Gliedern der Probirmaschine entsteht. Aehnlich wie beim ZerreiB-

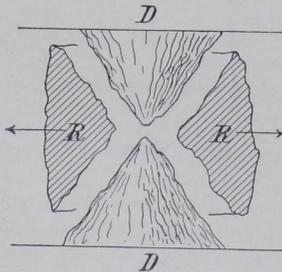


Fig. 85.

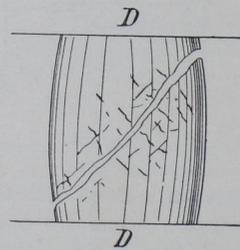


Fig. 86.

versuch bilden sich bei diesen spröden Körpern beim Druckversuch zwei Kegel und ein Ring R , der aber selten in grösseren Stücken zusammenhängend bleibt; beim ZerreiBversuch haftet er ganz oder zum Theil an der einen Probenhälfte, beim Druckversuch wird er mehr oder weniger zertrümmert und fortgeschleudert.

126. Zuweilen, namentlich wenn die Spannköpfe der Maschine sich ein wenig seitlich verschieben können, schieben sich auch beim Druckversuch die beiden Probenhälften von einander ab und bilden, wieder ähnlich wie beim ZerreiBversuch, einen Bruch schief zur Achse (Fig. 86). Häufig findet man, namentlich in letzterem Falle, auch Risse in der Mantelfläche des Cylinders, die, mehr oder minder regelmässig, sich unter Winkeln von etwa 90° [45° zur Mittellinie des Körpers] schneiden.

127. Bei würfelförmigen Körpern aus sprödem Material, z. B. Gesteinen und Zement, gehen die Druckkegel in die Druckpyramiden über, und auch die Ringstücke sind entsprechend geformt.

Man erkennt also, dass das in Folge der Reibung in den Druckflächen an der Querausdehnung verhinderte Material über diesen Druckflächen sich staut und, indem es den Druckkegel bildet, den Mantelring zersprengt.

Der Ring wird bei diesem Vorgange mehr oder weniger ausgesprochen auch auf seine Zugfestigkeit beansprucht, derart, dass in irgend einem Körperelement A (Fig. 87) des Mantels die Druckspannungen $-\sigma$ wegen der gewölbten Form die Zugspannungen $+\sigma$ erzeugen. Die Zug- und Druckspannungen rufen nun Diagonallrisse hervor, sobald die Komponenten τ der Kräfte $+\sigma$ und $-\sigma$ so gross werden, dass sie die Schubfestigkeit des Materiales überwinden; nach der Richtung senkrecht zum gezeichneten Riss tritt die gleiche Komponente τ auf, daher entstehen die unter 90° sich kreuzenden Risse. Ist die Zugfestigkeit des Materiales in der Richtung des Probenumfanges gering, z. B. bei sehnigem Schweisseisen, so bringen die Zugspannungen $+\sigma$ Mantelrisse parallel zur Probenachse hervor.

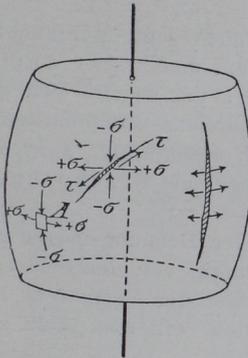


Fig. 87.

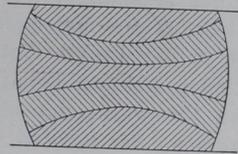


Fig. 88.

128. Dass aber auch bei bildsamen Materialien der Stoff über der Druckfläche nahezu in Ruhe bleibt, kann man nachweisen, wenn man mehrere Platten aus weichem Material, z. B. Blei oder verschieden gefärbte Schichten gleichen Materiales, z. B. Thon, zu einem Druckprobekörper zusammenschichtet. Man findet dann beim Zerschneiden nach dem Versuch die beiden äussersten Schichten plankonvex und die mittelste bikonkav (Fig. 88), und erkennt in den einzelnen Schichten, in welcher Weise das Material aus der Mitte heraus nach aussen gedrängt wurde. Die Rauminhalte der Scheiben sind vor und nach dem Versuch die gleichen geblieben, sobald ein Material vom Dichtigkeitsgrad 1 verwendet wurde.

7. Bestimmung der Dehnbarkeit.

a. Art der Messung.

129. Abgesehen von den Fehlern der Messinstrumente können die Umstände, unter denen die Messungen der Formänderungen ausgeführt werden, von Einfluss auf das Messungsergebniss sein. Hier soll besonders untersucht werden, welchen Einfluss diese Umstände auf die Bestimmung der für die Praxis als Gütemaassstab für viele Materialien wichtigen blei-

benden Formänderungen nach dem Bruch haben. Diese Besprechungen beziehen sich, wie hier vorausgeschickt sein mag, ausschliesslich auf den Zugversuch und im Wesentlichen auf weiche und verhältnissmässig dehbare Metalle, die mit mehr oder weniger deutlicher Einschnürung reissen. Für den Druckversuch hat die bleibende Verkürzung nach dem Bruch nur untergeordneten praktischen Werth, weil sie bisher selten als Gütemaassstab für die Beurtheilung der Materialien benutzt worden ist.

130. Wie in einem späteren Abschnitt (β) zu zeigen ist, ist die ursprüngliche Länge l , die Messlänge, an welcher die Bruchdehnung [die bleibende Dehnung nach dem Bruche] gemessen wird, von Einfluss auf das Ergebniss dieser Messung. Deswegen ist man durch stillschweigende oder ausgesprochene Uebereinkunft bald dazu übergegangen, für die Messlänge l bestimmte Grössen anzuwenden. In den meisten Industriestaaten ist heute die Messlänge $l = 20$ oder 10 cm gebräuchlich, entsprechend 8 oder 4 Zoll englisch; am meisten verbreitet dürfte 20 cm und 8 Zoll englisch sein. Der prismatische Theil des Stabes, die sogenannte Gebrauchslänge l_g , pflegt etwas grösser zu sein.

131. In der Praxis ist es vielfach noch jetzt gebräuchlich, die Dehnungen nach dem Bruche zu messen, indem man unter Aneinanderfügen der beiden Bruchstücke feststellt, um wieviel sich die durch zwei eingeschlagene Körnerpunkte oder eingerissene Strichmarken bezeichnete Messlänge l verlängert hat. Diese Verlängerung, ausgedrückt in Procenten der Messlänge, wurde früher (34. 47) als Bruchdehnung oder Dehnbarkeit δ des Materiales bezeichnet.

Diese in der Praxis viel benutzte Art der Dehnungsmessung ist aber mit merklichen Fehlern behaftet, die unabhängig von den Fehlern der angewendeten Messwerkzeuge sind und als Fehler des Verfahrens bezeichnet werden müssen. Sie müssen vermieden werden, will man nicht sich selbst oder Anderen Unrecht thun.

In Absatz 115 wurde schon hervorgehoben, dass Flachstäbe in ihren Bruchflächen nicht vollkommen mehr in einander passen, sondern in der Mitte merklich klaffen können, besonders bei weichen Metallen; auch Rundstäbe kann man nicht mehr genau zusammenschieben. Man erhält also bei dieser Art zu messen stets zu grosse Dehnungswerthe.

132. Um den Fehler zu verringern, hat man vorgeschlagen, die beiden Körner [oder Strichmarken] auf einem Längsriss aufzuschlagen und dann nach dem Bruch auf diesem Riss von einem Körner bis zum Bruchrand, vom anderen Bruchrand bis zum zweiten Körner zu messen und aus der Summe die Dehnung δ zu berechnen.

Hierdurch wäre allerdings der vorgenannte Fehler vermieden, aber die von der Praxis immer noch gebrauchte Messmethode führt auch noch zu anderen Fehlern, die, namentlich bei weichen Metallen, z. B. Flusseisen und Kupfer, wesentlich grösser sind und stets einseitig zu Ungunsten des Lieferanten ausfallen müssen, weil sie die Dehnbarkeit immer zu klein erscheinen lassen.

133. Bereits in den Absätzen 100 u. 113, bei der Besprechung des Einflusses der Einspannköpfe und der Einschnürung, wurde die Ueberzeugung gewonnen, dass die Dehnungen in den einzelnen Stabtheilen je nach ihrer Entfernung von der Bruchstelle ganz er-

heblich verschieden sind. Aus diesem Umstande kann die Unzulänglichkeit des praktischen Messverfahrens leicht abgeleitet werden.

Um hierüber einen klaren Ueberblick zu geben, sei aus meinem Bericht über Kupferuntersuchungen die Fig. 89 mitgetheilt (*L 110*, Taf. III, Fig. 36). Hier ist eine Reihe von Dehnungsschaubildern aufgetragen, welche die Dehnungen aller einzelnen Theile von Probestäben gleicher Querschnittsform [Rechteck $f = 1,0 \times 3,0 = 3 \text{ qcm}$] darstellen. Um diese Ergebnisse zu erzielen, wurden die Probestäbe vor dem Versuch, wie dies in allen öffentlichen Prüfungsanstalten geschieht, auf der ganzen Länge in gleiche Abschnitte eingetheilt. An dieser Theilung wurden nach dem Bruch alle Verlängerungen der einzelnen Abschnitte gemessen und in

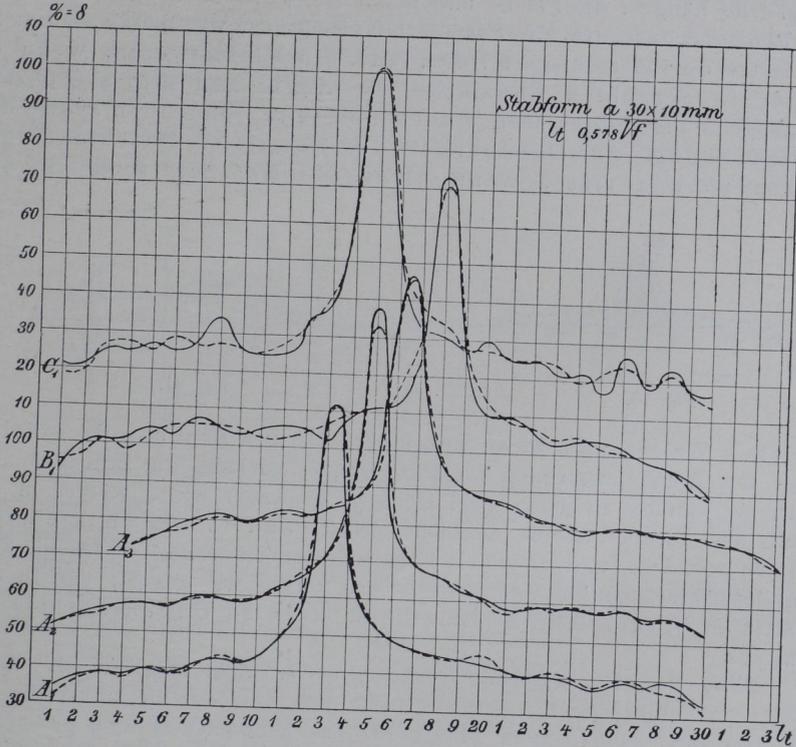


Fig. 89.

Procenten der ursprünglichen Länge angegeben. Aus den so gewonnenen Zahlen ist Fig. 89 entworfen. Die Linien gelten aber, wie nicht vergessen werden darf, für Versuchsstäbe von verhältnissmässig kurzer Länge; sie enthalten also den Einfluss der Stabköpfe (*104*, Fig. 61).

134. Stellt man sich dagegen das Dehnungsschaubild für einen Stab von sehr grosser Länge vor, so nehmen die Linien die in Fig. 90 gegebene allgemeine Form an, und an der Hand dieser Zeichnung kann man sich überzeugend klar machen, welchen Einfluss die Lage der Bruchstelle gegenüber den Endpunkten der Theilung auf die Messung der Dehnbarkeit des Stabes haben muss. In Fig. 90 sei aa_1 die ursprüngliche Länge, die Messlänge l [z. B. = 20 cm], auf welche die Bruchdehnung δ

bezogen wird. Offenbar ist die Dehnbarkeit dieses Theiles gleich der mittleren Dehnbarkeit aller eingeschlossenen Stabtheile und deswegen durch die Grösse der Schaubildfläche über der Strecke $a a_1$ gemessen, deren mittlere Ordinatenlänge $= \delta$ ist. Wäre nun aber der Bruch nicht in der Mitte, sondern nahe dem einen Ende der Messlänge erfolgt, so dass die Lage der Endmarken von l in die Punkte b und b_1 fällt, so würde nunmehr das Maass für die Dehnbarkeit durch den schraffirten Flächentheil über $b b_1$ gegeben sein, und von diesem kann ohne weiteres ausgesagt werden, dass er kleiner sein muss als die Fläche über $a a_1$, denn die hinzukommende schraffierte Fläche über ab muss kleiner sein als die ausfallende unschraffierte über $a_1 b_1$. Man kann auch ohne weiteres einsehen, dass für die gleiche Länge l die Fläche und damit die gemessene Dehnbarkeit des Probestabes, ein Höchstwerth sein muss, wenn der Bruch in der Mitte der Messlänge l liegt, und ein Kleinstwerth, wenn er gerade in der einen Endmarke $a a_1$ liegt. Man sieht also hieraus überzeugend klar, dass selbst bei einem und demselben Stabe die Bruchdehnung oder Dehnbarkeit des Materiales verschieden gefunden werden muss, wenn nicht die Messung stets in der

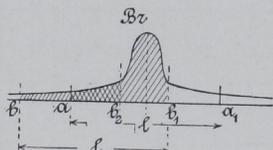


Fig. 90.

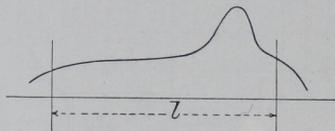


Fig. 91.

gleichen Weise, und zwar symmetrisch zur Bruchstelle erfolgt. Liegt der Bruch ausserhalb der Mitte von l , so kann die Bruchdehnung, wenn sie einfach zwischen zwei Körnern gemessen wird, wie es in der Praxis ausserordentlich oft geschieht, nicht anders als zu klein gefunden werden, und da die Dehnbarkeit als Gütemaassstab für die Konstruktionsmaterialien im Gebrauch ist, so wirkt, wie gesagt, die in der Praxis gebräuchliche Messmethode stets zu Ungunsten des Erzeugers.

135. Man hat natürlich gesucht, ob es nicht möglich sei, diesen offensbaren Fehler der Messmethode auszuschliessen oder ihn zu vermindern, und dies kann nach dem in Absatz 137 entwickelten Verfahren geschehen.

Wenn man die in Fig. 89 gegebenen Linienzüge betrachtet, die, wie schon gesagt, an Stäben von beschränkter Länge gewonnen sind, so bemerkt man, dass, abgesehen von kleinen örtlichen Abweichungen, die Linienzüge zu beiden Seiten der Bruchstelle nahezu gleichen Verlauf haben. Dies beweist, dass man in der That die Formänderungen zu beiden Enden der Bruchstelle symmetrisch annehmen darf, was ja bei einem ganz gleichmässigen Material an sich wahrscheinlich ist und auch früher schon mehrfach stillschweigend vorausgesetzt wurde. Wesentliche Abweichungen von dieser Regel bemerkt man, ausser unter den oben angedeuteten zufälligen und durch Ungleichmässigkeiten im Material bedingten Umständen, nur bei solchen Linienzügen, die Stäben entsprechen, welche ganz nahe an der einen Endmarke, also auch nahe dem Stabkopfe zu Bruche gingen (Fig. 91).

Man kann aber bei allen Linien, die aus Versuchsergebnissen abgeleitet sind, den früher (100) besprochenen Einfluss der Einspannköpfe deutlich erkennen, wenn man sich die stark ausgezogene Linie Fig. 92 als diejenige Linie denkt, welche die Dehnbarkeit bis zum Beginn der Einschnürung vorstellt; sie entspricht ganz der früher (Fig. 51) S. 61 über den Einfluss der Spannköpfe entworfenen Schaulinie. Die der Einschnürung entsprechende punktirte Linie schmiegt sich der stark ausgezogenen unmittelbar an, sobald der Bruch in der Mitte erfolgt (a , Fig. 92); die Linie ist dann in der That symmetrisch zur Bruchstelle. Sobald aber der Bruch nahe beim Kopf erfolgt (a_1), ist die Symmetrie zu beiden Seiten des Bruches nicht mehr streng erfüllt, weil die Wirkung des Kopfes auf die Einschnürungsform am kurzen Bruchende grösser ist als am langen Bruchstück, wo sie ja ganz aufhören muss, da das Material zwischen Einschnürstelle und Kopf dort nach Beginn der Einschnürung gar nicht mehr an der Verlängerung theilnimmt. Die Form dieser Seite der Einschnürung muss sich daher fast genau so ausbilden, als wäre sie an einem Stabe von grosser Länge entstanden. Kurz, die Form kann nicht mehr symmetrisch zur Bruchstelle sein, sobald der Bruch nahe dem einen Stabende erfolgt,

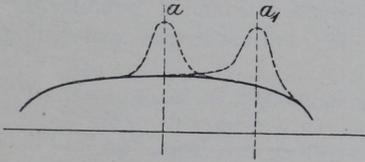


Fig. 92.

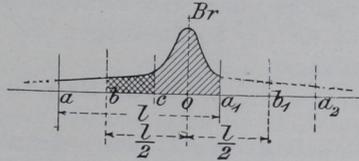


Fig. 93.

wie dies in Fig. 92 bei a_1 angedeutet ist. Diese Abweichungen von der Symmetrie sind aber in der Regel nicht gross und können praktisch vernachlässigt werden.

136. Macht man also die praktisch zulässige Annahme, dass die Formänderungen symmetrisch zur Bruchstelle verlaufen, so giebt es ein Messverfahren, das unter allen Verhältnissen die Dehnbarkeit des Materiales, abgesehen von den jedenfalls geringfügigen Fehlern der Annahme, in richtigen Zahlen ergiebt. Denkt man sich die Dehnungsschaulinien eines mit Centimetertheilung versehenen Stabes, der nahe dem Endpunkte a_1 (Fig. 93) der Messlänge l zu Bruche ging, so kann man das Schaubild durch die punktirte Linie $a_1 a_2$ erweitern denken. Dann würde der Flächeninhalt über $l = b b_1$ ein Maass für die wahre Dehnbarkeit des Materiales sein. Dieses kann man aber offenbar auch am unsymmetrisch gerissenen Stabe ermitteln, indem man den fehlenden Theil dieser Fläche, nämlich den über $a_1 b_1$ liegenden, durch Ausmessung des entsprechenden Theils über $b c$ am anderen Bruchende ergänzt. Das Maass für die wahre Dehnbarkeit ist also auch gegeben durch die Grösse der Fläche über $b a_1$ + der Fläche über $b c$.

137. Um diesen Vorgang praktisch ausführen zu können, versehen die öffentlichen Prüfungsanstalten und wissenschaftlichen Versuchsstellen die von ihnen zu zerreisenden Stäbe mit einer Theilung [zur Zeit

meistens Centimetertheilung], die entweder mit dem Doppelkürner Fig. 94 aufgekörnt, mit der Theilmaschine eingerissen, oder mit einer besonders hierfür geeigneten Lehre Fig. 95 übertragen wird. Erfolgt nun der Bruch in irgend einer Stelle dieser Theilung, so kann man durch Auszählen der Theilungsmarken immer diejenigen Punkte festlegen, die ursprünglich in gleicher Entfernung von der Bruchstelle sich befanden, und kann nun leicht unter Anwendung des vorbeschriebenen Verfahrens die Dehnung des am kurzen Bruchstücke fehlenden Theiles durch Ausmessen des entsprechenden Theiles am langen Bruchende ergänzen. Ist beispielsweise, wie



Fig. 94.

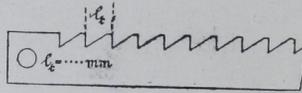


Fig. 95.

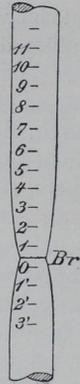


Fig. 96.

in Fig. 96, der Stab zwischen den Theilstrichen 0 und 1 gebrochen, so giebt für $l = 20$ Theilungen die Summe der Ausmessungen zwischen den Theilungen

$$(0 \text{ bis } 10 + 0 \text{ bis } 3' + 3 \text{ bis } 10) - l$$

die Verlängerung λ , aus welcher $\delta = \frac{\lambda}{l} \cdot 100$ zu errechnen ist.

a. Auf den „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren für die Untersuchung von Bau- und Konstruktionsmaterialien“ (L 128) hat man sich wiederholt mit der Bestimmung der Bruchdehnung beschäftigt und das soeben entwickelte Messverfahren empfohlen. Bei dieser Gelegenheit wurden auch einige andere Formen von Anreissmaassstäben vorgeschlagen, z. B. von Prof. Belebubski. Die Versuchsanstalt in Charlottenburg benutzt einfache Stäbe, wie sie in Fig. 95 dargestellt wurden, nur wird auf die eine Flachseite noch eine schmale Schiene geschraubt, wie im Querschnitt Fig. 97 gezeigt. Diese Schiene sichert die gute Anlage beim Anreissen eines Rundstabes; zum Anreissen des Flachstabes wird die andere Seite benutzt. Das Anreissen wird mit einer flachen messerförmig ge-

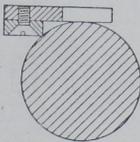


Fig. 97.

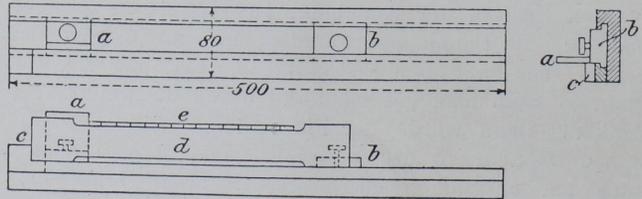


Fig. 98.

schliffenen Nadel so besorgt, dass die Nadelfläche sich satt an die Anreissflächen oder an die unteren Kanten des Maassstabes anlegt. Auf diese Weise vermeidet man am besten die Fehler, die aus unsicherer Nadelführung entstehen.

b. Flachstäbe werden an beiden Schmalseiten mit Theilungen versehen. In Charlottenburg benutzt man die in Fig. 98 dargestellte Einrichtung, um beide Theilungen genau in der gleichen Querschnittsebene beginnen zu lassen. Sie besteht aus einer Holzunterlage, auf welcher Anschläge a und c die gegenseitige

Lage vom Stab *d* und Anreissstab *e* sichern, und Anschlag *b* die Lage des Stabes *a* bestimmt. Die Anschläge *a* und *b* können den verschiedenen Stababmessungen entsprechend in Schwabenschwänzen verschoben werden.

c. Um über die bei solchem Verfahren sich einstellenden Fehler einen Ueberblick zu gewinnen, liess ich einen solchen Anreissmaassstab *A*, der zur Anbringung einer Theilung von der Theilungsgrösse $l = 7 \text{ mm}$ angefertigt war, zuerst auf der Theilmaschine mit dem Normalmaassstab der Versuchsanstalt vergleichen, dann mit dem Maassstabe eine Theilung *B* auftragen und diese wieder mit dem Normalmaassstab vergleichen. [Dieser Versuch übt die Studenten in der Ausführung von mikrometrischen Messungen und führt sie zur Beachtung der Fehlerquellen beim Gebrauch der Instrumente und Maassstäbe.] Die Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 10 S. 90 u. 91 mitgetheilt.

Wie man aus den Fehlerreihen *A* und *B* ersieht, sind die Abweichungen gegen den Normalmaassstab fast alle positiv und nahezu gleich gross. Ein fortschreitender Fehler [die Theilung des Anreissstabes war von einer Schraube kopirt] war also nicht vorhanden. Da auch die Ablesung für den Nullstrich als mit Beobachtungsfehlern behaftet angesehen werden muss, d. h. der Ablesung und dem Unterschiede Null kein grösseres Gewicht beizulegen ist, als allen anderen Zahlen, so erhält man die eigentlichen Fehler der Theilung *B*, indem man den mittleren Fehler von *B* (+10,2) von allen Einzelfehlern von *B* abzieht, also gewissermassen die hergestellte Theilung gegen den Normalmaassstab so verschiebt, dass alle Theilstriche sich mit der Solltheilung so vollkommen wie möglich decken. Die dann noch bestehen bleibenden Fehler der Theilung [unterste Reihe der Tabelle] erscheinen nunmehr positiv und negativ und haben Grösstwerthe, die 0,1 mm nicht überschreiten. Der Fehler bleibt fast immer erheblich unter diesem Werthe.

d. Die Ausmessungen am Probestab erfolgen aber in der Regel entweder mit dem Anlegemaassstab oder mit dem Zirkel und sind, den Verhältnissen entsprechend, selten genauer als bis auf 0,2 mm zu machen. Das in Vorschlag gebrachte und auch vielfach im Gebrauch befindliche Verfahren des Anreissens am Anreissmaassstab ist also mit praktisch ausreichender Genauigkeit ausführbar, wenn die Anreissstäbe genau genug gearbeitet sind.

e. Die oben genannten Konferenzen haben sich aber auch anderweitig mit der Frage der Dehnungsmessung beschäftigt. Es ist bekannt und eine im Absatz 115 S. 75 schon besprochene Thatsache, dass der Stab von der Mitte beginnend reisst, und dass bei Flachstäben in der Nähe des Bruches die Dehnung auf den schmalen Seiten des Stabes grösser ist als in der Mitte der Breitseiten. Diesem Umstande entsprechend wurde gemäss dem Vorschlage v. Tetmajers auf der Berliner Konferenz beschlossen, die Dehnbarkeit an Flachstäben durch Ausmessung an gleichen Theilungen auf beiden Schmalseiten [wie es früher in der Charlottenburger Anstalt üblich war und meistens auch heute noch geübt wird] und an einer Breitseite zu ermitteln. Ich liess selbstverständlich dieses Verfahren sofort nach dem Beschluss in der Versuchsanstalt ausführen. Wenn auch die hiermit verbundene Mehrarbeit in sehr vielen Fällen praktisch kaum lohnend ist, so giebt doch die vermehrte Sicherheit bei der dreimaligen getrennten Erhebung des gleichen Maasses immerhin einen Anlass, das Verfahren in den öffentlichen Versuchsanstalten festzuhalten. Es ist aber jedenfalls für die Praxis von Werth, Klarheit darüber zu gewinnen, wie weit sie mit der Vereinfachung ihrer Messverfahren gehen kann, ohne sehr falsche Dehnungswerthe zu erhalten. Ich theile deswegen hier eine Zusammenstellung der Messungen mit, wie sie an Kupferflachstäben von $0,7 \times 2,1 \text{ cm}$ Querschnittsabmessung erhalten worden sind (Tab. 11 S. 90).

Der Fehler bei Ausmessung an der Breitseite gegenüber der Messung an der Schmalseite beträgt bis zu 0,8%; die Messung als Mittel aus den Schmalseiten, gegenüber dem Mittel aus allen 3 Messungen, weicht bis zu 0,4% ab.

In Tab. 12 lasse ich einen Auszug der Mittelwerthe der Abweichungen $x-y$ folgen, die von je 5 ganz gleichen Flachstäben aus Kupfer, von den in der ersten Spalte angegebenen Breitenverhältnissen des Stabquerschnittes, gewonnen wurden, indem die Dehnung einmal an der Messlänge $l = \text{je } 5 l_0$ und das anderemal an $l = \text{je } 10 l_0$ bestimmt wurde.

Tabelle 10. Vergleich des Anreissstabes und der erzeugten

Mit A ist der Anreissstab,

Theilstrich No. Solltheilung mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	7	14	21	28	35	42	49	56
Ableseung für A . . .	0	6,97	13,99	21,01	28,01	35,10	42,06	49,08	56,11
" " B . . .	0	7,03	14,04	21,09	28,06	35,09	42,09	49,09	56,14
Abweichungen { für A " B	0	-3	-1	+1	+1	+10	+6	+8	+11
	0	+3	+4	+9	+6	+9	+9	+9	+14
Mittel der Fehler									
Daher Fehlerrest für B	-10	-7	-6	-1	-4	-1	-1	-1	+4

Tabelle 11. Unterschied der Dehnungen auf der Schmal- und Breitseite von Flachstäben aus Kupfer.

Bruchdehnungen in Procenten gemessen auf je 10 Theilungen vom Bruch.

Querschnitt		Schmal- seiten Mittel	Breit- seite	$x - y$	$\frac{x + y}{2}$	Stabzeichen	
$a \times b$ cm	a/b	x %	y %	%	%		
7×21	$1/3$	—	—	—	—	D 21	
		46,0	46,5	-0,5	46,3	D 22	
		49,2	48,5	+0,7	48,9	D 23	
		50,8	50,1	+0,7	50,5	E 21	
		49,6	48,9	+0,8	49,3	E 22	
		45,6	45,4	+0,2	45,5	E 23	
	35,3	35,1	35,3	35,1	+0,2	35,2	F 21
			28,6	27,7	+0,9	28,2	F 22
			23,3	22,9	+0,4	23,1	F 23

Tabelle 12. Unterschiede zwischen den Dehnbarkeiten, bestimmt auf beiden Schmalseiten (x) und auf der Breitseite (y) von Kupferstäben.

(Auszug aus L 110 S. 92-97. Tab. 22.)

Bruchdehnungen in Zehntel-Procenten.

Blech Stabform	A		B		C		D		E		F	
	δ_5	δ_{10}										
$1,0 \times 3,0$ cm a	9	-1	7	12	9	3	—	—	—	—	—	—
$0,7 \times 2,1$ " b	8	5	7	3	5	0	16	12	4	3	11	6
$0,7 \times 0,7$ " c	—	—	—	—	—	—	0	0	2	1	-3	-1
$0,7 \times 3,5$ " d	—	—	—	—	—	—	6	4	?	7	5	5
$0,7 \times 7,0$ " e	—	—	—	—	—	—	22	9	13	9	8	2

Man sieht aus den beiden Tabellen 11 und 12, dass die Messungen an den Schmalseiten stets grössere Werthe geben als an den Breitseiten, und aus Tab. 12, dass die Unterschiede bei kleiner Messlänge grösser sind als bei grosser Länge. Schon in den Mitteln aus je fünf Versuchen kann der Unterschied bei sehr breiten Stäben mehr als 2 Einheiten von δ (d. i. %) betragen; bei den einzelnen Stäben ist er natürlich noch grösser. Für die Stäbe mit dem Breitenverhältniss $1/3$ findet

Theilung $l = 7$ mm mit dem Normalmaassstabe von Bamberg.

mit B die Theilung bezeichnet.

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
63	70	77	84	91	98	105	112	119	126	133	140
63,16	70,10	77,10	84,10	91,17	98,23	105,18	112,18	119,22	126,25	133,33	140,26
63,14	70,06	77,06	84,06	91,10	98,13	105,13	112,15	119,15	126,17	133,17	140,19
+16	+10	+10	+10	+17	+23	+18	+18	+22	+25	+33	+26
+14	+6	+6	+6	+10	+13	+13	+15	+15	+17	+17	+19
von $B = + 10,2$											
+4	-4	-4	-4	0	+3	+3	+5	+5	+7	+7	+9

man Abweichungen von über 1%; am kleinsten sind die Unterschiede beim Verhältniss $\frac{1}{1}$ [Quadrat] und am grössten beim Verhältniss $\frac{1}{10}$. Noch eingehender habe ich diese Thatsachen in meinem Bericht über Kupferuntersuchungen belegt. (L 110, S. 81 u. f.)

Wie man aus diesen Ergebnissen sieht, darf man bei Benutzung von Flachstäben, deren Breitenverhältniss den Werth $\frac{1}{4}$ nicht überschreitet und bei denen die Messlänge l hinreichend gross ist [worüber später noch zu reden ist], nur dann die Messungen an einer einzigen Theilung in der Mitte der Breitseite ausführen, wenn man gelegentliche Fehler von mehr als 1% Dehnbarkeit in den Kauf nehmen darf. Dieser Fehler tritt natürlich nur bei solchem Material merkbar hervor, das stark einsnürt. Die Messungen müssen selbstverständlich auf einem Längsriss von den Bruchrändern aus geschehen (131). Ich darf nicht unterlassen, darauf aufmerksam zu machen, dass der Abnehmer des Materiales den Erzeuger jedenfalls nicht schlecht behandelt, wenn er zugiebt, dass die Dehnungsmessungen bei Flachstäben als Mittelwerthe der Messung an beiden Flachseiten erhoben werden.

138. Aus dem früher (135) über die Wirkung der Stabköpfe Gesagten können sich immerhin Zweifel darüber ergeben, ob es nicht theoretisch richtiger sein würde, die Ergänzung des am kurzen Bruchende fehlenden Theiles durch doppelte Ausmessung des entsprechenden Theiles am langen Ende auszuschliessen und einfach die Ausmessung ein für allemal nur am langen Bruchstück auszuführen, indem man die Dehnbarkeit für die halbe Messlänge am langen Stabende ermittelt, denn nach der früheren Annahme ist die Formänderung an der Einschnürungsstelle am langen Stabende durch die Wirkung des Stabkopfes am wenigsten beeinflusst. Der Bruchrand liegt aber nicht immer in der Mitte einer Theilung, und man müsste gewissermaassen eine Fehlerrechnung für diesen Umstand einführen, wenn man streng verfahren wollte. Hat der Bruch stark ausgeprägte Trichterform, so fällt die engste Stelle a (Fig. 99) d. h. diejenige, welche den Höchstwerth der Dehnbarkeit zeigt, nicht mit dem Bruchrand a_1 zusammen, sie kann sogar noch erheblich hinter dem Trichtergrunde liegen, und man kommt nun in Zweifel, welchen Punkt man bei dieser Art der Messung als Ausgangspunkt wählen soll. Benutzt man das bei den öffentlichen Prüfungsanstalten praktisch im Gebrauch befindliche Ver-

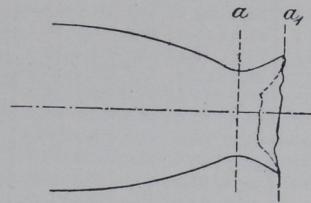


Fig. 99.

fahren der Ergänzung des fehlenden Theiles am längeren Stabende, so umgeht man diese Zweifel.

139. Man hat viele Versuche ausgeführt, um die Grösse des Fehlers in der Dehnbarkeitsbestimmung nach der praktischen Methode des Messens zwischen zwei Endmarken, gegenüber dem wahren Dehnbarkeitsbetrage zu ermitteln. Man kann sich aber an der Hand eines einzigen Versuches, auf Grund der Ausmessungen an der Stabtheilung, leicht davon überzeugen, dass der Fehler mehrere Einheiten der Dehnbarkeit ausmachen kann. In Tab. 13 A sind die bei solchen Messungen als Mittel aus mehreren Versuchsreihen mit gleichartigem Material abgeleiteten Dehnungswerthe verzeichnet. Die Bruchstelle ist immer auf die Theilung 18 verlegt. Aus den aufgeführten Zahlenreihen sind die Dehnungen unter verschiedenen Voraussetzungen berechnet, nämlich so, als ob der Bruch möglichst nahe dem einen Ende stattgefunden hätte, und so, als ob er in $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{2}$ der Länge erfolgt wäre. Stellt man die gefundenen Werthe (Tab. 13 B) einander gegenüber, indem man jedesmal die für Bruch in der Mitte oder $\frac{1}{2}$ der Messlänge gefundenen Zahlen

Tabelle 13. Einfluss der Lage des Bruches und der Messlänge l auf die Bestimmung der Dehnbarkeit.

Theilung No.	A Dehnung der Theilung in Procenten Versuchsreihe					B Dehnung bezogen auf die Messlänge l und Bruchlage										
	a	b	c	d	e	Versuchs- reihe	$l = 20 l_t$				$l = 10 l_t$			$l = 5 l_t$		
							am Ende	in $\frac{1}{4} l$	in $\frac{1}{3} l$	in $\frac{1}{2} l$	am Ende	in $\frac{1}{3} l$	in $\frac{1}{2} l$	am Ende	in $\frac{1}{2} l$	
								oder zwischen den Theilungen								
							1	4	5	9	9	12	14	14	16	
							20	23	24	28	18	21	23	18	20	
1	17,4	17,1	14,5	—	—	a	28,9	30,2	30,5	31,1	34,2	37,3	38,4	45,6	49,5	
2	19,1	19,2	14,5	—	—	b	31,5	32,6	32,7	33,4	38,6	40,6	42,0	52,7	54,6	
3	20,4	21,9	14,5	—	—	c	26,4	27,6	28,0	29,0	32,3	37,1	37,5	45,1	52,8	
4	21,2	22,5	15,5	15,5	13,0	d	—	28,7	29,0	29,9	30,9	31,6	38,2	40,6	50,8	
5	20,4	23,7	15,0	16,0	16,0	e	—	33,7	34,2	35,4	38,5	47,4	48,0	54,9	68,6	
6	21,4	23,4	16,0	16,0	17,5											
7	22,3	23,7	16,0	18,0	19,0											
8	21,5	25,1	16,5	20,0	19,0											
9	22,4	25,1	18,0	20,5	20,0											
10	21,7	25,5	20,0	20,5	22,0											
11	23,7	23,3	19,5	21,0	22,5											
12	22,2	23,5	20,0	21,5	23,0											
13	24,0	25,1	20,0	22,5	22,3											
14	25,1	26,4	22,1	22,0	25,0											
15	26,6	29,9	22,8	26,0	28,8											
16	30,5	38,2	27,0	32,5	34,3											
17	50,1	72,9	56,5	44,5	58,0											
Bruch	95,8	86,0	97,3	78,0	128,5											
19	39,3	43,8	56,0	60,8	81,8											
20	32,0	32,0	27,0	38,3	41,5											
21	27,5	27,8	22,2	29,5	30,3											
22	29,1	26,7	22,2	26,5	26,0											
23	27,6	25,5	21,5	23,8	25,3											
24	25,8	24,4	23,8	22,5	24,5											
25	26,1	24,7	23,0	22,5	25,0											
26	25,8	25,5	22,8	21,3	24,8											
27	23,3	25,1	20,2	21,3	24,5											
28	23,0	25,1	18,5	20,5	24,8											
29	22,3	24,7	20,0	20,0	24,5											
30	22,4	23,4	20,0	19,0	24,5											
31	20,8	23,7	20,0	17,0	23,3											
32	19,8	22,5	19,0	16,5	23,0											
33	19,6	21,9	19,5	16,5	25,5											

oder im Verhältniss zum Bruch in $\frac{1}{2} l$									
a	b	c	d	e					
93,0	97,0	98,3	100	88,8	97,1	100	92,2	100	
94,4	97,7	98,0	"	91,9	96,7	"	97,0	"	
91,0	95,2	96,5	"	86,2	98,8	"	85,2	"	
—	95,9	97,0	"	81,0	98,5	"	80,1	"	
—	95,0	96,3	"	80,2	98,7	"	79,8	"	
Mittel	92,8	96,2	97,2	100	85,6	97,6	100	88,5	100

Es bezieht sich Reihe:

a) Mittel von Rundstäben	} aus verschiedenen Sorten Flusseisen.
b) " " Flachstäben	
c) " " Rundstäben	
d) " " Flachstäben	
e) " " Flachstäben	

= 100 setzt, so bekommt man eine Uebersicht, wie sie in der zweiten Gruppe unter Tab. 13 B angegeben ist.

140. Diese Zahlen gelten für weiches Flusseisen, wie es für Konstruktionszwecke im Hoch- und Brückenbau meistens verwendet wird. Man erkennt aus den Zahlenreihen ohne weiteres den grossen Einfluss, den die Lage des Bruches innerhalb der Messlänge auf den Grössenwerth von δ ausübt. Fällt der Bruch in das mittlere Drittel der Messlänge, so können immer noch Fehler bis zu 4% des Werthes von δ vorkommen. Um nun wenigstens den grösseren Fehler auszuschliessen, sollte man

bei Anwendung des Messverfahrens zwischen zwei Endmarken die Dehnbarkeit nur an solchen Stäben bestimmen, die innerhalb des mittleren Drittels der angewendeten Messlänge gerissen sind.

Durchaus nothwendig ist diese Maassregel allerdings nur bei Material, das stark einschnürt, bei dem also die Dehnungen in den einzelnen Stabtheilen erheblich verschieden sind. Aber es muss schon hier betont werden, dass der wissenschaftliche Werth der Angaben über die Dehnbarkeit stark einschnürender Körper ein sehr zweifelhafter ist, wenn nicht zugleich angegeben ist, wie die Zahl gewonnen wurde. Dies sollte bei jeder passenden Gelegenheit ausgesprochen werden, weil die Ueberzeugung von der Tragweite dieser Thatsache bei weitem noch nicht Allgemeingut geworden ist.

a. Es giebt aber noch einen anderen Grund, der die soeben ausgesprochene Regel rechtfertigt, die Dehnbarkeit nur an Stäben zu messen, die im mittleren Drittel zu Bruche gingen. Das ist die bereits mehrfach besprochene Thatsache, dass bei den Stäben, die nahe am Ende reissen, die früher gemachte Voraussetzung der Symmetrie der Formänderungen zur Bruchstelle oft nicht mehr zutrifft (135 Fig. 92). Es ist zu vermuthen, dass bei dem unter Absatz 140 vorgeschlagenen Ausschluss der nicht im mittleren Drittel gerissenen Stäbe, der immerhin noch verbleibende Fehler unter Umständen sogar noch kleiner sein wird, als der bei dem umständlichen Verfahren der Versuchsanstalten immer noch begangene Fehler, welcher beim Bruch am Ende wegen der Wirkung der Stabköpfe vorhanden ist. Hierüber müssen aber noch sehr eingehende Versuche gemacht werden. Immerhin war besonders auch diese Ueberlegung die Ursache, dass ich dem Verein deutscher Eisenhüttenleute die in Absatz 140 beschriebene Maassnahme vorschlug.

b. Ich muss hier noch einen anderen Vorschlag besprechen, der von vielen Seiten, unter Anderen auch von v. Tetmajer vertreten worden ist. Man ist vielfach der Meinung, dass die Formänderung neben der Bruchstelle, die eigentliche Einschnürung, auszuschliessen sei, weil man sich die Dehnbarkeit des Stabes aus zwei Theilen entstanden denken könne, nämlich aus dem Antheil der Einschnürungsstelle, der nur die Dehnbarkeit eines engbegrenzten Theiles des Stabes zeigt, und aus einem zweiten, an dem die ganze Länge des Stabes gleichmässig Theil nehmen soll. Nur den letzteren wollte man zur Bewerthung der Materialeigenschaften benutzen. Nun ist aber die Voraussetzung, dass die Dehnung in irgend einem Abschnitt des Versuches für die ganze Messlänge l konstant sei, angenähert nur dann erfüllt, wenn man einen Stab von sehr grosser Gebrauchslänge lg voraussetzt. Bei unsern kurzen Probestäben tritt aber die Einwirkung der Spannköpfe bereits innerhalb der Elasticitätsgrenze hervor, und ganz besonders zeigt sie sich, wie schon mehrfach gesagt, bei dem hier allein in Frage kommenden Zustande des Stabes nach dem Bruch. Es giebt bei einem Stabe von beschränkter Länge überhaupt keinen Stabtheil, bei dem die Dehnbarkeit auf grosser Länge konstant ist. Hat man dies aus Versuchen abgeleitet, so kann es sich dabei nur um Zufälligkeiten oder nicht ganz einwandfreie Benutzung der Zahlenwerthe handeln. Wenn aber die

Hauptvoraussetzung des hier besprochenen Vorschlages nicht zutrifft, so fragt es sich, wie gross sind die Fehler des in Vorschlag gebrachten Verfahrens, und was bietet es uns Neues und Vortheilhaftes für die Erkenntniss der Materialeigenschaften?

β. Einfluss der Messlänge l .

141. Wenn man die Dehnbarkeit an einem mit Theilung versehenen Stabe nach dem Verfahren der öffentlichen Prüfungsanstalten an verschiedenen Messlängen, d. h. an einer verschiedenen Anzahl von Theilungen symmetrisch zum Bruch misst, so bekommt man bei Stäben mit starker Einschnürung erheblich verschiedene Werthe, wie ja aus der Betrachtung der Dehnungsschaulinien, z. B. aus Fig. 89 S. 85 ohne weiteres einleuchtet, und auch beim Vergleich der Werthe in Tab. 13 B sofort erkannt wird. Stellt man die Schlusswerthe dieser Tabelle mit einander in Vergleich, indem man die für $l=20l_t$ gefundenen Werthe gleich 100 setzt, so bekommt man folgende Uebersicht, Tab. 14.

Tabelle 14. Einfluss der Messlängen auf die Werthe für die Dehnbarkeit.

Dehnungen in Procenten von l , bezogen auf Bruch in der Mitte.

($l_t \cdot 20$; $l_t \cdot 10$ und $l_t \cdot 5$ entspricht den Verhältnissen $n=l\sqrt{f}=11,3$; 8,5 u. 3,5 (159).)

Stabform (Flusseisen)	$l_t \cdot 20$	$l_t \cdot 10$	$l_t \cdot 5$	oder bezogen auf $l_t \cdot 20 = 100$	
	%	%	%	$l_t \cdot 10$	$l_t \cdot 5$
a) Mittel von Rundstäben ¹⁾	31,1	38,4	49,5	123,5	159,2
b) " " Flachstäben ¹⁾	33,4	42,0	54,6	125,7	163,7
c) " " Rundstäben ¹⁾	29,0	37,5	52,8	129,2	182,0
d) " " Flachstäben ²⁾	29,9	38,2	50,8	127,2	169,7
e) " " Flachstäben ²⁾	35,4	48,0	68,6	135,5	193,7

142. Aus dem in den vorausgehenden Absätzen Besprochenen ist bereits hervorgegangen, dass man sich die Gesamtverlängerung als die Summe aus der Verlängerung des Stabes vor dem Eintritt der Einschnürung und aus der Verlängerung der Einschnürstelle zusammengesetzt denken kann. Sobald der Stab sehr lang ist, d. h. sobald man die Wirkung der Einspannköpfe vernachlässigen kann, darf man annehmen, dass der Stabtheil ausserhalb der Einschnürung bei der Querschnittsverringerung nahezu seine prismatische Gestalt beibehält, d. h. eine gleichmässige Verlängerung in allen Theilen erfährt. Ist β die Dehnbarkeit der Längeneinheit des Stabes bis zum Eintritt der Einschnürung, so ist bis dahin:

$$\lambda = \beta l$$

oder in Procenten der Messlänge:

$$\delta = \frac{\beta l}{l} 100 = \beta 100;$$

β ist eine Konstante, die dem Material eigenthümlich ist.

¹⁾ Nach eigenen Versuchen.

²⁾ Nach Versuchen Bauschingers (Mitthlg. München XXI. S. 22).

Tritt nun die Verlängerung der Einschnürung λ_e hinzu, so wird:

$$\lambda = \beta l + \lambda_e$$

oder in Procenten von l :

$$\delta = 100 \left(\beta + \frac{\lambda_e}{l} \right) \dots \dots \dots 10.$$

Es kommt ein von der Messlänge l unabhängiges Glied hinzu.

143. Wegen der Wirkung der Einspannköpfe, die bei Aufstellung dieser Formel ausser Acht gelassen wurde, kann diese nicht für jede Länge l streng gültig sein. Die Wirkung der Spannköpfe ist aber um so weniger bemerkbar, je länger der Stab ist. Bei kurzen Stäben, wie sie bei der Materialprüfung benutzt werden müssen, wenn die Versuche nicht unnöthig theuer werden sollen, tritt die sogenannte gleichmässige Dehnbarkeit nicht mehr klar getrennt von der örtlichen Dehnbarkeit in der Einschnürung hervor. Der Uebergang zwischen beiden verwischt sich um so mehr, je kürzer der Stab wird.

144. Da die örtliche Einschnürung es ist, die den Einfluss der Probenlänge auf die Dehnbarkeitsmessung bedingt, so ist klar, dass harte und weiche Körper, d. h. wenig dehbare und stark dehbare, einen erheblichen Unterschied zeigen müssen. Bei den weniger dehbaren ist der Einfluss der Probenlänge auf das Messungsergebniss naturgemäss geringer, als bei den stark dehbaren und meistens auch stark einschnürenden. So lange als das alte Schweisseisen mit seiner meist geringen Dehnbarkeit und Einschnürung das Hauptmaterial für Eisenkonstruktionen bildete, wurde daher der Einfluss der Probenlänge auf das Messungsergebniss in der Praxis fast gar nicht beachtet. Je mehr man aber zur Verwendung des stark dehbaren weichen Flusseisens mit starker Querschnittseinschnürung übergeht, desto mehr wird man gezwungen werden, diesen Einfluss sorgfältig zu studiren und Maassregeln zu treffen, die ihn ausgleichen.

γ . Einfluss der Querschnittsgrösse.

145. Wenn ein in sich gleichmässiges Material vorausgesetzt wird, darf man wohl erwarten, dass unter ähnlichen Umständen das Material auch stets ähnliche Formänderungen erfahren wird (*L 100, 102, 118, 123, 129, 130*), wenigstens liegt kein zwingender Grund für eine andere Annahme vor, und die Erfahrung hat diesen, wie es scheint von Lebasteur und Marié 1878 (*L 102*, Bd. I, S. 120) für kreisförmige Querschnitte zuerst aufgestellten und von Barba 1880 auf rechteckige Querschnitte übertragenen „Satz der Aehnlichkeiten“ innerhalb weiter Grenzen bestätigt, wie weiter unten noch nachzuweisen ist.

Aehnliche Querschnitte und lange Probestäbe vorausgesetzt, hat man also zunächst keinen Grund anzunehmen, dass die Querschnittsgrösse auf die gleichmässige Verlängerung βl oder auf die gleichmässige Dehnbarkeit 100β des Stabes einen Einfluss ausüben wird.

146. Von der örtlichen Dehnbarkeit kann man erwarten, dass sie bei ähnlichen Querschnittsformen und gleichem Material proportional den Querschnittsabmessungen, also proportional der

Querschnittsgrösse werde. Auch diese Voraussetzung ist durch Versuche vielfach bestätigt (*L* 2, Heft 6 u. 21—131).

Man darf mit Bauschinger annehmen:

$$\lambda_e = \gamma \sqrt{f}$$

worin γ zufolge der gemachten Voraussetzungen als eine dem Material eigenthümliche Konstante aufgefasst werden muss:

$$\delta_e = 100 \frac{\lambda_e}{l} = 100 \gamma \frac{\sqrt{f}}{l};$$

hiernach wird sein:

$$\delta = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f}}{l} \right) \dots \dots \dots 11.$$

Für einen zweiten Stab aus gleichem Material aber mit anderem Querschnitt würde man hiernach:

$$\delta_1 = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f_1}}{l_1} \right)$$

zu setzen haben, und wenn δ in beiden Fällen gleich gross gefunden werden soll, so muss:

$$\delta = \delta_1 \text{ oder } 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f}}{l} \right) = 100 \left(\beta + \gamma \frac{\sqrt{f_1}}{l_1} \right)$$

oder:

$$\frac{\sqrt{f}}{l} = \frac{\sqrt{f_1}}{l_1}, \text{ d. i. } l:l_1 = \sqrt{f}:\sqrt{f_1} \dots \dots \dots 12.$$

werden; die Messlängen müssen sich wie die Wurzeln aus den Querschnitten verhalten, wenn ähnliche Stäbe aus gleichem Material, aber von verschiedener Querschnittsgrösse, gleiche Dehnungswerthe liefern sollen.

Dieser Satz gilt selbstverständlich nur für Stäbe von grosser Länge. Für Stäbe von kleiner Länge muss auch hier die Wirkung der Einspannköpfe in Betracht gezogen werden.

δ. Einfluss der Querschnittsform.

147. Ueber den Einfluss der Länge und der Querschnittsgrösse konnte man sich unter der Voraussetzung solcher Stäbe, bei denen der Einfluss der Einspannköpfe nicht mehr in Betracht kommt, aus allgemeinen Herleitungen auf Grund von Annahmen Aufklärung verschaffen, die an sich grosse Wahrscheinlichkeit für sich hatten, aber auch durch viele Versuche bestätigt sind. Ueber die Wirkung der Querschnittsformen kann man sich nur an der Hand von Versuchsergebnissen unterrichten. Wir haben aus unserer letzten Betrachtung gesehen, dass man sich hierbei an vergleichbare Stabformen, d. h. an solche halten muss, deren Messlängen l sich wie die Wurzeln aus den Querschnittsflächen verhalten. Ausserdem sind natürlich noch die Voraussetzungen zu erfüllen, aus denen die Formeln hervorgingen, d. h. man hat möglichst lange Stäbe aus ganz gleichem Material zu wählen und mit Hilfe der vor dem Versuch angebrachten Theilung die Dehnbarkeit δ an Strecken zu ermitteln, die symmetrisch zur Bruchstelle liegen.

Hiernach müssen daher die Messlängen sich verhalten:

$$\frac{l}{l_1} = \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{f_1}} \quad \text{oder} \quad \frac{l}{\sqrt{f}} = \frac{l_1}{\sqrt{f_1}}.$$

148. Wenn man nach diesen Grundsätzen beispielsweise die von Bauschinger zur Erforschung der Gesetze über die Wirkung der Stabformen erhobenen Versuchsergebnisse (L 2, Heft 21, Tab. I u. II) als Schaulinien aufträgt, so findet man, dass die nach dem Verhältniss l/\sqrt{f} geordneten Dehnbarkeiten (Fig. 100), trotz der verschiedenen

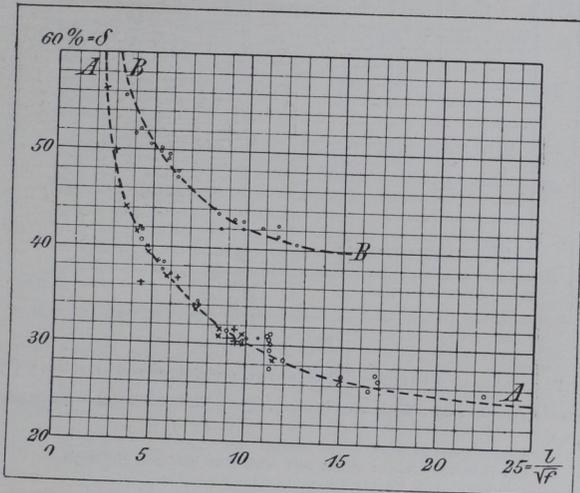


Fig. 100.

Flusseissen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

- Gruppe A: ● Flachstäbe gleicher Dicke und $b/a = 2,5; 2,1; 1,8; 1,4$.
 × Flachstäbe gleicher Breite und $b/a = 3,0; 2,1; 1,7; 1,3$.
 + Flachstäbe ähnlich Querschnitte und $b/a = 1,7$.
 ○ Rundstäbe von 2,5; 2,0; 1,5; 1,0 cm Durchmesser.
 Gruppe B: (um 10% nach oben verschoben gezeichnet).
 ● Flachstäbe mit Walzhaut; anderes Material.

Querschnittsformen [Kreis bis zum Rechteck vom Verhältniss $b/a = 3$] und trotz der sehr verschiedenen Querschnittsgrößen, die Werthe mit praktisch ausreichender Annäherung sich an eine gemeinsame Ausgleichlinie anschmiegen, von der nur wenige Punkte etwas stärker abweichen.

Bauschinger hat alle mit dem Verhältniss $l/\sqrt{f} = 8,5$ gewonnenen Dehnungswerthe aus seinen vorhin angeführten Versuchsreihen mit den Dehnungen verglichen, die das gleiche Material an einem Normalrundstabe von 2,0 cm Durchmesser bei Anwendung einer Messlänge von 15 cm, also bei Benutzung des gleichen Verhältnisses $l/\sqrt{f} = 8,5$ ergab. Stellt man die hierbei gewonnenen Werthe für δ nach wachsenden Querschnittsgrößen zusammen, wie es in Fig. 101 geschehen ist, so erkennt man, dass die Querschnittsgröße innerhalb der angewendeten Grenzen und für das untersuchte Material nur einen sehr geringen Einfluss auf die Dehnbarkeit gehabt hat. Man kann aus Fig. 101 allenfalls

eine ganz geringe Abnahme der Dehnbarkeit δ mit wachsender Querschnittsgrösse ableiten.

149. Bildet man aus den Ergebnissen, die mit Stäben von gleichem Verhältniss b/d [Breite zu Dicke] gewonnen wurden, Mittelwerthe und ordnet

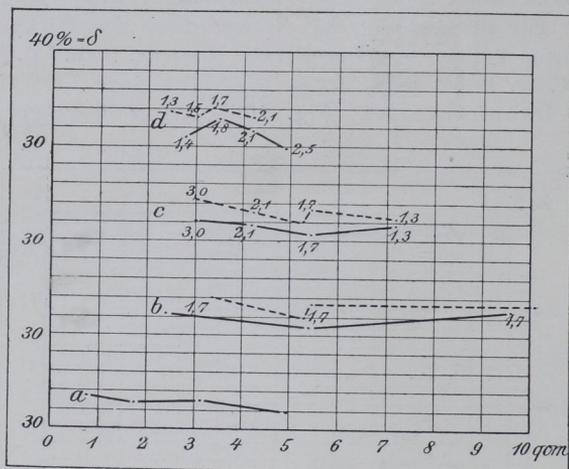


Fig. 101.

Flusseisen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

Dehnbarkeiten δ ermittelt an Stäben verschiedener Querschnittsgrösse und Querschnittsform, aber vom Verhältniss $l/\sqrt{f} = 8,5$.

Ausgezogene Linien: Stäbe bearbeitet.

Gestrichelte Linien: Stäbe mit Walzhaut (anderes Material)

Gruppe a: Rundstäbe von 1,0 bis 2,5 cm Durchmesser.

„ b: Flächstäbe ähnlichen Querschnittes $b/a = 1,7$.

„ c: Flächstäbe gleicher Breite und $b/a = 3,0$ bis $1,3$.

„ d: Flächstäbe gleicher Dicke und $b/a = 2,5$ bis $1,3$.

diese nach wachsenden Werthen von b/a , so kann man aus den Bauschingerschen Tabellen I und II für Stäbe vom Verhältniss $l/\sqrt{f} = n = 8,5$ folgende Uebersicht ableiten (Tab. 15).

Tabelle 15. Einfluss der Querschnittsform auf die Dehnbarkeit.

Dehnbarkeiten δ bestimmt für $l/\sqrt{f} = 8,5$.

Bauschingers Mittheilungen Heft 21	Rundstäbe o —	Flachstäbe $b/a =$							
		1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,1	2,5	3,0
Tabelle 1									
Dehnbarkeit δ in %	32,9	—	31,0	—	31,7	33,0	31,8	(29,9)	32,0
Zahl der Fälle	7	—	1	—	4	1	2	1	1
Tabelle 2									
Dehnbarkeit δ in %	—	33,2	—	33,3	33,5	—	33,2	—	34,5
Zahl der Fälle	—	2	—	1	5	—	1	—	1

Die Dehnbarkeit wurde also nach Fig. 103 bei den Barbaschen Versuchen durch die Wirkung der Stabköpfe ganz erheblich vermindert, aber um so weniger, je länger der Stab war. Man erkennt also hieraus die Wichtigkeit der vorhin gemachten Einschränkungen bezüglich der Gleichungen über den Einfluss der Längen und Querschnitte auf das Ergebniss der Dehnbarkeitsmessungen. Auch ergibt sich klar, dass man die an langen Stäben für kurze Messlängen gewonnenen Dehnbarkeiten noch keineswegs mit den an kurzen Stäben mit gleichen Messlängen gewonnenen Dehnbarkeiten vergleichen darf, wenn auch die Werthe von l/\sqrt{f} , sowie die Querschnittsgrösse und Querschnittsform einander gleich sind; denn bei Zugrundelegung des Normalstabes von 2,0 cm Durchmesser und $l=20,0$ cm, also $l/\sqrt{f}=11,3$, erhielt Barba beim langen Stabe $\delta=34,5$ und beim

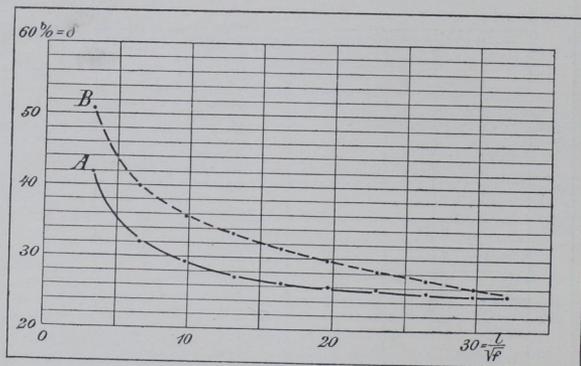


Fig. 103.

Flusseisen. Einfluss der Stabköpfe auf die Dehnbarkeit (Barba).

kurzen Stabe $\delta=28,3\%$, also einen Unterschied von 100 zu 82. Hier liegt ein scheinbarer Widerspruch mit den im Absatz 148 und 149 besprochenen Bauschingerschen Ergebnissen vor, welche erwiesen, dass bei gleichem l/\sqrt{f} selbst für verschiedene Querschnittsgrössen und Querschnittsformen die Dehnbarkeit δ als gleich befunden wird. Man erkennt also leicht, dass man nothwendiger Weise auch noch solche Bestimmungen über die Versuchsanordnungen treffen muss, die den Einfluss der Stabköpfe ausgleichen, wenn man mit Stäben von anderen Abmessungen die gleichen Dehnungswerthe erhalten will, wie sie das gleiche Material mit einem Normalstabe von 2,0 cm Durchmesser und 20,0 cm Messlänge liefern würde.

Es liegt nahe, die Versuchsergebnisse unmittelbar auf die Erfüllung der in Absatz 146 S. 96 gegebenen Gleichung 11:

$$\delta = 100(\beta + \gamma \sqrt{f}l)$$

zu prüfen. Dies ist in Fig. 104 mit den bereits vorhin benutzten Ergebnissen von Barba, Bauschinger und anderen von Martens versucht worden; die Versuche beziehen sich auf Stäbe von sehr verschiedener Form und Querschnittsgrösse aus Flusseisen verschiedener Festigkeit und auf mehrere Kupferarten. Man sieht, dass im Grossen und Ganzen die einzelnen Linien durch Gerade ausgeglichen werden können. Es ergibt sich hieraus, dass die Annahme von

Einflusslosigkeit der Querschnittsform, innerhalb der praktischen Grenzen, im Allgemeinen bestätigt ist. Immerhin zeigen die Linien c am Ende schwer erklärbar Abweichungen. Auch die Linienzüge h sind auffallend. Sie stellen die beiden von Barba (Fig. 103) gefundenen Linienzüge dar (vergl. 150); h' entspricht den Dehnungen, wie sie an den einzelnen Abschnitten am langen



Fig. 104.

Einfluss der Stabform und des Verhältnisses $\frac{l}{n} = \sqrt{\frac{F}{E}}$ auf die Dehnbarkeit.

Linien $a-h$ Flusseisen.

- a) Barba: $\sigma_S = 3370$; $\sigma_B = 5960$ at; $l = 10$ cm Rundstäbe; $d = 0,5, 1,0$ u. $2,0$ cm.
- b) " $\sigma_S = 2500$; $\sigma_B = 3720$ at; $l = 10$ cm Rundstäbe; $d = 0,5, 1,0$ u. $2,0$ cm.
- c) " $\sigma_S = 2470$; $\sigma_B = 3870$ at; $l = 5$ u. 10 cm Flachstäbe $b/a = 1$ bis 8 .
- d) " $\sigma_S = 2770$; $\sigma_B = 4140$ at; $l = 10$ cm Flachstäbe; $b/a = 2$ bis 10 .

e) Bauschinger:

f) "

g) Hackney:

h) Barba (aus Fig. 101 abgeleitet):

Linien $i-l$ Kupfer.

- i) Barba: $\sigma_S = 830$; $\sigma_B = 2360$ at; $l = 10$ cm Flachstäbe $f/a = 2$ bis 10 .
 - k) Martens: $\sigma_S = 680$; $\sigma_B = 2290$ at
 - l) " $\sigma_S = 1770$; $\sigma_B = 2370$ at
- } Flachstäbe $f/a = 1$ bis 5 .

Stäbe (50 cm = l) und h den Dehnungen, wie sie an kurzen Stäben, bei gleicher Messlänge in beiden Fällen, ermittelt wurden; bei den kurzen Stäben musste die Wirkung der Stabköpfe mehr zum Ausdruck kommen.

ϵ . Das Gesetz der Aehnlichkeit.

151. Bei Besprechung des Einflusses, den die Einschnürung auf die Grössenwerthe von δ nahm, wurde bereits von der Ueberlegung Gebrauch gemacht, dass bei langen Stäben aus ganz gleichmässigem Material die

Formänderungen ähnliche werden müssten, wenn die Querschnittsformen ähnliche sind. Man sah, dass innerhalb der von Bauschinger benutzten, d. h. der praktisch im Materialprüfungswesen vorkommenden Grenzen für die Querschnittsabmessungen, die Querschnittsgrösse und die Querschnittsform keinen wesentlichen Einfluss auf die Dehnbarkeit hatte, wenn die Messlänge proportional der Wurzel aus dem Querschnitt gemacht wurde. Bauschinger benutzte aber vorwiegend Stäbe, bei denen die Gebrauchslänge, d. h. die Länge des prismatischen Stabtheiles, die Messlänge nur um weniges überschritt und bei denen die Köpfe angenähert ähnlich geformt waren.

Das Gesetz der Aehnlichkeiten, wie es Barba (*L 118* u. *119*) nannte, oder das Gesetz der proportionalen Widerstände, wie es Kick (*L 100*) allgemeiner bezeichnet, kann man für den vorliegenden Fall etwa wie folgt, ausdrücken:

Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material erfahren unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen.

Man hat also zu erwarten, dass innerhalb der Fehlergrenzen der Versuchsausführung und innerhalb der unvermeidlichen Verschiedenheiten des Materiales, bei gleichen Spannungen auch gleiche Dehnungen an zwei Probestäben erhalten werden, wenn alle Abmessungen, also auch diejenigen der Stabköpfe, der Uebergänge vom prismatischen Stabtheil zum Kopf, die Gebrauchslänge, die Messlänge und die Theilungen innerhalb der Messlänge in gleichem Verhältniss bemessen wurden. Streng genommen müssen auch alle Nebenumstände dem Gesetz der Aehnlichkeiten Rechnung tragen, die Einspannung muss z. B. unter ähnlichen Verhältnissen bewirkt werden u. s. w. Diese Dinge machen es zuweilen schwer, die Ursachen der Abweichungen von dem Gesetz aufzufinden, wenn gelegentlich die Erfahrungen dem Gesetz zuwiderlaufen.

152. Die allgemeine Ableitung des Gesetzes und Bewahrheitung durch Versuchsergebnisse würde zu weit führen; es wird wohl genügen, wenn die Arbeiten von Barba (*L 118. 129*), Bauschinger (*L 2*), und Kick (*L 100*) hier genannt werden, die auch auf die einschlägige Literatur verweisen und zum Theil auf sie eingehen.

Für die hier verfolgten Zwecke mag es genügen, an der Hand von Fig. 105 den Nachweis zu erbringen, in wie hohem Maasse die Uebereinstimmung der Dehnungen selbst in den einzelnen Stabtheilungen hervortritt, wenn man die Verlängerungen an geometrisch ähnlichen Theilungen geometrisch ähnlicher Stäbe misst. Die Schaulinien stellen die Längenänderungen dar, die jeder einzelne Stabtheil bis zum Bruch erfährt, in Procenten von l_t , und zwar beziehen sich die ausgezogenen Linien auf ganz unbearbeitete Rundstäbe oder auf Flachstäbe, denen an den Breitseiten die Walzhaut belassen wurde; die punktirten Linien beziehen sich auf allseitig bearbeitete Stäbe. Das Material ist weiches Martinflusseisen. Die ausgezogenen Linien [grosse Querschnitte] und die punktirten Linien [kleine Querschnitte] decken sich so vollkommen, wie man es für solche Versuche nur immer erwarten kann. Dass aber auch in dieser Beziehung die Einflusslosigkeit der Querschnittsform und Querschnittsgrösse sich zu erkennen giebt, leuchtet aus Fig. 105

ebenfalls ein, wenn man die Liniengruppe D betrachtet. Gruppe D giebt die ohne Rücksicht auf die Stababmessungen gebildeten Mittelwerthe aus Gruppe A [Rundstäbe], Gruppe B und C [Flachstäbe]; l_t wechselte zwischen 0,56 und $0,43\sqrt{f}$, war also nicht vollkommen gleich.

In meinem Bericht über Versuche mit Kupfer (*L 110* S. 98 u. f.) habe ich die in den voraufgehenden Abschnitten behandelten Dinge sehr eingehend besprochen, durch viele Beispiele belegt und besonders hervorgehoben, dass, wenn das

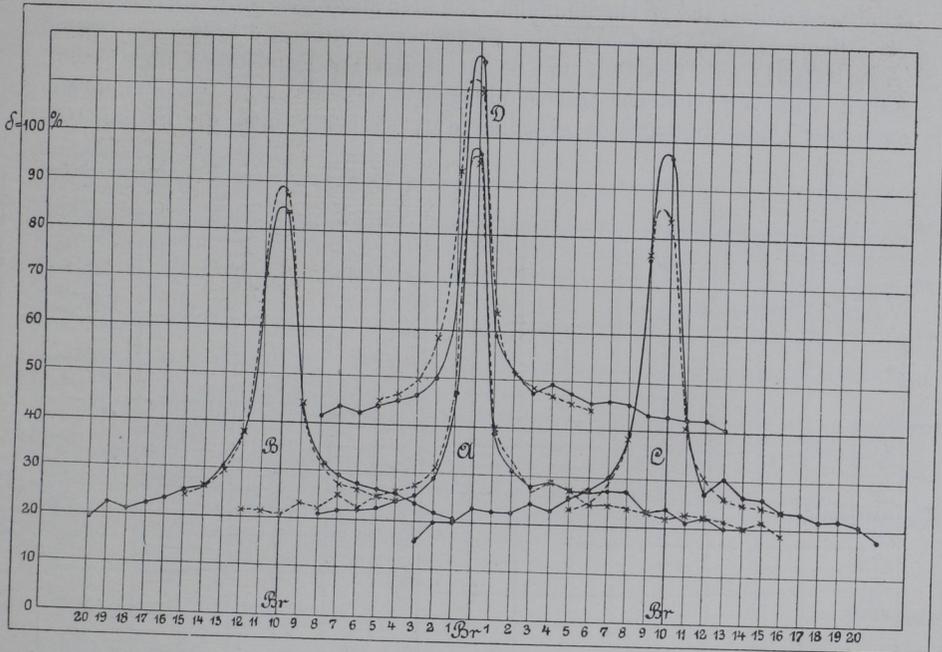


Fig. 105.

Dehnungsschaulinien geometrisch ähnlicher Stäbe.

- Gruppe A: Linie ausgezogen: Rundstäbe unbearbeitet, 2,0 cm Durchmesser $l_t = 1,0$ cm.
 „ punktirt: Rundstäbe bearbeitet 1,3 cm Durchmesser $l_t = 0,65$ cm.
 Gruppe B: Linie ausgezogen: Flachstäbe nur an den Schmalseiten bearbeitet, $f = 4,0 \times 1,3$ cm; $l_t = 1,0$ cm.
 „ punktirt: Flachstäbe bearbeitet, $f = 3,4 \times 1,2$ cm; $l_t = 0,85$ cm.
 Gruppe C: Linie ausgezogen: Flachstäbe an den Schmalseiten bearbeitet, $f = 4,0 \times 1,3$ cm; $l_t = 1,0$ cm.
 „ punktirt: Flachstäbe bearbeitet, $f = 3,4 \times 1,2$ cm; $l_t = 0,85$ cm.

Bei den Rundstäben ist also die Theilung $l_t = 0,56\sqrt{f}$, bei den Flachstäben $l_t = 0,43\sqrt{f}$.

Gesetz der Aehnlichkeiten ganz streng erfüllt ist, auch die nach σ und ϵ verzeichneten Schaulinien für verschiedene, aber geometrisch ähnliche Stäbe¹⁾ in allen ihren Theilen vollständig zusammenfallen müssen. Beim weichen Kupfer wurden Abweichungen in dieser Beziehung nachgewiesen, die noch nicht aufgeklärt sind; bei hartem Kupfer war die Forderung nahezu erfüllt.

¹⁾ Nach den Auslassungen in den Abschnitten γ und δ , gilt dies aber auch allgemein für Stäbe, bei denen gleiche Bedingungen $l = n\sqrt{f}$ erfüllt sind und der Einfluss der Köpfe einigermaßen ähnlich wirkend gemacht wurde.

8. Einfluss der Stabformen auf die Spannungen σ_P , σ_S und σ_B und auf die Querschnittsverminderung q .

153. Nachdem man kennen lernte, welchen erheblichen Einfluss die Stabform auf die Grösse der Dehnbarkeit eines Materiales hat, bleibt zu untersuchen, ob auch auf die Spannungen an der Proportionalitäts-, Streck- und Bruchgrenze (σ_P , σ_S und σ_B), sowie auf die Querschnittsverminderung q ein ähnlicher Einfluss ausgeübt wird.

Benutzt man wiederum die Versuchsergebnisse, die Bauschinger (L 2, Heft 21) an Flusseisen und Schweisseisen mit Rundstäben und Flachstäben von verschiedener Querschnittsgrösse erhielt, und trägt man sie nach der Querschnittsgrösse geordnet auf, so erhält man die in Fig. 106

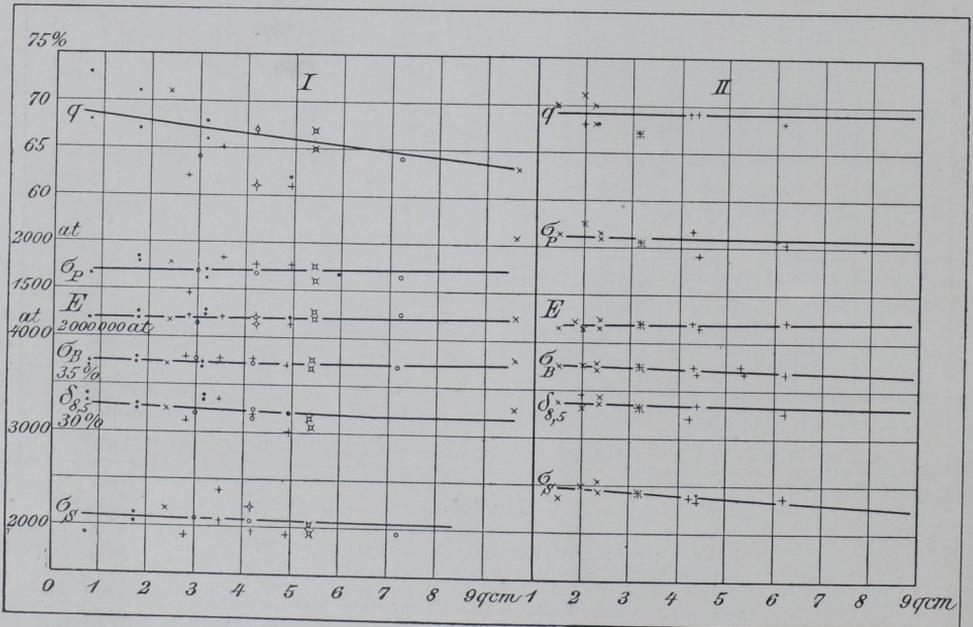


Fig. 106.

Einfluss der Querschnittsgrösse auf die Ergebnisse des ZerreiBversuches.

Gruppe I: Flusseisen (Schürbeln) Rund- und Flachstäbe.

„ II: Flusseisen (Stangen) Rund- und Flachstäbe.

gegebene Uebersicht. Bei den Flachstäben wechselte das Verhältniss der Querschnittsabmessungen b/a zwischen den Werthen 1,3 bis 3,0. Alle Werthe von δ sind auf Messlängen $l = 8,5\sqrt{f}$ bezogen, sie müssen daher nach Früherem (Abschnitt 7) innerhalb jeder der beiden Gruppen gleich gross ausfallen, sobald auch die Gebrauchslänge lg der Stäbe nach einem bestimmten Verhältniss von l/\sqrt{f} gewählt und die Kopfformen einander ähnlich waren, was bei den Bauschingerschen Stäben allerdings nicht ganz streng der Fall war. Die Gebrauchslänge wechselte etwa zwischen $lg/\sqrt{f} = 8$ bis 17; einmal kommt 24,7 vor.

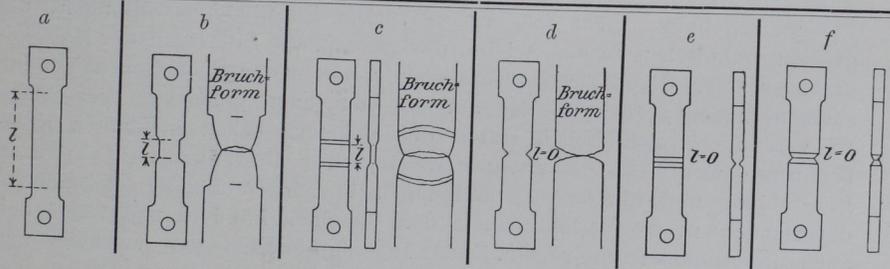
Aus beiden Gruppen in Fig. 106 ergibt sich, was übrigens hinsichtlich der Spannungen durch zahlreiche Versuche älterer und neuerer Autoren vollauf bestätigt wird, dass der Einfluss des Stabquerschnittes und der Stabform innerhalb der Grenzen der praktisch gebräuchlichen Abmessungen und innerhalb der Grenzen $l = (8 \text{ bis } 17)\sqrt{f}$ auf alle gemessenen Grössen, d. i. auf die Spannungen E , σ_P , σ_S und σ_B , sowie auf die Formänderungen q und δ nur sehr gering ist, sobald man δ an Messlängen bestimmt, die bei allen Stäben proportional \sqrt{f} sind. [NB. Es ist aber hierbei nicht zu vergessen, dass diese Erfahrungen nur auf die Materialien beschränkt bleiben dürfen, an denen sie gewonnen wurden.]

154. Auch wenn man die Bauschingerschen Versuche nach wechselnden Grössen von l/\sqrt{f} einordnet, kommt man zu dem Ergebniss, dass der Einfluss der Querschnittsgrösse und Querschnittsform, sowie das Verhältniss der Gebrauchslänge zur Querschnittsgrösse, innerhalb der von ihm innegehaltenen Grenzen, praktisch keinen Einfluss auf die Spannungen E , σ_P , σ_S und σ_B hat. Dagegen erscheinen alsdann die Dehnbarkeit δ und die Querschnittsverminderung q [d. h. also die Formänderung] etwas beeinflusst, indem sie mit wachsendem Verhältniss lg/\sqrt{f} um ein Geringes zuzunehmen scheinen, was wiederum das früher gefundene Gesetz über die Wirkung der Einspannköpfe bestätigen würde, denn es wird ausgesagt, dass die an proportionalen Messlängen ($l = 8,5\sqrt{f}$) gewonnenen Dehnbarkeiten um so grösser werden, je grösser das Verhältniss von lg/l wird.

Will man die Gesetze über den Einfluss der Stabform aus Versuchen klar erkennen, so muss man die Formen in übertriebenem Maasse verändern; Versuche in dieser Richtung sind aber bisher noch wenig ausgeführt. Einigen Anhalt gewähren die Versuche von Barba, deren Ergebnisse ich in Tab. 16 zusammenstellte.

Tabelle 16. Versuche Barbas über den Einfluss der Stabform (Flusseisen).

Abmessungen						
Breite b	30	14	30	14	30	14
Dicke a	14	14	6	14	6	6
Querschnitt f	420	186	180	186	180	84
Messlänge l	200	10	10	0	0	0
l/\sqrt{f}	9,8	0,7	0,7	0	0	0
Versuchsergebnisse						
σ_B	42,0	43,5	44,0	45,7	57,1	60,4
δ_l	30,5	65	40	—	—	—
q	61,8	51,3	49,8	sehr schwach	fast Null	Null



Man erkennt, dass, je stärker die Wirkung des Kopfes zum Ausdruck kommen kann, desto geringer wird die Querschnittsverminderung; ist diese ganz unmöglich, wie bei den Formen *d*, *e* und *f*, wo *l* nahezu 0, so wird auch die Dehnbarkeit unmessbar, ob unmessbar gross oder unmessbar klein, kann man nicht ohne weiteres entscheiden. Aus Früherem ergab sich, dass die Dehnbarkeit bei abnehmender Messlänge wächst; es ist die Frage, ob dieses Gesetz uneingeschränkt gültig ist. Eine Beschränkung würde man aus dem gleichzeitig gültigen Gesetz über die Wirkung der Einspannköpfe wohl ableiten können, welche darauf wirken, die Dehnbarkeit zu verringern. Je weniger der Stab in Folge des Einflusses der Einspannköpfe dem Streben zur Querschnittsverminderung Folge geben kann, desto grösser findet man die Bruchfestigkeit. Die aus den Bauschingerschen Versuchen abgeleitete Thatsache der Einflusslosigkeit des Querschnittes auf die Spannungen E , σ_P , σ_S und σ_B wird also auch nur innerhalb beschränkter Grenzen richtig sein.

Ueber ähnliche in Charlottenburg ausgeführte Versuche berichtete ich schon in Absatz 103*d* (*L* 132). Bei diesen Versuchen an Stäben mit ringförmigen Eindrehungen oder Schraubengewinden konnten Festigkeitszunahmen bis zu 19% nachgewiesen werden.

9. Ueber die bei ZerreiBversuchen anzuwendenden Stabformen.

155. Wie in den vorausgehenden Abschnitten schon mehrfach erwähnt, hat die Erkenntniss, dass die Stabform nicht ohne Einfluss auf die Ergebnisse des ZerreiBversuches bleibt, schon bald nach der allgemeinen Einführung des ZerreiBversuches in das Materialprüfungswesen zur Festsetzung bestimmter Stabformen geführt. Diese Formen wurden zunächst in kleinen Kreisen gebraucht und entstanden an zahlreichen Stellen; sie waren dementsprechend mannigfaltig, so dass ein einwandfreier klarer Vergleich der an verschiedenen Stellen gewonnenen Versuchsergebnisse nicht möglich war. Die Eisenbahnverwaltungen, die grossen technischen Staatsbetriebe, die grossen, die Interessen der Materialerzeuger oder der Materialverbraucher vertretenden technischen Vereine suchten immer grössere Kreise auf die von ihnen gemachten Vorschläge zu vereinigen. Schliesslich traten die mehrfach schon genannten Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren in Deutschland und ähnliche Vereinigungen in andern Ländern zusammen, die versuchten, die Verhältnisse in den einzelnen Ländern und womöglich auch international zu regeln. Die Ingenieurvereine der verschiedenen Länder haben fast alle den lebhaftesten Antheil an diesen Fragen genommen, und neuerdings hat sich ein grosser Internationaler Verband für die Materialprüfungen der Technik gebildet, der bereits über 1200 Mitglieder in 21 Ländern hat. Der Verband erstrebt die Vereinheitlichung und Förderung des gesammten Materialprüfungswesens.

156. Wie schon mehrfach angeführt, hat zur Zeit die meiste Verbreitung der Rundstab von 2,0 cm Durchmesser und 20 cm Messlänge. Dieser Stab hat auch in Deutschland sich gegenüber dem vorher wohl mehr verbreiteten Stabe von 2,5 cm [1 Quadratzoll englisch entsprechend] immer mehr Geltung verschafft, weil der stärkere Stab auch stärkere ZerreiB-

maschinen erforderte, was sich namentlich nach der immer mehr um sich greifenden Verwendung des festeren Flusseisens lästig bemerkbar machte.

a. Ich möchte nun, um nicht gar zu weitschweifig zu werden, nicht auf alle bisher für die sogenannten Normalstabformen gemachten Vorschläge eingehen, sondern mich hier darauf beschränken, die in den voraufgehenden Abschnitten gewonnenen Anschauungen benutzend, die Stabformen mitzutheilen, welche die von mir geleitete Königliche mechanisch-technische Versuchsanstalt in Charlottenburg ihren Arbeiten zu Grunde legte (L 133). Dabei ist man von dem Normalrundstab als Ausgangsform ausgegangen und verwendet dementsprechend Flachstäbe von gleicher Querschnittsgrösse, wobei das Breitenverhältniss b/a nicht grösser als 5 werden soll. Wenn die Probestäbe aus irgend einem Grunde grössere oder kleinere Querschnitte als 3,14 qcm haben müssen, so werden, entsprechend den Abmessungen des Normalrundstabes, alle Stababmessungen nach \sqrt{f} als Einheit verändert. Die Stäbe mit dem Querschnitt $f = 3,14$ qcm und $b/a = 1$ bis 5 werden als Normalstäbe, die Stäbe mit abweichendem f , aber proportionalen Abmessungen, nach dem Vorgange Bauschingers als Proportionalstäbe bezeichnet. Diese Proportionalstäbe werden nun nicht mit beliebigen Querschnitten ausgeführt, sondern man lässt die Querschnittsgrössen so wachsen, dass die ebenfalls proportional ausgeführten Theilungsgrössen l um ein ganzes Vielfaches von 0,1 cm wachsen.

b. Zum Auftragen dieser Theilungen ist dann eine Reihe von entsprechenden Anreissstäben (siehe Fig. 95) angefertigt, und zum Messen der Verlängerung werden Anlegemaassstäbe (76) benutzt, die nach Procenten der Theilung l getheilt sind, so dass also ganz ohne Rechnung stets die Dehnung ε , beziehentlich 100 ε , für die Längeneinheit, gemessen wird. Entsprechende Maassnahmen sind auch für die Feinmessungen getroffen worden, indem die Ablesemaassstäbe auch nach Procenten der Messlänge l_0 getheilt wurden. Alle Ablesungen sind also bereits auf die Längeneinheit zurückgeführt, und es bedarf nur noch der Einrichtung, dass man an den Maschinen, statt der Kräfte P , ohne weiteres die Spannungen σ mit ausreichender Zuverlässigkeit abliest oder Schaubilder nach σ und ε verzeichnen kann. Dass dies möglich ist, habe ich später zu zeigen. Den grossen Nutzen solcher Einrichtungen wird man leicht einsehen, wenn man bedenkt, dass man unter Erleichterung der ganzen Rechenarbeit einen ausserordentlich raschen und vollständigen Ueberblick über das geprüfte Material bekommt, denn gleiche Materialien müssen bei Anwendung vergleichsfähiger Stabformen für gleiche Spannungen während aller Versuchsabschnitte gleiche Dehnungen ε liefern und die nach σ und ε verzeichneten Schaulinien müssen zusammenfallen.

157. Sollen Stäbe, die von den Abmessungen des Normalrundstabes abweichen, praktisch die gleichen Versuchsergebnisse liefern wie dieser Stab, so müssen sie Querschnittsgrössen und Abmessungen haben, die nach dem Aehnlichkeitsgesetz und nach der Erfahrung von der Einflusslosigkeit der Querschnittsform gewählt sind.

Der Normalrundstab der Charlottenburger Versuchsanstalt hat die in Fig. 107 [linke Seite] angegebenen Abmessungen. Die nach ihm auszubildenden Proportionalstäbe erhalten hiernach die auf \sqrt{f} als Einheit bezogenen Abmessungen, wie sie auf der rechten Seite von Fig. 107 eingetragen sind.

Der Normalflachstab wird auf den Querschnitt 3,14 qcm bearbeitet, wobei das Breitenverhältniss b/a nicht über 5 steigen soll, man kann also, wenn es gewünscht wird, den Stab meistens so wählen, dass bei der Prüfung von Blechen die Walzhaut auf zwei Stabflächen erhalten bleibt. Wenn man sich diese parallel zur Zeichnungsfläche denkt, so ergiebt sich aus Fig. 107 unten die Form der Seiten [in Walzfläche] und die Anordnung der Querschnitte. Die Art der Einspannung [gefräste Zähne oder

Beisskeile], wie sie in Charlottenburg bewirkt wird, ist am linken Kopf angegeben. Die gefrästen Zähne oder der Angriff der Beisskeile soll über die als Grenze angegebene Linie *NN* nicht hinausgehen. Die Abmessungen für die Proportionalflachstäbe sind wieder in der rechten Seite von Fig. 107 B gegeben; hierzu ist noch zu bemerken, dass die Kopfabmessungen als Vielfaches von der Breite *b* des Stabquerschnittes gebildet wurden, und dass der Uebergang zum Kopf nach dem Halbmesser der zur Bearbeitung

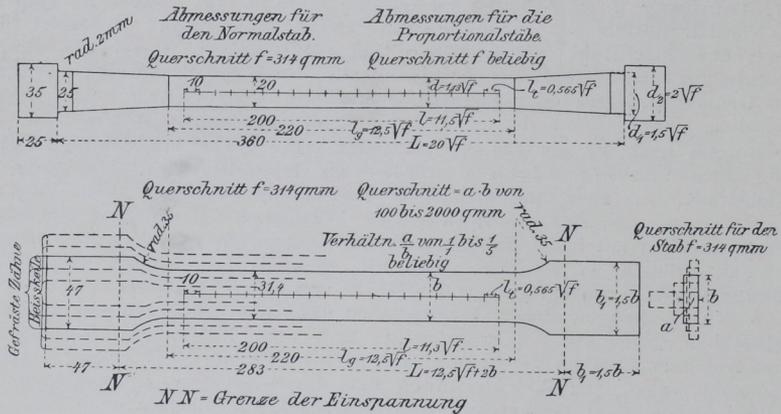


Fig. 107.

benutzten Fräse bemessen ist. Der Fräsensdurchmesser ist zu 7 cm angenommen; er darf aber zwischen 6 und 8 cm liegen.

158. Sollen prismatische Stäbe [Rund- oder Flachstäbe] ohne Köpfe zerrissen werden, so macht man zweckmässig die freie Stablänge zwischen den Einspannteilen $L = 20\sqrt{f}$ und benutzt als Messlänge $l = 11,3\sqrt{f}$ und als Länge der Theilung $l_t = 0,565\sqrt{f}$, wie beim Proportionalrundstab.

a. Zweifellos würde man, wenn die Wahl der Stabform ganz planmässig geschehen könnte und man nicht in gewissem Grade an das gebunden wäre, was in der technischen Welt zur Zeit weit verbreitet und zur Gewohnheit geworden ist, die Grundlage für das eben entwickelte System einfacher gestalten können. Insonderheit könnte man aber die Querschnitte der Normalstäbe unserm Gewichtssystem besser anpassen, indem man 2, 2,5 oder 5 qcm als Fläche wählt, so dass sich die Umrechnungen der Kräfte in Spannungen schnell im Kopf machen oder durch Anbringung der entsprechenden Bezeichnung auf den Gewichtsstücken ohne weiteres vermeiden lässt. Leider ist aber $f = 2 \text{ qcm}$ reichlich klein, $f = 5 \text{ qcm}$ erfordert kräftigere Maschinen und $f = 2,5 \text{ qcm}$ bringt Unbequemlichkeiten bezüglich der Gewichtsstücke mit sich.

b. Die oben entwickelten Stabformen erscheinen auf den ersten Blick sehr mannigfaltig und praktisch schwer benutzbar. Die Sache macht sich aber in Wirklichkeit nicht so schwierig, wie sie erscheint. Für die einzelnen Abmessungen der Normalflachstäbe und ebenso für die nach \sqrt{f} als Einheit bemessenen Proportionalstäbe werden Tabellen aufgestellt und Lehren für die Hauptabmessungen angefertigt. Diese Tabellen und Lehren werden wenig zahlreich, da man nicht jeden beliebigen Querschnitt für den Proportionalstab benutzt, sondern die Querschnitte stufenweise variiert. Die Stabformen bekommen dann nach diesen Stufen Nummern, die auch in die Lehren, Anreissstäbe und Procentmaassstäbe für die Dehnbarkeitsmessungen eingeschlagen sind, so dass die Handhabung und die Probenbearbeitung keine Unbequemlichkeiten bietet, nachdem man sich mit dem System ein klein wenig vertraut gemacht hat.

c. In Wirklichkeit wird man immer mit dem Umstande zu rechnen haben, dass die Stäbe niemals genau nach Vorschrift bearbeitet werden; man muss also die Querschnitte immer nach den Abmessungen feststellen. Um die Rechnungen thunlichst abzukürzen ist in der Literatur (*L 206—208*) eine Reihe von Tabellenwerken aufgetaucht, die für verschiedene Stabquerschnitte und Belastungen gleich die Spannungen aufzuschlagen gestatten. Will man sich mit Annäherungen zufriedien geben, so genügt zur Ausrechnung der gewöhnliche Rechenschieber; man muss eben bedenken, dass eine Genauigkeit von etwa $\pm 1^{\circ}_0$ für die meisten praktischen Fälle vollkommen ausreichend ist.

159. Aus den vorausgehenden Abschnitten ist klar zu erkennen, dass man die wahre Bedeutung der Ergebnisse der ZerreiBversuche nur dann erkennen kann und dass die Veröffentlichungen, ganz besonders der Werthe für die Bruchdehnung, eine wissenschaftliche Beachtung nur dann verdienen, wenn sie erkennen lassen, auf welche Weise und unter welchen Verhältnissen sie gewonnen wurden. Auch die im vorigen Absatz vorgeschlagenen Maassnahmen würden werthlos und übertrieben peinlich erscheinen müssen, wenn man den Dehnungswerth ohne Angabe der angewendeten Messlänge abgeben oder veröffentlichen wollte. Deswegen schlug ich in meinem Berichte über Kupferuntersuchungen (*L 110 S. 107*) vor,

dass man allgemein dem Werthe δ für die Bruchdehnung die Verhältnisszahl

$$n = l/\sqrt{f}$$

als Index beifügen, d. h. schreiben möge $\delta_n = x$. Für den Normalstab würde also zu setzen sein $\delta_{11,3} = x$.

Wenn ich auch schon mehrfach andeutete, dass sich alle Auslassungen in den Abschnitten 1 bis 9 im wesentlichen auf die Verhältnisse beziehen, wie sie beim ZerreiBversuch mit Metallstäben vorliegen, so will ich dies hier doch nochmals besonders betonen, um nicht auf falsche Bahnen zu leiten. Für andere Materialien und für andere Verhältnisse wird man überlegen oder durch den Versuch feststellen müssen, wie weit die in dem Vorausgehenden entwickelten Gesichtspunkte anwendbar sind.

Für Holz, Leder, Seide, Papier [Körper vom Dichtigkeitsgrad $\delta < 1$] sind z. B. andere Gesichtspunkte maassgebend. Steine, Cement, Beton u. s. w. wird man auf Zug an anderen Körperformen prüfen als die Metalle; Gewebe, Fäden Fasern oder Leim, Löthmaterialien u. s. w. erfordern besondere Maassnahmen und die Ergebnisse sind von anderen Faktoren beeinflusst, als sie in den vorausgehenden Abschnitten in Betracht gezogen werden konnten.

Es würde zu weit führen, wollte ich an dieser Stelle auf alle diese Punkte eingehen. Ich behalte mir vor, auf die wichtigsten Dinge bei Besprechung der Eigenschaften der einzelnen Materialien später zurück zu kommen.

10. Einfluss der Stabform auf σ_s , σ_B und $-\delta$.

160. Auch für die Druckspannungen gilt das Gesetz der Aehnlichkeiten. Man kann es aussprechen:

Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material erfahren unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen; sie haben also auch gleiche Quetsch- und Bruchgrenzen.

Hieraus kann man im Besonderen ableiten, dass bei Versuchen mit Würfeln von verschiedener Seitenlänge aus dem gleichen Material bei gleichen Spannungen $-\sigma$ auch die gleichen Höhenverminderungen $-\epsilon$, ausgedrückt in Procenten der ursprünglichen Höhe, erhalten werden. Also

auch die Zusammendrückbarkeit beim Bruch — δ muss die gleiche sein, gleichgiltig wie gross die Würfelseite gewählt wurde.

Das Aehnlichkeitsgesetz kann natürlich streng nur für solche Körper gelten, die in sich völlig gleichartig aufgebaut sind, d. h. auch geometrisch ähnliche Gefügeverhältnisse besitzen. Es kann beispielsweise auf Holz nur übertragen werden, wenn auch die Wachstumsverhältnisse in den verglichenen Proben dem Gesetz der Aehnlichkeiten entsprechen. Diese Ueberlegung war der Grund, weshalb ich z. B. für die von der Versuchsanstalt zu Charlottenburg und von der Forstakademie zu Eberswalde gemeinsam unternommene Untersuchung über die Festigkeitseigenschaften der Holzarten Preussens, die Entnahme von Würfeln vorschlug, derart, dass mit Scheiben aus verschiedenen Stammhöhen die Druckfestigkeit solcher Würfel mit einander in Vergleich gestellt werden konnte, deren eine Kante in die Rindenschicht und deren gegenüberliegende Kante in die Stammmitte fiel. Hierdurch konnten freilich die Forderungen des Gesetzes nicht streng erfüllt werden, aber es war ihnen doch möglichst weitgehend Rechnung getragen; man hat dabei allerdings die sehr verschiedenen Grössen der Würfel in den Kauf nehmen müssen.

161. In der That beweisen die Versuche von Gauthey, Soufflot, Perronnet (1774), Rondelet, Vicat (vor 1833), Bauschinger u. A. m. (*L 2* Heft 6 — *L 134*) die Richtigkeit des Gesetzes der Aehnlichkeiten hinsichtlich der Spannungen. In Tab. 17 sind einige Ergebnisse dieser

Tabelle 17. Druckfestigkeit geometrisch ähnlicher Körper.

Versuche von	No.	Abmessungen in cm						σ_B in at		Bemerkungen
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>f</i>	\sqrt{f}	$\sqrt{f/l}$	Einzel	Mittel	
S. Rondelet (vor 1833)	1	3	3	3	9	3	1	269		Gestein
	2	4	4	4	16	4	1	266		
	3	5	5	5	25	5	1	266		
	4	6	6	6	36	6	1	271	268	
	5	3	3	3	9	3	1	117		Anderes Gestein
	6	4	4	4	16	4	1	114		
	7	5	5	5	25	5	1	125		
	8	6	6	6	36	6	1	123	120	
	9	3	3	3	9	3	1	55		Anderes Gestein
	10	4	4	4	16	4	1	55		
	11	5	5	5	25	5	1	55		
	12	6	6	6	36	6	1	56	55	
Vicat (vor 1833)	13	2	2	2	4	2	1	74,0		Gips No. 4
	14	3	3	3	9	3	1	73,9	74,0	
	15	1,0	1,0	1,0	1,00	1,0	1	53,1		Feiner Sandstein
	16	1,5	1,5	1,5	2,25	1,5	1	52,0	52,6	
	17	1	1	1	1	1	1	33,5		Lufttrockener Ziegelthon
	18	2	2	2	4	2	1	33,4	33,5	
	19	1	1	1	1	1	1	18,0		Mörtel aus Fettkalk und Sand
	20	2	2	2	4	2	1	17,0	17,5	
Bauschinger (1872)	21	5,20	5,20	5,05	27,04	5,20	1,03	690		Sehr feiner graublauer Schweizersandstein, Druck senkrecht zum Lager
	22	6,00	5,85	5,70	35,10	5,93	1,04	670		
	23	6,70	6,70	6,55	44,89	6,70	1,03	680		
	24	8,40	8,20	8,50	68,88	8,30	0,98	710		
	25	8,50	8,50	8,70	72,25	8,50	0,98	708		
	26	9,95	9,85	9,60	98,01	9,90	1,03	680		
	27	10,00	9,85	9,70	98,50	9,92	1,02	685	689	

Tabelle 17. Fortsetzung.

Versuche von	No.	Abmessungen in cm						σ_{-B} in at		Bemerkungen
		a	b	l	f	\sqrt{f}	$\sqrt{f/l}$	Einzel	Mittel	
Vicat	28	1	1	2	1	1	0,50	42,0	41,7	Gips
	29	2	2	4	4	2	0,50	41,3		
	30	1	1	0,5	1	1	2,00	46,3	44,7	Gips
	31	2	2	1,0	4	2	2,00	43,1		
Bauschinger	32	6,60	6,50	4,75	42,90	6,55	1,38	676	677	Sehr feiner graublauer Schweizersandstein
	33	9,95	9,80	7,00	97,51	9,87	1,41	677		
Rondelet	34	1,75	—	—	2,41	—	—	14,5	14,3	Gips
	35	2,25	—	—	3,98	—	—	14,0		
(34 bis 39 kugelförmige Körper; f = Meridianschnitt)	36	1,78	—	—	2,49	—	—	10,1	10,0	Lufttrockener Ziegelthon
	37	2,28	—	—	4,08	—	—	9,9		
	38	1,70	—	—	2,27	—	—	6,02	5,84	Kreide und Sand
	39	2,50	—	—	4,91	—	—	5,66		
40 bis 43 Pyramidenstumpfe	40	1,00	—	—	{ 0,44 1,00 }	—	{ 45,5 20,0 }	46,2	20,4	Kreide a : a ₁ : l für 40 u. 41 = 1 : 0,66 : 1,6
	41	1,50	—	—	{ 1,00 2,25 }	—	{ 46,8 20,8 }			
	42	2,00	—	—	{ 1,00 4,00 }	—	{ 84,5 21,1 }	83,0	20,7	Gips No. 4, für 42 u. 43 = 1 : 0,5 : 1,5
	43	3,00	—	—	{ 2,25 9,00 }	—	{ 81,4 20,3 }			



Versuche angeführt; weitere Bestätigungen sind in den Arbeiten von Bauschinger (*L 2* Heft 6) und von mir (*L 135*) zu finden; auch Kick (*L 100*) theilt mehrere mit.

162. Schon die genannten französischen Autoren haben durch Versuche erwiesen, dass die Druckfestigkeit von der Gestalt der Querschnittsfläche und von der Länge des Prismas abhängig ist. Bauschinger leitete für Prismen ähnlicher Querschnittsform aus den Arbeiten dieser Forscher und aus seinen eigenen (*L 2* Heft 6) die folgende Abhängigkeit zwischen der Druckfestigkeit σ_{-B} , Probenlänge l und Probenquerschnitt f ab:

$$\sigma_{-B} = a + \beta \sqrt{f/l} \dots \dots \dots 13.$$

Hierin sind a und β Materialkonstanten, die aus Versuchsergebnissen zu bestimmen sind.

163. Für den Vergleich von Prismen unähnlicher Querschnittsform hat Bauschinger (*L 2* Heft 6) bei Prismen von nicht zu kleinen Verhältnissen $\sqrt{f/l}$ (nicht kleiner als 1/5) aus den im vorigen Absatz genannten Versuchen die Beziehung:

$$\sigma_{-B} = (a + \beta \sqrt{f/l}) \sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}}$$

abgeleitet; worin u der Umfang der Querschnittsfläche ist. Als Annäherungswerth führt Bauschinger an Stelle von:

$$\sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}} \text{ den Werth } \sqrt{\frac{f}{u/4}} \text{ ein.}$$

Um eine etwas kürzere Schreibweise zu haben, sei im Folgenden

für den ersten Werth das Zeichen γ , für den angenäherten das Zeichen γ' und für das Längenverhältniss \sqrt{f}/l das Zeichen $1/n$ (vgl. 149) gesetzt, so dass die Gleichung alsdann lautet:

$$\sigma_{-B} = \left(a + \beta \frac{1}{n} \right) \gamma.$$

Der von der Querschnittsform abhängige Werth γ , beziehentlich γ' nimmt für die bei Materialprüfungen allenfalls in Betracht kommenden Fälle folgende Werthe an:

- für den quadratischen Querschnitt $\gamma = 1,000$ $\gamma' = 1,000$
- für den kreisförmigen Querschnitt $= 1,062$ — $1,128$
- für das gleichseitige Dreieck $= 0,937$ — $0,877$
- für das Rechteck mit dem Seitenverhältniss a/b wird für $a = 1$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sqrt{f}}{u/4}} = \sqrt{\frac{\sqrt{b}}{2(b+1)}} \text{ oder } \gamma' = \frac{\sqrt{b}}{\frac{1}{2}(b+1)}, \text{ also}$$

für die folgenden Verhältnisse:

$b =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\gamma =$	1,000	0,971	0,931	0,894	0,863	0,837	0,813	0,793	0,775	0,758	0,744	0,730
$\gamma' =$	1,000	0,943	0,866	0,800	0,745	0,700	0,662	0,629	0,600	0,575	0,553	0,533

Aus der Form der Gleichung:

$$\sigma_{-B} = \left(a + \beta \frac{1}{n} \right) \gamma$$

ergibt sich, dass die Ausgleichlinien durch eine Reihe von Beobachtungsergebnissen an Prismen gleichen [bez. geometrisch ähnlichen] Querschnittes

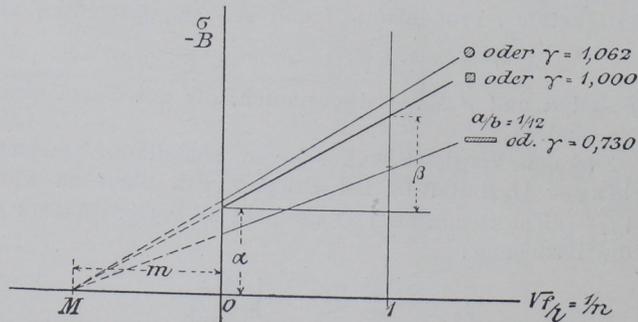


Fig. 108.

von verschiedener Länge, aber aus gleichem fehlerfreiem und ganz gleichmässigem Material durch eine gerade Linie gegeben ist und dass jeder Querschnittsform eine bestimmte Linie entspricht; man erkennt auch, dass diese Linien nach Maassgabe von Fig. 108 von einem Punkte M ausstrahlen

müssen, vorausgesetzt, dass die Bauschingersche Form der Gleichung streng richtig ist. Die an Prismen quadratischen Querschnittes von verschiedenem Längenverhältniss gewonnenen Werthe würden in die mit einem Quadrat bezeichnete stark ausgezogene Linie und die an Cylindern gewonnenen Werthe in die mit einem Kreis bezeichneten Linien fallen müssen, während alle Werthe für Prismen mit rechteckigen Querschnitten in den durch die Linie $a/b = 1/12$ begrenzten Raum eingehen müssten. Die Werthe α und β würden an der Linie für den quadratischen Querschnitt unmittelbar abzulesen und die Lage von M nach Fig. 108 durch $m = \alpha/\beta$, also durch das Verhältniss der beiden Materialkonstanten gegeben sein. Die Festigkeit eines Würfels (d. h. $\sqrt{f/l} = 1$) von beliebiger Grösse würde ohne weiteres gleich der Summe $\alpha + \beta$ der Materialkonstanten sein.

164. Zieht man über das im Absatz 161 Gesagte die von mir in meiner Arbeit „über den Einfluss der Körperform auf die Ergebnisse von Druckversuchen“ (*L 135*) zusammengestellten Versuchsergebnisse zu Rathe, so findet man eine ziemlich allgemeine Bestätigung dafür, dass die Bruchfestigkeiten proportional dem Werthe $1/n = \sqrt{f/l}$ wachsen.

Aus den in der Quelle gegebenen Tabellen stelle ich folgende Werthe (Tab. 18, S. 114) zusammen.

In dieser Tabelle ist zugleich eine Uebersicht über die Grösse der Abweichungen zwischen den beobachteten Werthen für σ_B und für die nach den nebengeschriebenen Ausgleichsformeln berechneten Werthe gegeben. Die von Bauschinger nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Formel stimmt nicht immer mit der von mir unter den in der Quelle (*L 135*) bezeichneten Umständen aus dem zeichnerischen Ausgleich gewonnenen Formeln überein, aber die Abweichungen sind keine übermässigen, und ich glaube für den zeichnerischen Ausgleich den Vortheil der grösseren Anschaulichkeit und der ungezwungenen Berücksichtigung des Gewichtes der Einzelwerthe in Anspruch nehmen zu können, wenigstens so lange es sich um die praktische Verwerthung der Ergebnisse handelt.

165. Die Bestätigung der in Absatz 163 angeführten Formen der Gleichung für die Umrechnung der an Prismen von beliebiger Form gewonnenen Ergebnisse auf das Prisma von quadratischem Querschnitt hat sich nicht ganz allgemein ergeben. Die Versuche müssen vielmehr nach dieser Richtung noch erweitert werden; vielleicht spielt doch nicht allein die Querschnittsform eine Rolle, sondern die Eigenart des Materials macht sich auch noch geltend.

a. Meine eigenen Versuche (*L 135*) zur Bestätigung der Bauschingerschen Form für den Werth γ , die ich mit Gusseisenprismen von verschiedenen Querschnittsformen und von verschiedenen Längenverhältnissen anstellte, gaben mir Anlass, die folgenden Beziehungen aufzustellen.

Ein Versuch, das zeichnerische Ausgleichverfahren zur Bestimmung der Werthe von γ nach Anleitung von Fig. 108 zu benutzen, lieferte bei Verwerthung der Bauschingerschen Versuchsergebnisse für Prismen von quadratischem und kreisförmigem Querschnitt aus einer Platte feinkörnigen gelben Buntsandsteines [Versuche 68 bis 85 Tab. 3 und Fig. 7c der Quelle] für

$$\left. \begin{array}{l} \text{das Quadrat } \sigma_{\square} = 353 + 111 \frac{1}{n} \\ \text{den Kreis } \sigma_{\circ} = 392 + 122,3 \frac{1}{n} \end{array} \right\} m = \frac{\alpha}{\beta} = 3,18$$

und dementsprechend für das Verhältniss:

Tabelle 18. Druckversuche mit Prismen ähnlichen Querschnittes von verschiedenem Längenverhältniss $1/n$.

Gegenüberstellung der beobachteten und berechneten Werthe.

Ver- such No.	$\frac{1}{n}$	Querschnitts-		σ beob- achtete at	Berechnet nach		Abweichungen		Bemerkungen		
		form	$\frac{a}{b}$		Bau- schinger σ_1 at	Schaubild σ_2 at	$\frac{\sigma}{\sigma_1} \cdot 100$	$\frac{\sigma}{\sigma_2} \cdot 100$			
35	0,35	□	I	444	374	437	119	102	Bauschinger; sehr feiner graublauer Schweizer-Sandstein; Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschinger: $\sigma_B = 262 + 320 \frac{1}{n}$ at Ausgleich nach Schaubild: $350 + 249,4 \frac{1}{n}$ at		
36	0,50		"	"	470	422	474	111		99	
37	0,69		"	"	557	482	522	115		106	
38	1,02		"	"	602	588	604	102		100	
39	1,02		"	"	587	588	604	100		97	
40	1,41		"	"	677	713	726	95		93	
41	1,38		"	"	676	704	694	96		97	
42	1,66		"	"	755	793	764	95		99	
43	1,80		"	"	659	838	799	78		83	
44	2,12		"	"	890	935	877	95		102	
45	2,19		"	"	1145	962	898	119		127	
46	3,36		"	"	1540	1332	1187	116		130	
51	0,98		□	I	705	648	670	108		105	Bauschinger; derselbe Sandstein, Druck senkrecht zum Lager. Ausgleich nach Bauschinger: $\sigma_B = 310 + 346 \frac{1}{n}$ at Ausgleich nach Schaubild: $360 + 317 \frac{1}{n}$ at
52	0,98			"	"	710	648	670		109	
53	1,02	"		"	685	662	682	104	101		
54	1,03	"		"	680	665	685	102	99		
55	1,03	"		"	680	665	685	102	99		
56	1,03	"		"	690	665	685	104	101		
57	1,04	"		"	670	669	689	100	97		
58	2,31	"		"	910	1106	1090	82	83		
59	2,34	"		"	1130	1110	1100	102	103		
60	2,39	"		"	1080	1135	1115	95	97		
61	2,98	"		"	1880	1685	1620	112	116		
62	4,18	"		"	1750	1750	1680	100	104		
63	4,32	"		"	1950	1800	1720	108	114		
68	0,25	□		I	381	377	377	101	101	Bauschinger; feinkörniger gelber Buntsandstein von Heilbronn in Württemberg. Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschinger: $\sigma_B = 347 + 121 \frac{1}{n}$ at Ausgleich nach Schaubild: $347 + 119,2 \frac{1}{n}$ at	
69	0,32		"	"	380	386	385	99	99		
70	0,40		"	"	395	395	395	100	100		
71	0,47		"	"	418	404	403	104	104		
72	0,73		"	"	440	435	434	101	101		
73	1,15		"	"	446	487	484	92	92		
74	1,54		"	"	463	534	530	87	87		
75	2,36		"	"	628	632	627	99	100		
76	3,37		"	"	790	755	747	105	106		
77	0,23		○	—	451	395	427	114	106		Bauschinger; derselbe Sandstein, Cylinder; Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschinger: $\sigma_B = 369 + 115 \frac{1}{n}$ at Ausgleich nach Schaubild: $400 + 116,4 \frac{1}{n}$ at
78	0,28	"		—	467	401	433	117	108		
79	0,35	"		—	464	409	441	113	105		
80	0,41	"		—	427	416	448	103	95		
81	0,67	"		—	463	446	478	104	97		
82	1,10	"		—	480	495	528	97	91		
83	1,31	"		—	494	520	552	95	90		
84	2,04	"		—	602	604	637	100	95		
85	2,70	"		—	806	680	714	118	113		

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_{\square}} = \gamma = \frac{392}{353} = \frac{122,3}{111} = 1,11$$

also nahezu die von Bauschinger gegebene Annäherung $\gamma' = 1,13$.

Für Hartblei fand ich nach eigenen Versuchen, wenn ich die beobachteten

Werthe für Würfel und Cylinder vom Verhältniss $\frac{1}{n} = 1$ benutze:

$$\gamma = \frac{\sigma_o}{\sigma_{\square}} = \frac{830}{773} = 1,07$$

und wenn ich die aus der Ausgleichlinie entnommenen Werthe $\left(\sigma_B = 663 + 130,4 \frac{1}{n}\right)$ einsetze:

$$\gamma = \frac{\sigma_o}{\sigma_s} = \frac{830}{663 + 130} = 1,05.$$

b. Meine Versuche mit Gusseisen (L 135) lieferten mir die folgenden Gleichungen:

$$\sigma_s = 4190 + 1437 \frac{1}{n} \text{ und}$$

$$\sigma_o = 4320 + 1417 \frac{1}{n}$$

Diese beiden Gleichungen können also an sich schon die Bauschingerschen Werthe γ nicht liefern; man kommt, wenn man die an Prismen rechteckigen Querschnittes erhaltenen Werthe mit in die Betrachtung hineinzieht, sogar zu der Anschauung, dass die Gleichungen nach meinen Versuchen eine andere Form annehmen müssen, wenn sie den gefundenen Werthen einigermaßen genügen sollen. Der zeichnerische Ausgleich (Fig. 11 u. 12 der Quelle) zeigte, dass die in den einzelnen Gruppen an rechteckigen Prismen von verschiedenem Breiten-

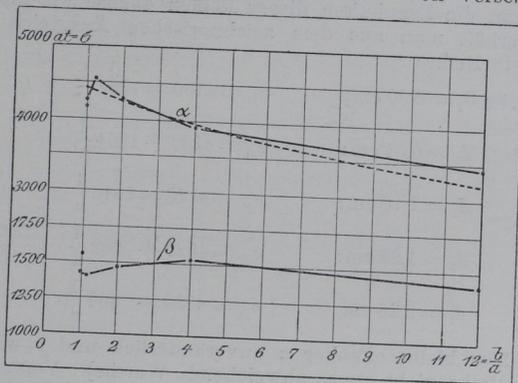


Fig. 109.

Gusseisen. Abhängigkeit von α und β vom Seitenverhältniss b/a des rechteckigen Querschnittes.

verhältniss zwischen $b/a = 1$ bis 12 gefundenen Ausgleichlinien nahezu parallelen Verlauf hatten. Die einzelnen Versuchsreihen ergaben folgende Ausgleichungen für:

$b/a = 1,00$	$\sigma = 4190 + 1437 \frac{1}{n}$
$b/a = 1,00$	$\sigma = 4250 + 1557 \frac{1}{n}$
$b/a = 1,15$	$\sigma = 4570 + 1403 \frac{1}{n}$
$b/a = 2,00$	$\sigma = 4280 + 1467 \frac{1}{n}$
$b/a = 4,00$	$\sigma = 3900 + 1533 \frac{1}{n}$
$b/a = 8,00$	[die Versuchsreihe zeigt ganz abweichende Werthe]
$b/a = 12,00$	$\sigma = 3460 + 1417 \frac{1}{n}$

Trägt man die Werthe von α und β nach wachsendem Breitenverhältniss b/a in Fig. 109 auf, so erkennt man leicht die gesetzmässige Veränderung in den Linien α und β , namentlich aber von α . Den Werth β darf man vielleicht als unabhängig von b/a betrachten. Der Mittelwerth für β ergibt sich aus der vorstehenden Reihe zu:

$$\beta = 1469$$

und wenn man versucht, wie sich nach dem Bauschingerschen Werth γ der Werth a mit wachsendem b/a verändern würde, so kann man unter Zuhilfenahme der Tabelle für γ (S. 112) und des schätzungsweise angenommenen Werthes $a = 4400$ at für den quadratischen Querschnitt, die in Fig. 109 punktirt eingetragene Linie für die Werthe a errechnen, die ziemlich gut mit den durch das zeichnerische Ausgleichsverfahren ermittelten Werthen stimmt. Man darf hiernach als rohe Annäherung für das untersuchte Gusseisen [gewöhnlicher Maschinenguss] also wohl setzen (für $a = 1$):

$$\sigma_B = a\gamma + \beta \frac{1}{n} \text{ und zwar } = 4400 \sqrt{\frac{Vb}{\frac{1}{2}(b+1)}} + 1469 \frac{1}{n}.$$

c. Mit röhrenförmigen Körpern, aus der gleichen Gusseisenplatte geschnitten, sind von mir mehrere Versuchsreihen gemacht, bei denen in einer Reihe der äussere Durchmesser d gleich blieb, während die Länge l des Prismas und der innere Durchmesser d_1 sich änderte, und in der zweiten Reihe beide Durchmesser in der Weise wuchsen, dass die Ringfläche f und die Länge l die gleiche Grösse beibehielten [L 135 Versuche 193 bis 231].

Behandelt man die Ergebnisse dieser Reihen ebenso wie die vorausgehend besprochene, so erhält man aus dem zeichnerischen Ausgleich die folgenden Werthe für die erste Reihe:

$$\begin{aligned} \text{für } d_1 = 0,00 \text{ cm:} & \quad \sigma_B = 4160 + 1382 \frac{1}{n} \\ d_1 = 0,55 \text{ cm:} & \quad \sigma_B = 4130 + 1204 \frac{1}{n} \\ d_1 = 1,10 \text{ cm:} & \quad \sigma_B = 4120 = 1040 \frac{1}{n} \\ d_1 = 1,69 \text{ cm:} & \quad \sigma_B = 4520 + 662 \frac{1}{n} \\ d_1 = 2,26 \text{ cm:} & \quad \sigma_B = 4220 + 600 \frac{1}{n}. \end{aligned}$$

Man sieht, hier bleibt offenbar a unveränderlich und β wird veränderlich [nur die vorletzte Reihe giebt etwas abweichende Werthe]. Versucht man ähnlich wie in Fig. 109 einen Ausgleich für β , so erhält man (Fig. 14 der Quelle) die Ausgleichung:

$$\sigma_B = a + \beta \frac{1}{n} \sqrt{\frac{d-d_1}{d}} = 4230 + 1380 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

worin 4230 der Mittelwerth aus der obigen Zusammenstellung ist.

Aus der Reihe, die mit Röhrechen von gleichem f und l , aber wechselndem d und d_1 angestellt wurden, leitete ich die Ausgleichung:

$$\sigma_B = 4400 + 1400 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{d-d_1}{d}} \text{ ab.}$$

Stellt man die für den kreisförmigen und ringförmigen Querschnitt gefundenen Gleichungen zusammen, so ergibt sich:

$$\text{für den Kreis} \quad \sigma_B = 4320 + 1417 \frac{1}{n}$$

$$\text{für den Ring} \quad \sigma_B = 4230 + 1380 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

$$\text{desgl.} \quad \sigma_B = 4400 + 1400 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{d-d_1}{d}}$$

und wenn man die Mittelwerthe der Konstanten bildet, so erhält man:

$$a = 4317 \text{ und } \beta = 1399.$$

Nach meinen Versuchen mit Gusseisen würde sich also [als rohe Annäherung] für den quadratischen Querschnitt ableiten lassen:

$$\sigma_{B\Box} = a\gamma + \beta \frac{1}{n} = 4400 \cdot 1 + 1469 \frac{1}{n}.$$

und für den Cylinder:

$$\sigma_{B\circ} = a + \beta \frac{1}{n} \gamma = 4317 + 1399 \frac{1}{n} \cdot 1.$$

Für das Längenverhältniss $1/n = 1$ würde sein:

$$\frac{\sigma_{\circ}}{\sigma_{\Box}} = \frac{4317 + 1399}{4400 + 1469} = \frac{5716}{5869} = 0,974,$$

während für die drei unmittelbar vergleichbaren beobachteten Werthe sich ergibt für:

$$\frac{1}{n} = 0,20 \quad 1,00 \text{ und } 2,00$$

$$\frac{\sigma_{\circ}}{\sigma_{\Box}} = 0,945 \quad 1,23 \text{ und } 0,954.$$

Man sieht also, dass für Gusseisen der Vergleich zwischen dem kreisförmigen und quadratischen Querschnitt noch nicht nach den Bauschingerschen Zahlenwerthen vorgenommen werden kann. Es bedarf jedenfalls weiterer Versuche um die bestehenden Widersprüche aufzuklären, Versuche die jedenfalls auch auf andere Materialien auszudehnen sind.

166. Nach dem Gesetz der Aehnlichkeiten müssen geometrisch ähnliche Körper unter den gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderungen, d. h. also beim Druckversuch gleiche Verkürzungen $-\varepsilon$ erfahren. Kiek (*L 100* S. 43) hat einige Beobachtungen hierüber mitgetheilt, die in der folgenden Tabelle wiedergegeben seien.

Tabelle 19. Verkürzung geometrisch ähnlicher Körper unter gleicher Druckspannung.

Die Kickschen Beobachtungswerthe sind auf $-\sigma$ und $-\varepsilon$ umgerechnet.

a) Cylinder aus bildsamer Porzellanmasse $d = 5,1$ und $3,5$ cm und $l = 6,6$ und $4,4$ cm.

Druckspannungen $-\sigma$ at =	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Verkürzung											
$-\varepsilon$ für $d = 5,1$	0,000	0,050	0,119	0,203	0,297	0,396	0,474	0,525	0,563	0,592	0,614
$d = 3,5$	0,000	0,054	0,125	0,213	0,310	0,409	0,473	0,516	0,548	0,574	0,598

b) Cylinder aus Kupfer $d = 1,8$; $1,5$ und $1,0$ cm und $l = 1,8$; $1,5$ und $1,0$ cm.

Druckspannungen $-\sigma$ at =	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7870	8000
Verkürzung										
$-\varepsilon$ für $d = 1,8$	0,000	0,027	0,069	0,132	0,208	0,284	0,358	0,420	0,457	0,462
$d = 1,5$	Das Schaubild fällt nahezu mit demjenigen für $d = 1,8$ cm zusammen ¹⁾									
$d = 1,0$	—	—	—	—	—	—	—	—	0,460	—

Es ist jedenfalls erwünscht, auch hier die Zahl der bestätigenden Versuche zu vermehren.

In den Uebungen liess ich durch die Studirenden folgende Aufgabe bearbeiten.

Aufgabe: An Cylindern und Prismen von quadratischem Querschnitt aus

¹⁾ Die einzelnen Beobachtungswerthe sind im Original nicht mitgetheilt.

Flusseisen soll der Einfluss der Probenform auf das Ergebniss des Druckversuches festgestellt werden.

Zur Verfügung standen 3 Probenreihen mit den Verhältnissen

$$\frac{1}{n} = \sqrt{f/l} = 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,33 \text{ und } 2,0.$$

Davon Reihe *a* mit quadratischem, Reihe *b* und *c* mit cylindrischem Querschnitt. Die Querschnitte in Reihe *a* und *b* waren nahezu gleich, nämlich $f = 6,71$ bis $6,76$ qcm, und in Reihe *c* war $f = 8,50$ bis $8,55$ qcm. Um den immerhin ungeübten Beobachtern die Sache nicht zu erschweren, wurde angeordnet, dass die Versuche auf der 100 t-Pohlmeyer-Maschine ausgeführt und die Verkürzungen nicht am Probestab unmittelbar, sondern als Tischverschiebungen gemessen werden sollten. In diese Messungen mussten also selbstverständlich die elastischen Formänderungen des Querhauptes und der Zugstangen bis zum Ablesepunkt, sowie die Zusammenrückungen der Druckplatten eingehen, indessen ist der Einfluss dieser Fehlerquellen ein gesetzmässiger, der zur Noth leicht bestimmbar und bei Bearbeitung des Ergebnisses berechenbar gewesen wäre. Ich gebe hier die Endergebnisse der Versuche, ohne Berücksichtigung der genannten Fehlerquelle.

Wie man aus Tab. 20 erkennt, sind die an geometrisch ähnlichen Prismen (*b* und *c*) ermittelten Verkürzungen $-\epsilon$ für gleiche Spannungen $-\sigma$ nahezu gleich. Sie sind kleiner beim Kreisquerschnitt, als bei Körpern von gleichem Längenverhältniss $1/n$ in quadratischem Querschnitt. Wenn sich die Körper nicht

Tabelle 20. Einfluss der Probenform auf die Verkürzungen $-\epsilon$ beim Druckversuch.

Reihe	<i>a</i>			<i>b</i>			<i>c</i>			<i>a</i>			<i>b</i>			<i>c</i>		
Querschnittsform <i>a</i> oder <i>d</i> in cm <i>f</i> in qcm <i>l</i> in cm	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○
	2,59	2,93	3,29	2,59	2,93	3,30	2,59	2,93	3,30	2,60	2,93	3,30	2,60	2,93	3,30	2,60	2,93	3,29
	6,71	6,74	8,50	6,71	6,74	8,55	6,71	6,74	8,55	6,76	6,74	8,55	6,76	6,74	8,55	6,76	6,74	8,50
	1,30	1,30	1,47	1,95	1,95	2,20	2,59	2,58	2,93	3,25	3,24	3,64	6,50	6,49	7,32	13,0	13,0	14,7
$\frac{1}{n} = \sqrt{f/l}$	2,00			1,33			1,00			0,80			0,40			0,20		
$\gamma = \sqrt{f/l} \cdot u/4$	I	I,06	I,06	I	I,06	I,06	I	I,06	I,06	I	I,06	I,06	I	I,06	I,06	I	I,06	I,06
$-\sigma$ in at	$-\epsilon \cdot 10^{-3}$			$-\epsilon \cdot 10^{-3}$			$-\epsilon \cdot 10^{-3}$			$-\epsilon \cdot 10^{-3}$			$-\epsilon \cdot 10^{-3}$			$-\epsilon \cdot 10^{-3}$		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	13	12	11	15	13	8	10	9	11	7	7	7	0	0	0	0	0	0
2000	32	30	27	39	29	22	25	21	19	18	18	18	4	3	3	4	3	2
3000	57	54	56	67	54	42	57	48	47	51	46	46	10	7	5	8	4	6
4000	99	88	82	105	87	74	93	79	82	89	87	87	47	33	26	18	27	34
5000	157	134	140	156	128	113	144	122	127	141	121	121	87	62	50			
6000	223	181	180	210	180	164	204	174	178	202	176	178						
7000	283	235	246	269	234	217	264	227	235	261	235	237						
8000	336	289	299	321	289	273	324	285	290	321	294	297						
9000	383	338	350	370	342	324	377	335	345	376	345	352						
10000	425	383	395	411	391	371	422	382	390	422	397	399						
11000	465	419	(435)	450	433	413	460	428	433	467	449	448						
12000	499	—	(472)	486	472	450	497	457	467	504	478	—						
13000	533	—	—	518	507	—	528	490	—	536	522	—						
14000	563	—	—	547	532	—	557	529	—	562	541	—						
15000	582	—	—	573	—	—	580	542	—	582	565	—						
σ_s in at =	—	—	—	—	—	—	2160	—	2340	2150	(2690) ¹⁾	2300	2190	2380	2320	—	2230	2310
$-\epsilon_s \cdot 10^{-3} =$	—	—	—	—	—	—	0,027	—	0,024	—	(0,040) ¹⁾	—	0,012	—	0,011	—	0,005	—

¹⁾ Unsicher, wahrscheinlich schon überschritten.

sehr weit vom Längenverhältniss $l/n = 1$ entfernen, so ist die Verkürzung $-\varepsilon$ wenig beeinflusst. Bildet man aus dreien hierfür in den Reihen *a* bis *c* gefundenen Werthen Mittelwerthe durch Ausgleichung auf zeichnerischem Wege [Uebereinanderzeichnen der einzelnen Schaulinien in den Gruppen *a*, *b* oder *c* und Einzeichnen der Ausgleichlinie nach dem Augenmaass] Fig. 110, so findet man, dass die Linien für *b* und *c* zusammenfallen und *a* ähnlichen Verlauf hat. In Fig. 110

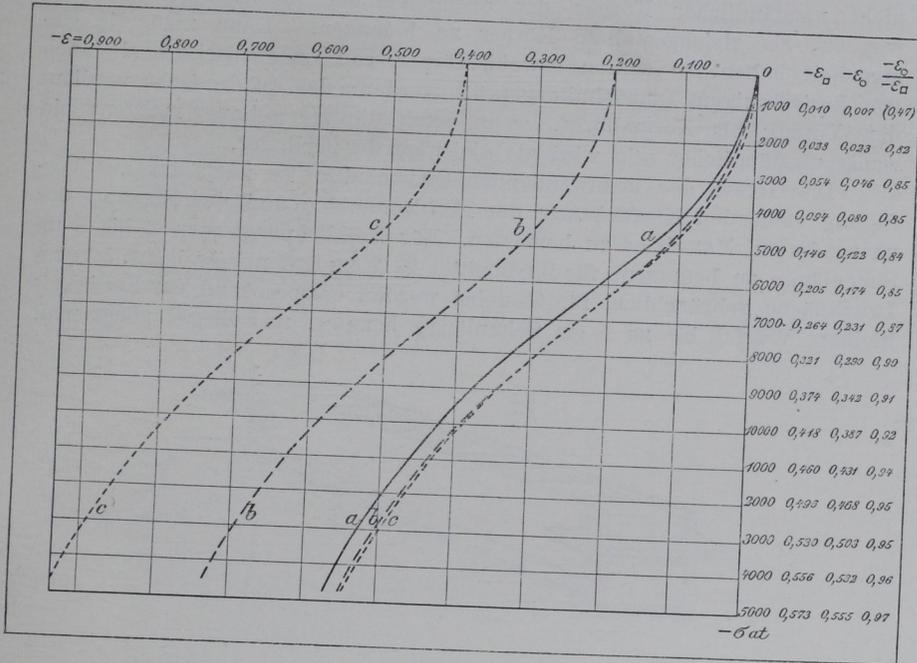


Fig. 110.

Einfluss der Probenform auf die Verkürzungen $-\varepsilon$ beim Druckversuch.

sind für gleiche Spannungen auch die Verhältnisse von $-\varepsilon_0 / -\varepsilon_{\square}$ eingeschrieben; man findet: $-\varepsilon_0 / -\varepsilon_{\square}$ zwischen 0,82 und 0,97, mit der Spannung $-\sigma$ wachsend. Das Verhältniss der Spannungen für gleiche Formänderungen würde also annähernd sein:

$$\frac{-\sigma_0}{-\sigma_{\square}} = \frac{1}{0,82} \text{ bis } \frac{1}{0,97} = 1,22 \text{ bis } 1,03,$$

was also ungefähr den von Bauschinger aufgestellten Werthen von γ entsprechen würde.

11. Ueber die bei den Druckversuchen anzuwendenden Stabformen.

167. Druckversuche pflegt man in der Regel mit würfelförmigen oder cylindrischen Probekörpern anzustellen; letztere werden dann meistens mit einer Länge l gleich dem Durchmesser d angewendet. Aus den vorausgehenden Betrachtungen wird aber einleuchten, dass man einen wesentlich besseren Einblick in die Materialeigenschaften bekommt, wenn die Probenform so gewählt wird, dass sich aus den Versuchen die Materialkonstanten α und β ergeben. Hierzu würde es ausreichend sein, wenn man mit einer Reihe von 5 Probekörpern vom Längenverhältniss

$$1/n = 0,25; 0,5; 1,0; 2,5 \text{ und } 5 \text{ d. h.}$$

$$l = 4, 2, 1, 0,4 \text{ und } 0,2 \sqrt{f}$$

arbeitet. Um einen zuverlässigen Mittelwerth zu erzielen, muss man ja ohnehin eine grössere Anzahl Körper [für Metalle zweckmässig fünf, für Gesteine und Bindemittel zehn Stück] prüfen. Da ist es dann meistens nicht umständlicher Körper der obengenannten Abmessungen zu verwenden, als gleichgestaltete Körper zu benutzen. Kann man die Gelegenheit haben, so sollten sowohl Körper von quadratischem als auch von kreisförmigem Querschnitt geprüft werden; der quadratische verdient den Vorzug als Normalform, wenn auch die Herstellung meistens ein wenig umständlicher sein wird als diejenige der Cylinder.

Die Grösse der anzuwendenden Querschnitte ist nach der zur Verfügung stehenden Kraftleistung der Probirmaschine und der Eigenart des zu prüfenden Materiales zu bemessen. Für Metalle pflegt man 2 bis 3 cm Seitenlänge zu benutzen; für Bindemittel ist 7 cm Seitenlänge bezw. 50 qcm Druckfläche gebräuchlich, für Gesteine werden entsprechend der Festigkeit kleinere Würfel bis zu 5 cm Seitenlänge benutzt, und Ziegel pflegt man

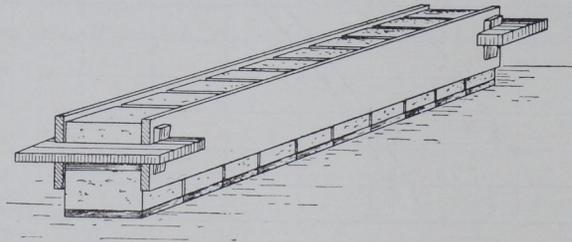


Fig. 111.

entweder als Ganzes von der grossen Seite aus zu drücken, oder man zersägt sie in zwei Hälften und mauert sie dann mit reinem Portlandcement auf einander, so dass sie nahezu einen würfelförmigen Körper bilden. Das letztere Verfahren ist zur Zeit auf Grund der Empfehlung der „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren“ in unseren öffentlichen Prüfungsanstalten fast allgemein eingeführt. Beton sollte man niemals an kleineren Körpern als von 20 cm Seitenlänge prüfen und wo es die Maschinen zulassen immer noch grössere Körper anwenden. Die Charlottenburger Versuchsanstalt benutzt, wenn irgend möglich, Würfel von 40 und 50 cm Kantenlänge. Bach (*L 136*) wendet Cylinder von 25 cm Durchmesser und 25 oder 100 cm Länge für die Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Beton an.

a. Wie schon im Absatz 104 angedeutet, spielt die Beschaffenheit der Druckflächen eine grosse Rolle bei den Druckversuchen. Diese Flächen müssen eben bearbeitet oder sauber abgeglichen sein. Deswegen pflegt man Steine mit rauher poröser Oberfläche oder solche Steine mit unebenen Flächen, deren Eigenschaften man durch Hobeln oder Abschleifen verändern würde, mit einer Decke von Mörtel oder Cement abzugleichen, um so eine ebene Druckfläche zu schaffen. Dies geschieht besonders bei der Prüfung von Ziegeln. Hierbei legt man [nach Bauschingers Vorschlag] die aus den zersägten Steinen durch Aufeinandermauern gebildeten Ziegelwürfel nach Maassgabe von Fig. 111 auf eine ebene Tischplatte zwischen zwei Bretter, deren gerade Oberkanten parallel zur Tisch-

fläche sind. Die Bretter werden an den Steinen so festgeklemmt, dass die Brett-oberkanten etwas überstehen. Die auf die Steinoberflächen gebrachte Schicht von Portlandcementbrei wird dann nach dem Anziehen des Cementes über den Brettkanten mittelst Lineals eben gestrichen, so dass sich eine oben ebene Schicht von etwa 0,5 bis 1 cm Stärke auf den Steinen bildet. Nach dem Erhärten werden die gemeinsam bearbeiteten Körper durch Zerschneiden der Cementschicht in den Fugen getrennt und dann die ganzen überliegenden Druckflächen der Würfel in derselben Weise abgeglichen. Beide Flächen werden hierauf eben-geschliffen.

b. Bei der Benutzung dieses Verfahrens darf man indessen nicht ausser Acht lassen, dass mit der Herstellung und Benutzung solcher würfelförmiger Probenkörper noch keineswegs ohne weiteres die Gewinnung gleicher Druckfestigkeiten verknüpft ist, wie sie an einem einheitlichen Würfel aus dem gleichen Ziegelmaterial gefunden sein würde. Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material geben keineswegs die gleichen Druckfestigkeiten, wenn sie einmal aus einem Stück, das andere Mal aus mehreren Stücken zusammengesetzt sind.

Vicat, Bauschinger u. A. (*L 135*) haben diesen Fall untersucht. Vicat

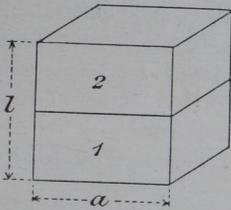


Fig. 112.

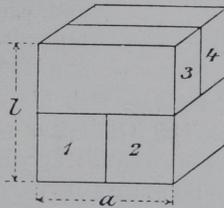


Fig. 113.

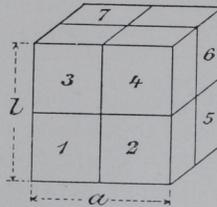


Fig. 114.

fand z. B. an Würfeln aus Gips, die er nach Maassgabe von Fig. 112, 113 und 114 bildete, die Druckfestigkeiten gegen diejenige des Würfels aus einem Stück

Würfel aus	1	2	4	8	Stücken
Verhältnisse für σ_B	= 1	0,94	0,89	0,88	

Ob bei fester Verbindung der Theile durch ein Bindemittel die Unterschiede in den Druckfestigkeiten zusammengefügt und einheitlicher Körper ganz verschwinden, kann nur an der Hand von Versuchen entschieden werden.

Ueber solche Versuche spricht Bauschinger (*L 2* Heft 10, S. 7 u. f.). Er sagt, dass er zuweilen beim Zerdrücken von Würfeln aus zwei auf einander gemauerten Ziegelsteinhälften grössere¹⁾ Bruchfestigkeiten gefunden habe, als an Steinen, die er nach dem Abgleichen der Druckflächen mit Cementmörtel und unter Benutzung von Filzzwischenlagen am ganzen Stein gefunden hat. „Dieses, auf den ersten Anblick auffällige Resultat“, sagt Bauschinger, „erklärt sich wohl aus dem Gebrauch von Filzbeilagen bei meinem älteren Verfahren und vielleicht auch aus der anderen Beschaffenheit der Mörtelbänder“ [reiner Cement bei den würfelförmlichen Proben und Mörtel aus 1 Cement + 3 Sand bei seinen älteren Versuchen]. Das weitere Studium dieser Frage würde, wie man sieht, von grossem Nutzen sein. (Vergl. auch 105.)

b. Biegungsfestigkeit.

1. Begriffsentwickelungen.

168. Für das eigentliche Materialprüfungswesen werden Biegeversuche nur in beschränktem Maasse angewendet, und man sucht in diesen Fällen den Vorgang so einfach wie möglich zu gestalten. Es wird also genügen,

¹⁾ Nach dem in Absatz 162 S. 111 Gesagten müsste mit abnehmendem $1/n$ auch σ_B kleiner werden.