

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:

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

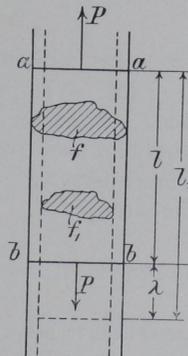


Fig. 3.

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,

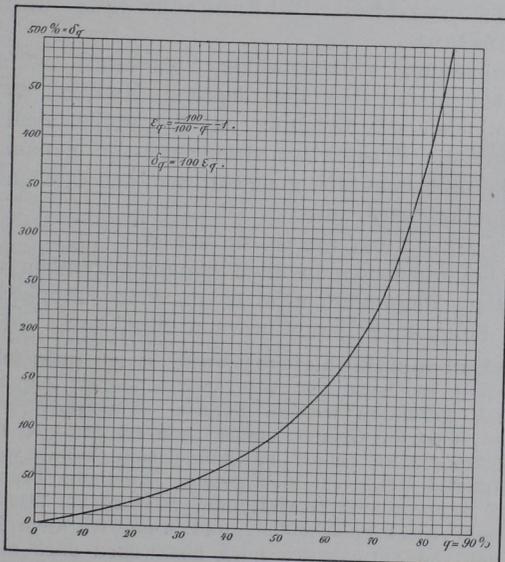


Fig. 4.

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 .

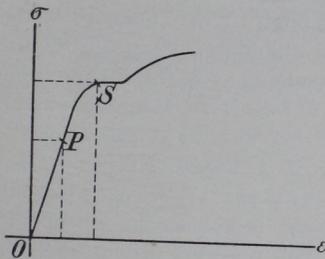


Fig. 5.

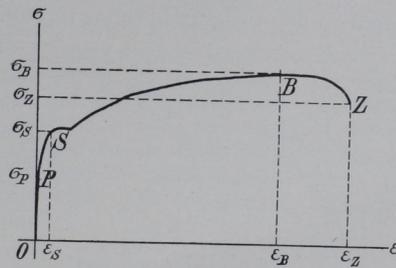


Fig. 6.

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.

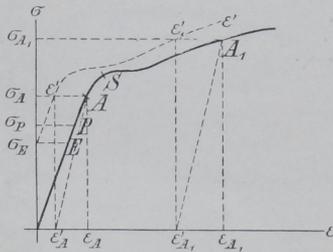


Fig. 7.

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 Vertrage mit dem Ausdrücke „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.

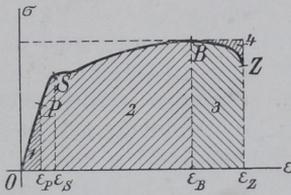


Fig. 9.

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:

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

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

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

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

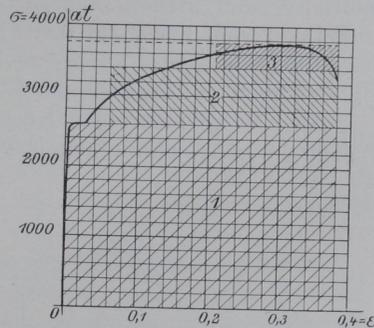


Fig. 10.

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 $[\Sigma a]$ 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 Eigenschaf ten 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

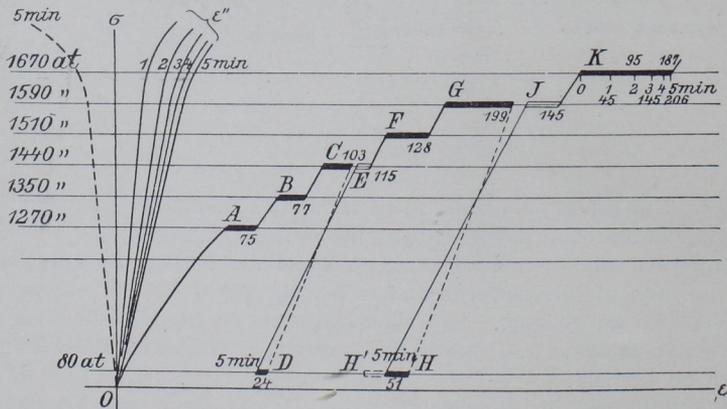


Fig. 11.

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. Zerreißversuch 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 vorausgehenden 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 vorausgehenden 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:

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

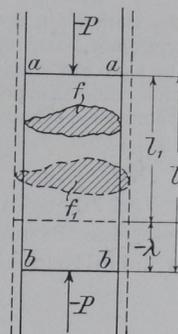


Fig. 12.

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

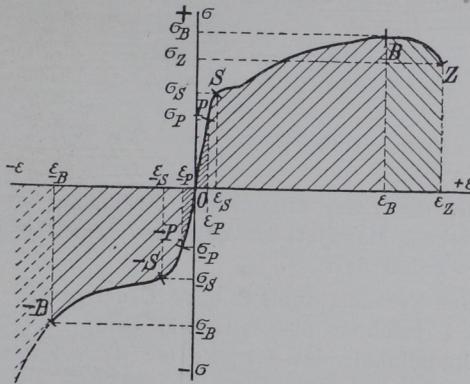


Fig. 13.

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 Verarbeitungsfähigkeit 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] sprunghaft [stufen-

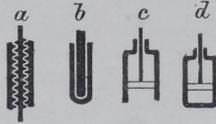


Fig. 14.

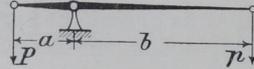


Fig. 15.

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) sprunghaft; 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

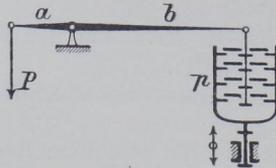


Fig. 16.

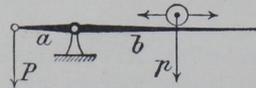


Fig. 17.

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 Hebeldrehpunkt, 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-

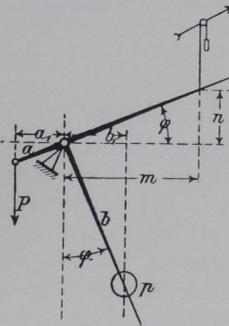


Fig. 18.

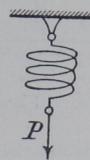


Fig. 19.

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, Dasytometern 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

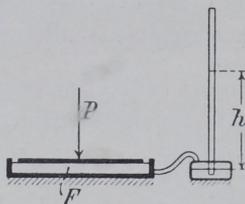


Fig. 20.

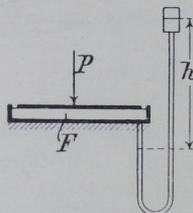


Fig. 21.

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,

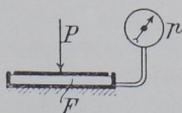


Fig. 22.

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-

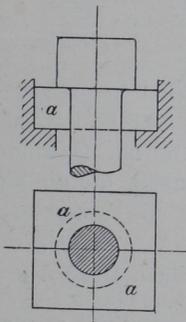


Fig. 23.

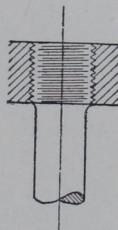


Fig. 24.

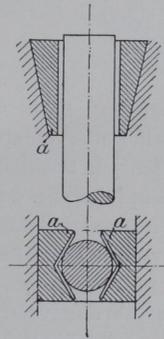


Fig. 25.

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.

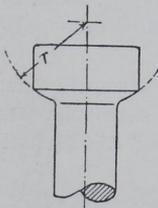


Fig. 26.

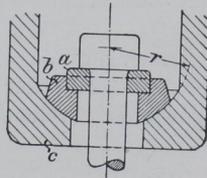


Fig. 27.

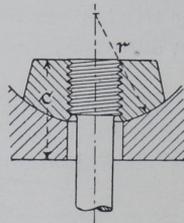


Fig. 28.

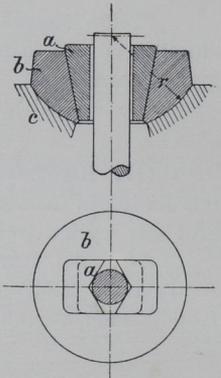


Fig. 29.

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-

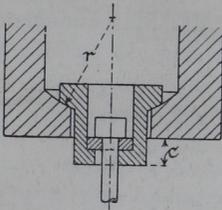


Fig. 30.

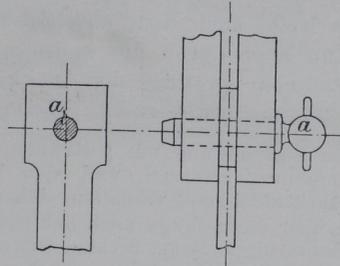


Fig. 31.

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

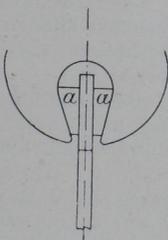


Fig. 32.

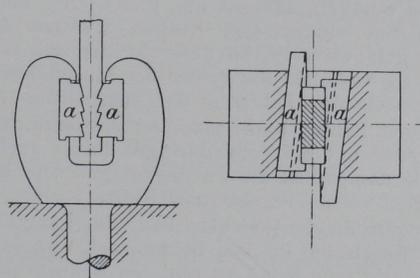


Fig. 33.

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

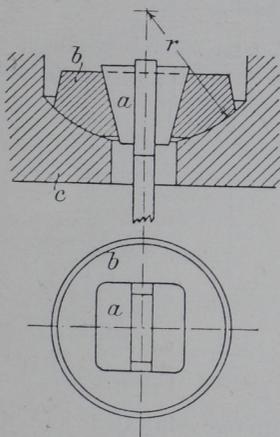


Fig. 34.

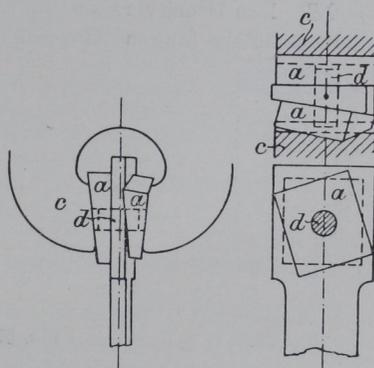


Fig. 35.

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 Zerreiassversuch, an verhältnissmässig langen Körpern ausführen; man muss sogar den Körper

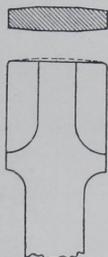


Fig. 36.

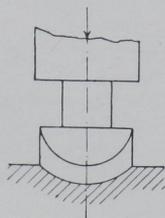


Fig. 37.

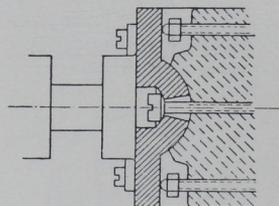


Fig. 38.

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.

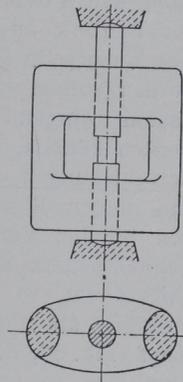


Fig. 39.

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-

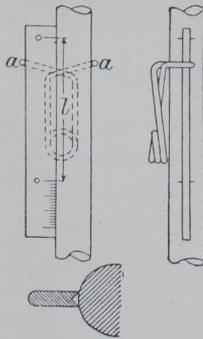


Fig. 40.

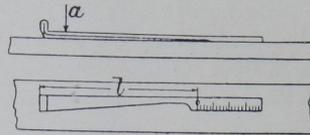


Fig. 41.

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 Wachses 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 Procente 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.

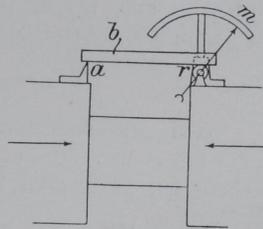


Fig. 42.

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 $\Delta \lambda$ 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:

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

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

so feinem Gewinde sehr schwierig. Deswegen wendet man in der Regel gröbere Gewinde von $\frac{1}{2}$ oder 1 mm Steigung an. Dann muss natürlich die Messlänge l_e oder die Spannungsstufe $\Delta\sigma$ entsprechend vergrößert werden. Der Apparat bleibt aber immer bedenklich, weil er wegen der Messtrommeln sich nur schwerfällig am Probestab befestigen lässt (vgl. Fig. 43), weil diese Befestigung eine sehr sichere sein muss und weil dennoch, wegen der unvermeidlichen Berührung des Apparates durch die Hand, bei jeder Messung seine Einstellung gefährdet erscheint.

Die Messung der elastischen Formänderungen mit Mikrometerschrauben ist in England und in Amerika vielfach im Gebrauch. Diese Instrumente dürften sich dort hauptsächlich aus dem Grunde eingebürgert haben, weil man bisher auf Feinmessungen im Allgemeinen weniger Werth legte als in Deutschland.

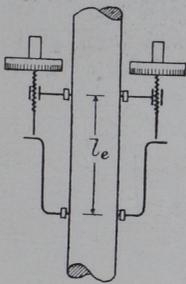


Fig. 43.

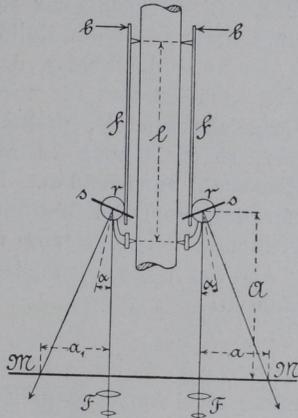


Fig. 44. 1)

81. In Deutschland hat Bauschinger im Jahre 1873 eine Messmethode eingeführt, bei der die Gauss'sche Spiegelablesung benutzt wird; man pflegt die nach diesem Grundsatz erbauten Instrumente im Materialprüfungswesen kurz als Spiegelapparate zu bezeichnen. Die Bauschingersche Methode hat sich als sehr praktisch erwiesen und ist bei uns in allen öffentlichen Prüfungsanstalten und in vielen Staatswerkstätten u. s. w. im Gebrauch.

Bei den Spiegelapparaten wird die Längenänderung des Stabes in eine Drehbewegung des Spiegels übertragen, und man liest nun mit Hilfe eines Fernrohres diese Drehbewegung an einem in gehöriger Entfernung aufgestellten Maassstabe ab. Diese Apparate werden fast immer zu zweien am Probestab befestigt, so dass die Längenänderungen in zwei gegenüberliegenden Fasern gemessen werden.

82. Bei dem Spiegelapparat von Bauschinger ist der auch beim Rollenapparat (77) benutzte Grundsatz der Vergrößerung durch Rollen zur Anwendung gekommen. In einem Bügel, der mit zwei einander gegenüberliegenden Schneiden am Probestab festgeklemmt wird, sind zwei Röllchen r (Fig. 44) in feinen Spitzen gelagert, deren verlängerte Achsen die Spiegel s tragen. Gegen die Röllchen legen sich die Federn f , die mittels Schraubenbügel b mit ihren Schneiden gegen den Probestab und

¹⁾ Die Messlänge l_e ist in Fig. 44 mit l bezeichnet.

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:

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

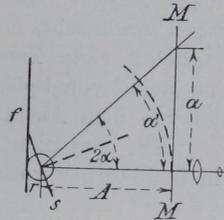


Fig. 45.

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 Befestigungseinrichtungen 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

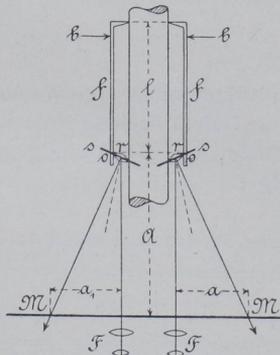


Fig. 46.1)

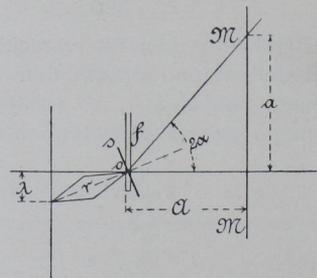


Fig. 47.

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

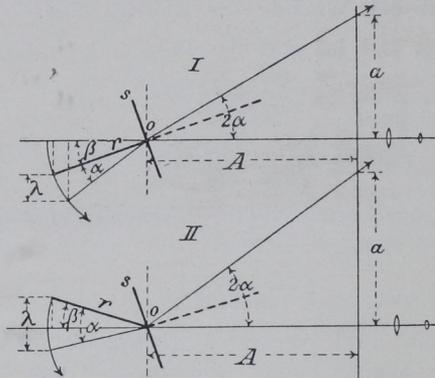


Fig. 48.

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

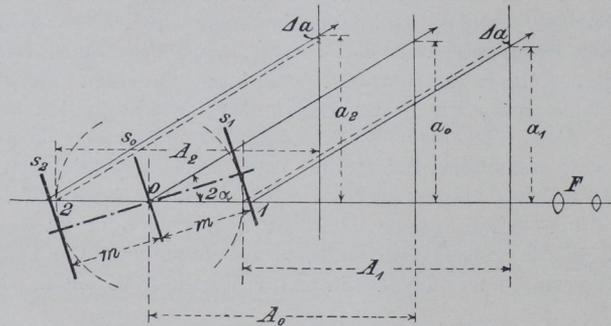


Fig. 49.

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 Wärmezustand 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 Wärmezustandes 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*).

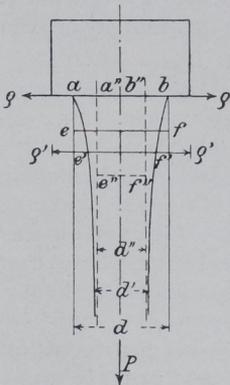


Fig. 50.

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.

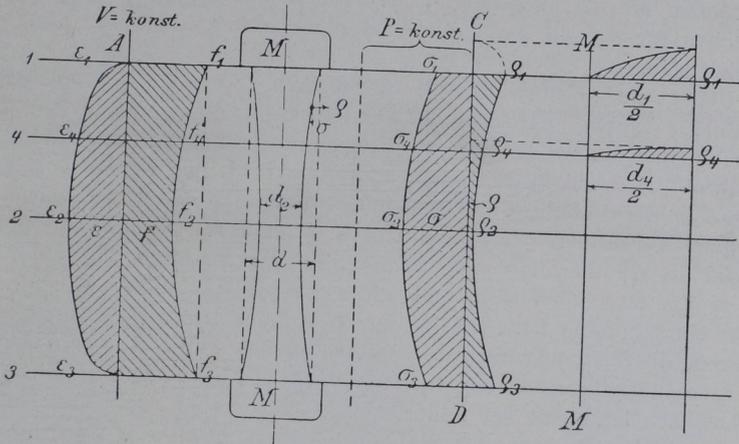


Fig. 51.

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 Dingen 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

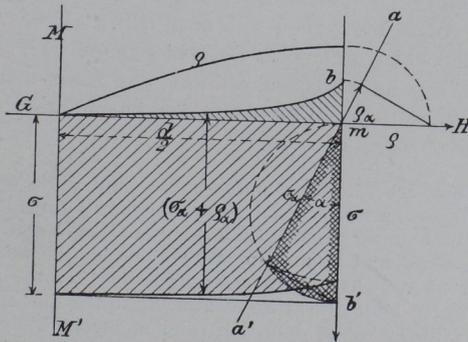


Fig. 52.

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.

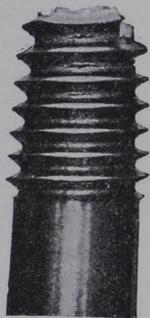


Fig. 54.

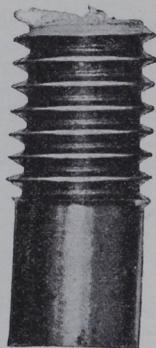


Fig. 55.

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

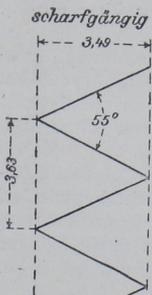


Fig. 56.

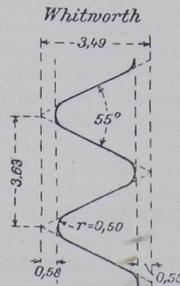


Fig. 57.

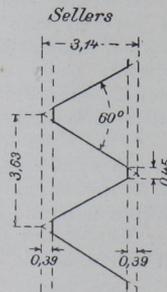


Fig. 58.

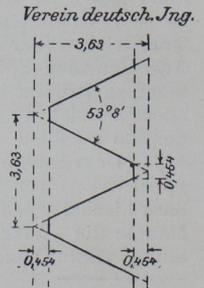


Fig. 59.

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.

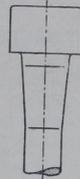


Fig. 60.

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.

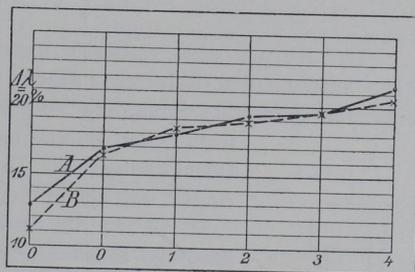


Fig. 61.

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?

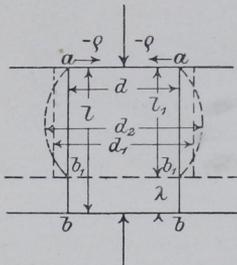


Fig. 62.

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 Durchmesser vergrößerung erheblich geringer ist, als in der Mitte des Körpers.

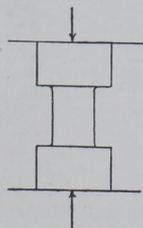


Fig. 63.

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 Zerreib- 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,

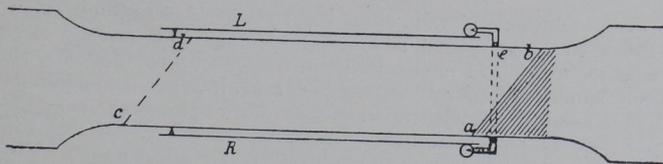


Fig. 65.

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 Vorwärtsgehen 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 Vorwärtsgehen 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 Vorwärtsgehen 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 Fliesen 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 Fliesen 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 Zerreiassversuch 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 Fliesen unter der Walze, ganz ähnlich wie beim Fliesen 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 Fliesen, ihre Vertiefungen aber einen geringeren
Druck, also langsamer Fliesen unter der Walze erzeugen; die am meisten
gedrückten Stellen erscheinen dann beim Fliesen 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 Zerreiassversuch
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 Fließerscheinungen 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 Fließgrenze 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.

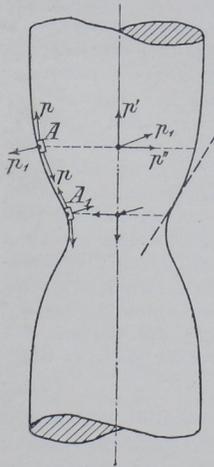


Fig. 66.

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° unterbrach, nachdem die Querschnittsverringering 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 $a a_1 < a' a'_1$ [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.

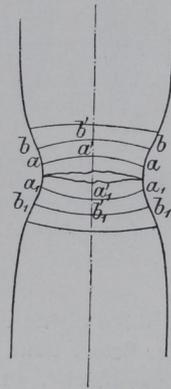


Fig. 67.

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,

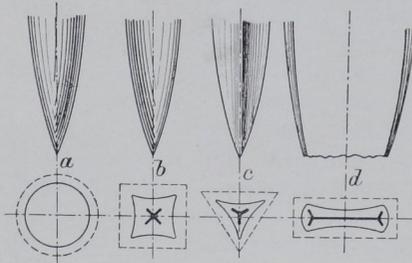


Fig. 68.

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,

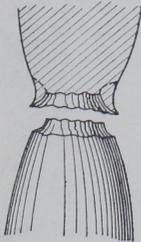


Fig. 69.

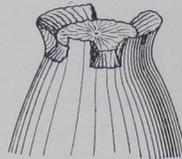


Fig. 70.

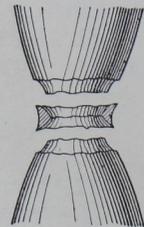


Fig. 71.

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

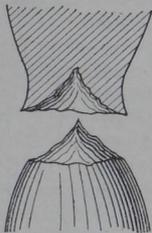


Fig. 72.

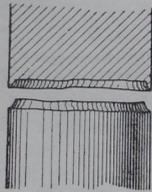


Fig. 73.

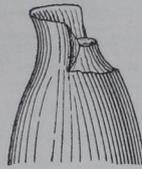


Fig. 74.

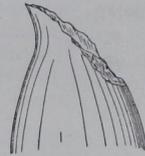


Fig. 75.

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.

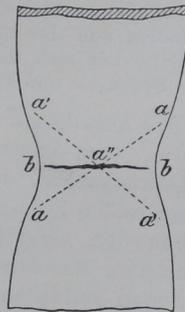


Fig. 77.

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.

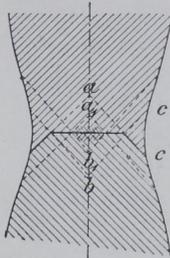


Fig. 78.

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

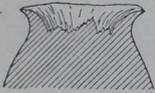


Fig. 79.

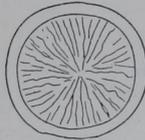


Fig. 80.

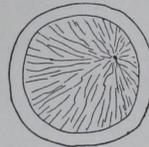


Fig. 81.

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,

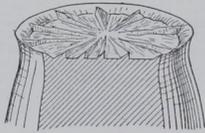


Fig. 82.

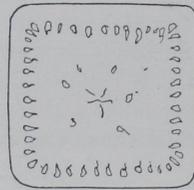


Fig. 83.

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

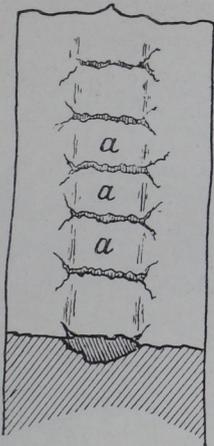


Fig. 84.

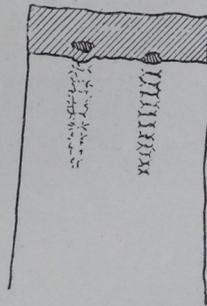


Fig. 84a.

der Schienen. Beim Zerreißversuch 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-

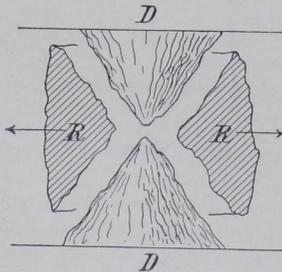


Fig. 85.

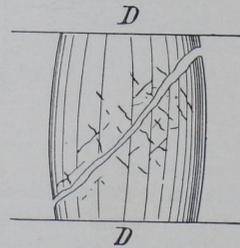


Fig. 86.

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.

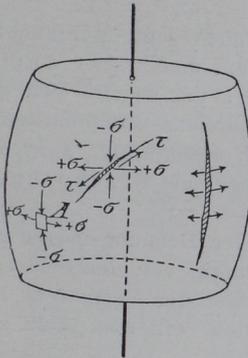


Fig. 87.

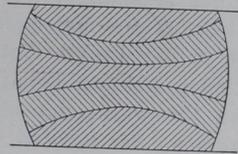


Fig. 88.

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

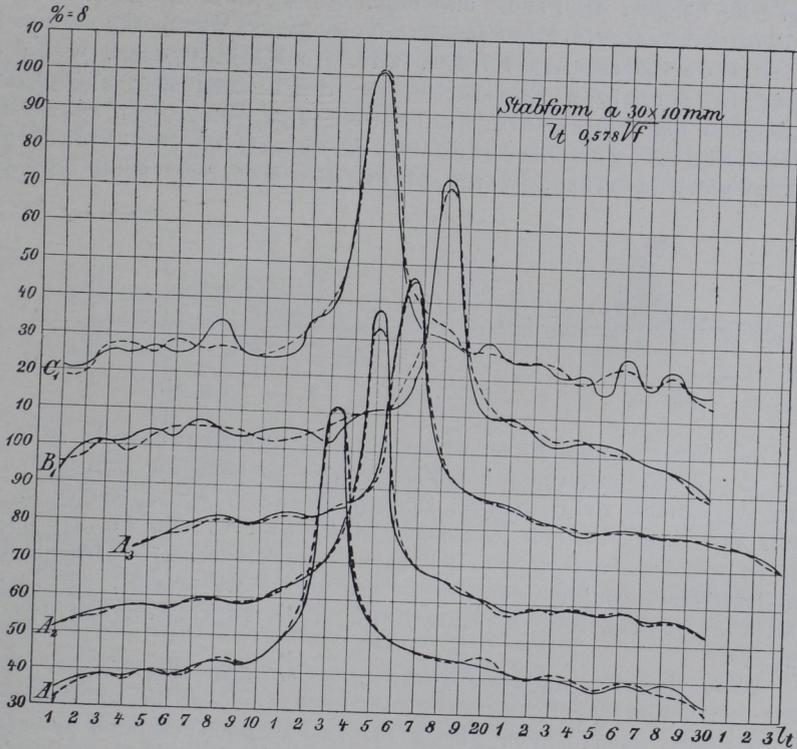


Fig. 89.

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 unshraffierte 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

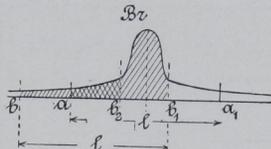


Fig. 90.

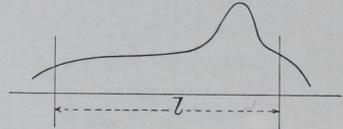


Fig. 91.

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,

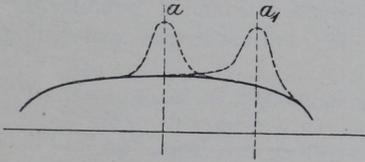


Fig. 92.

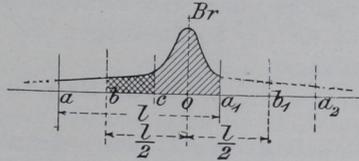


Fig. 93.

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 Doppelkörner Fig. 94 aufgekörnt, mit der Theilmachine 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.

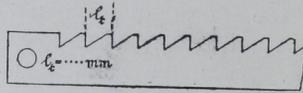


Fig. 95.

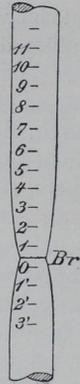


Fig. 96.

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-

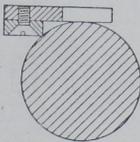


Fig. 97.

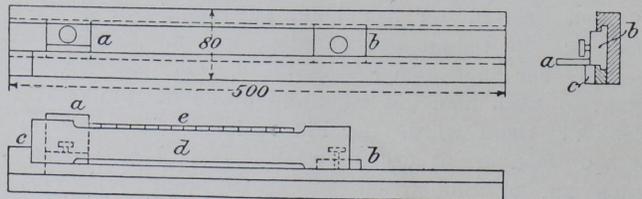


Fig. 98.

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 Schwalbenschwänzen 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 $u=7$ 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 $0,7 \times 2,1$ 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 $l = je 5 u$ und das anderemal an $l = je 10 u$ 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-

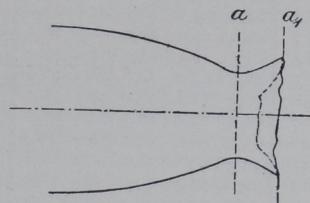


Fig. 99.

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											
						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 Querschnittsverringerng 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

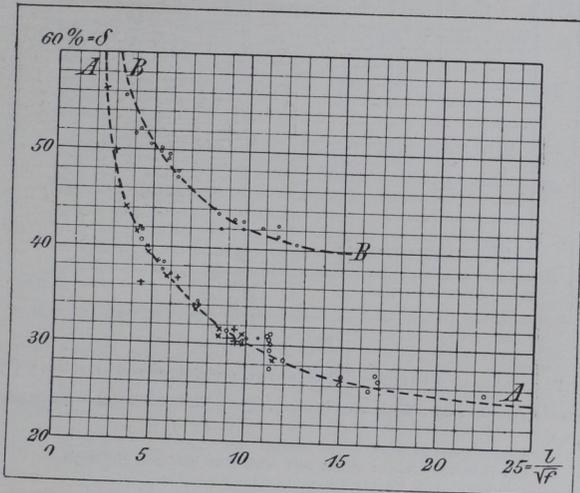


Fig. 100.

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

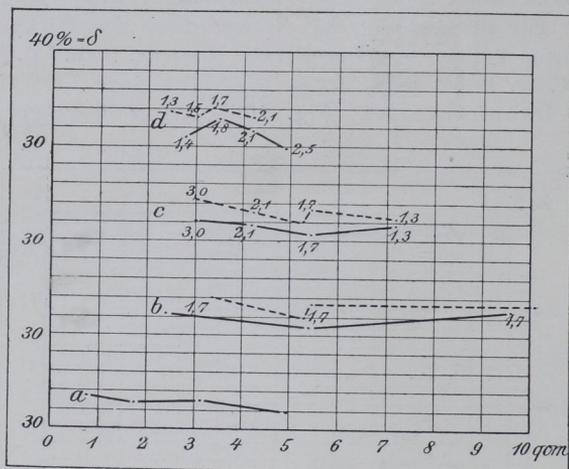


Fig. 101.

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

Man sieht aus diesen Zahlenreihen, dass die Querschnittsform innerhalb der Grenzen des Versuches keinen erkennbaren Einfluss gehabt hat. Obwohl die für gewöhnlich benutzten Stabformen innerhalb der von Bau-schinger benutzten Grenzen liegen, wird es doch nothwendig sein, das Beobachtungsmaterial zu häufen und besonders auch die Versuche unter ähnlichen Gesichtspunkten und mit weiteren Grenzen auf andere Materialien auszudehnen.

150. Die ähnlichen älteren Versuche von Barba (*L 118* u. *119*) sind nach etwas abweichendem Plane ausgeführt und gestatten daher keine so übersichtliche Darstellung in der vorhin gegebenen Auffassungsweise. Ihr Studium ist aber werthvoll und sei daher dringend empfohlen. Hier sei auf Fig. 102 verwiesen, welche in gleicher Weise wie bei Fig. 101 die

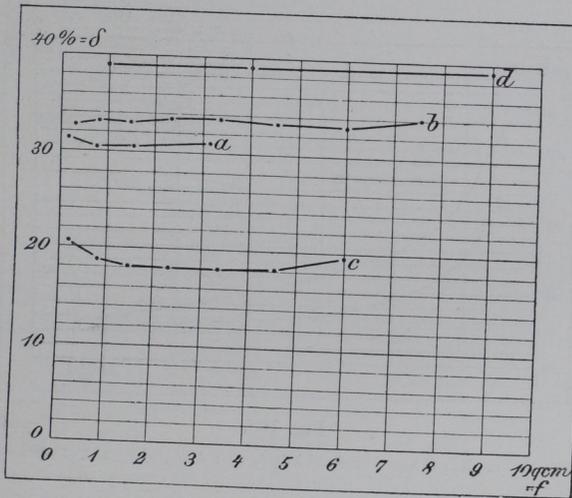


Fig. 102.

Flusseisen. Einfluss der Stabform auf die Dehnbarkeit.

Linien a-c: Rundstäbe

a) Flusseisen ($\sigma_S = 2480$; $\sigma_B = 3740$ at) von 0,5; 1,0 und 2,0 cm Durchmesser $l = 11,2 \sqrt{f}$;

b) Flusseisen ($\sigma_S = 2400$; $\sigma_B = 4130$ at) von 0,7 bis 3,1 cm Durchmesser } $l = 8,2 \sqrt{f}$.

c) Flusseisen ($\sigma_S = 3701$; $\sigma_B = 6360$ at) von 0,7 bis 3,1 cm Durchmesser }

Linie d: Flachstäbe

d) Flusseisen ($\sigma_S = 1820$; $\sigma_B = 3740$ at) von $b/a = 4$; $l = 5 \sqrt{f}$.

Dehnungen darstellt, die Barba an Stäben verschiedenen Querschnittes aus Flusseisen fand, bei denen die Messlänge proportional dem Querschnitt war. Ausserdem möge noch einer seiner Versuche besprochen werden, weil er sehr lehrreich den Einfluss der Einspannköpfe auf die Grösse der Dehnbarkeit δ zeigt.

Barba prüfte aus gleichem Material [Flusseisen] eine Reihe von Stäben gleichen Durchmessers, aber von verschiedener Gebrauchslänge, denen er gleiche Köpfe gab, und verglich die gefundenen Werthe von δ (Fig. 103, Linie A) mit den Werthen von δ (Linie B), die er mit Zugrundelegung verschiedener Messlängen an einem Stabe von grosser Gebrauchslänge fand, der gleichen Durchmesser wie die Stäbe zur Reihe A hatte und vorher mit einer Theilung versehen war.

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

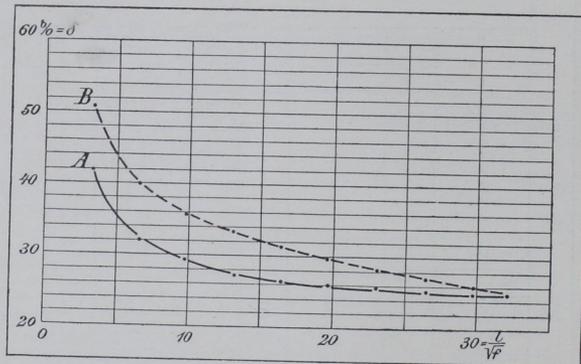


Fig. 103.

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

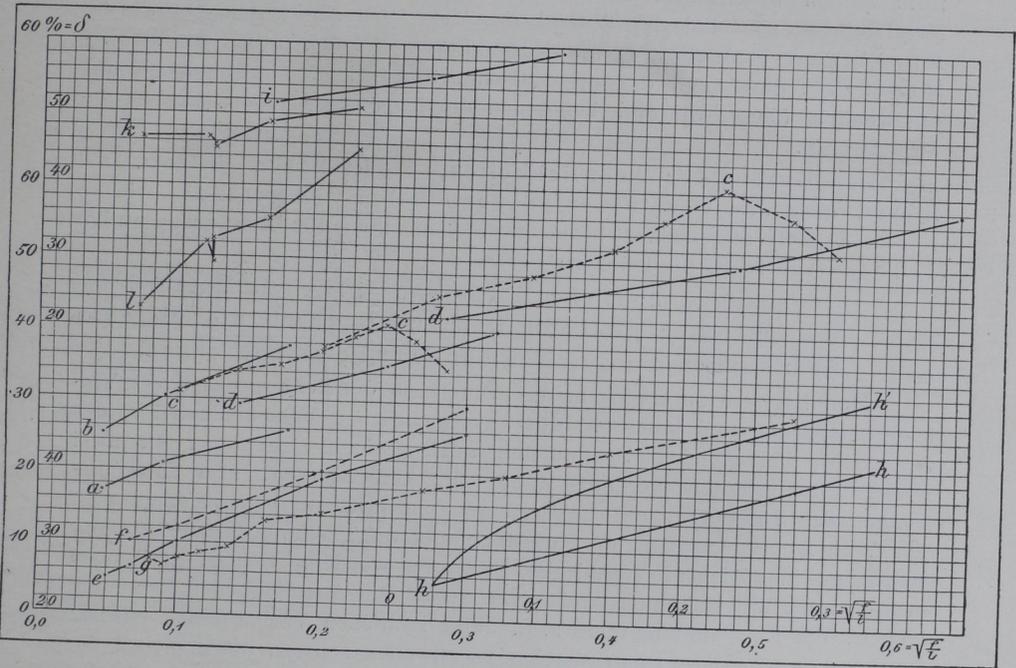


Fig. 104.

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_0 , 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

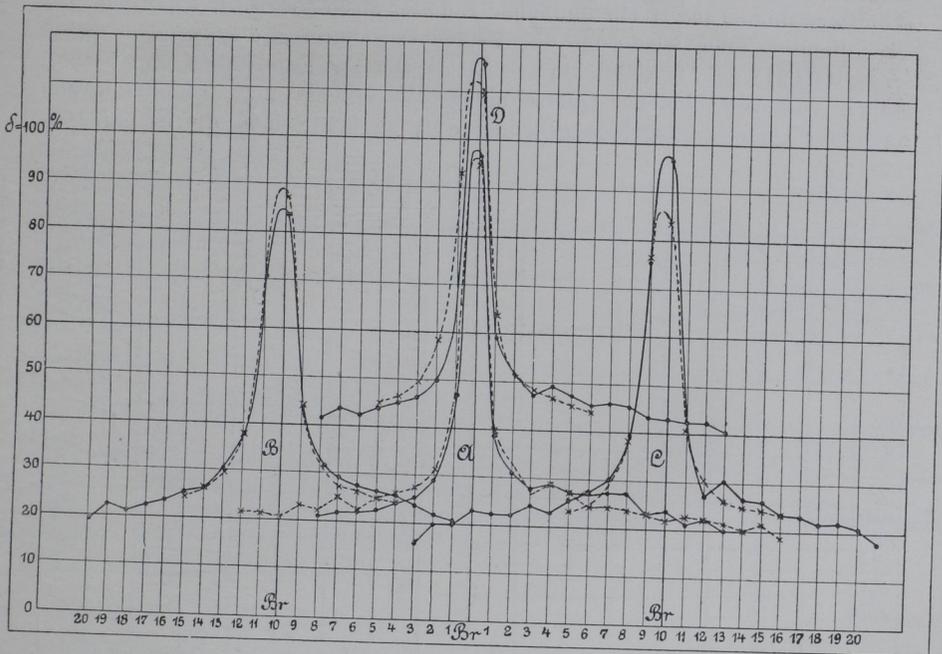


Fig. 105.

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

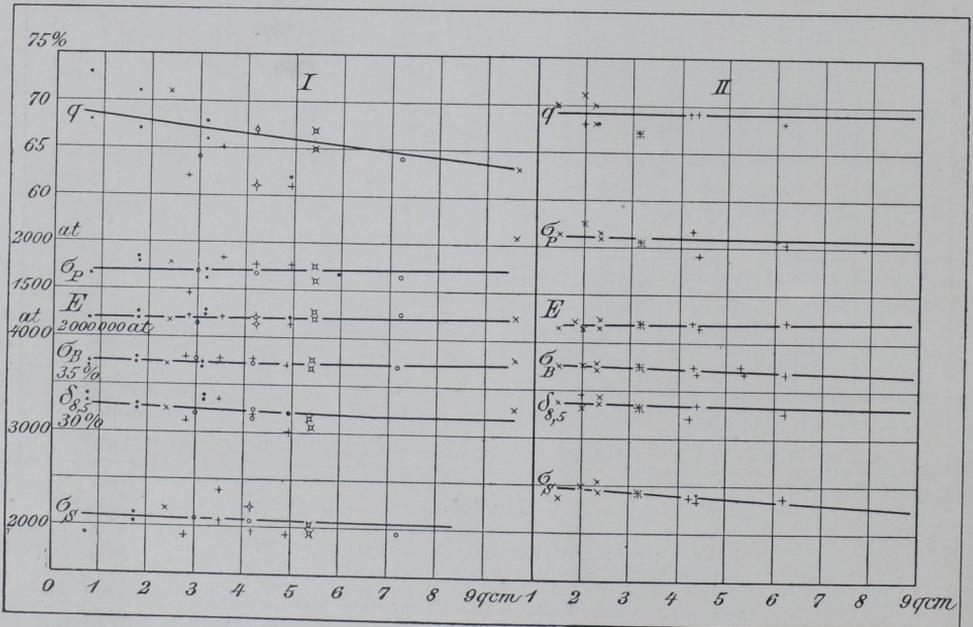


Fig. 106.

Einfluss der Querschnittsgrösse auf die Ergebnisse des ZerreiBversuches.

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

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

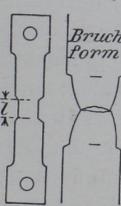
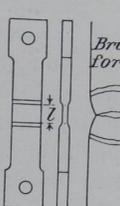
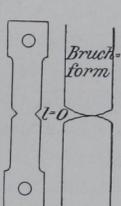
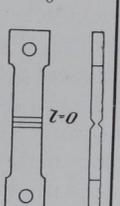
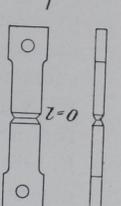
gegebene Uebersicht. Bei den Flachstäben wechselte das Verhältniss der Querschnittsabmessungen b/a zwischen den Werthen 1,3 bis 3,0. Alle Werthe von δ sind auf Messlängen $l = 8,5\sqrt{f}$ bezogen, sie müssen daher nach Früherem (Abschnitt 7) innerhalb jeder der beiden Gruppen gleich gross ausfallen, 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	30	14	14	14	
Dicke a	14	14	6	14	6	14	6	14	6	6	
Querschnitt f	420	186	180	186	186	186	180	84	84	84	
Messlänge l	200	10	10	10	0	0	0	0	0	0	
l/\sqrt{f}	9,8	0,7	0,7	0,7	0	0	0	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 100ε , 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

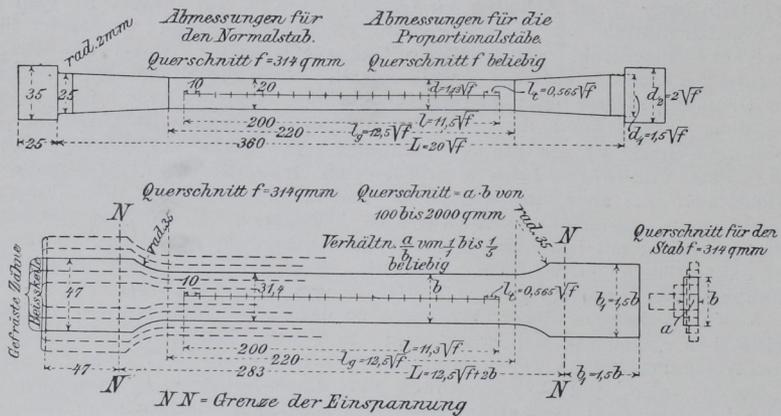


Fig. 107.

benutzten Fräse bemessen ist. Der Fräsendurchmesser 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 $f = 2$ qcm reichlich klein, $f = 5$ qcm erfordert kräftigere Maschinen und $f = 2,5$ 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 Zerreißversuche 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 Zerreißversuch 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 $-\varepsilon$, 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	268	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		
	5	3	3	3	9	3	1	117	120	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		
	9	3	3	3	9	3	1	55	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		
Vicat (vor 1833)	13	2	2	2	4	2	1	74,0	74,0	Gips No. 4
	14	3	3	3	9	3	1	73,9		
	15	1,0	1,0	1,0	1,00	1,0	1	53,1	52,6	Feiner Sandstein
	16	1,5	1,5	1,5	2,25	1,5	1	52,0		
	17	1	1	1	1	1	1	33,5	33,5	Lufttrockener Ziegelthon
	18	2	2	2	4	2	1	33,4		
	19	1	1	1	1	1	1	18,0	17,5	Mörtel aus Fettkalk und Sand
	20	2	2	2	4	2	1	17,0		
Bauschinger (1872)	21	5,20	5,20	5,05	27,04	5,20	1,03	690	689	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		

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	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	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:

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

Hierin sind α 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:

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

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

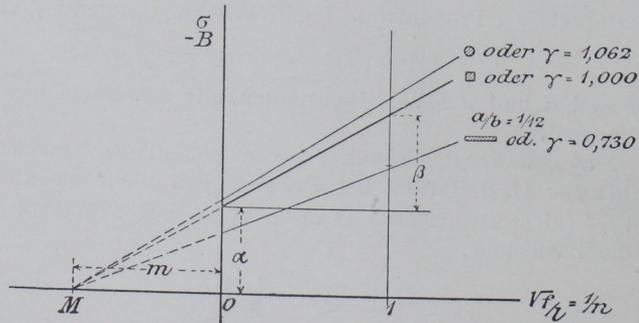


Fig. 108.

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- schi- nger 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	Bauschi- nger; sehr feiner graublauer Schweizer-Sand- stein; Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschi- nger: $\sigma_B = 262 + 320 \frac{1}{n}$ 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	Bauschi- nger; derselbe Sandstein, Druck senkrecht zum Lager. Ausgleich nach Bauschi- nger: $\sigma_B = 310 + 346 \frac{1}{n}$ 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	Bauschi- nger; feinkörniger gelber Buntsandstein von Heilbronn in Württemberg. Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschi- nger: $\sigma_B = 347 + 121 \frac{1}{n}$ 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		Bauschi- nger; derselbe Sandstein, Cylinder; Druck parallel zum Lager. Ausgleich nach Bauschi- nger: $\sigma_B = 369 + 115 \frac{1}{n}$ 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 Bauschi-
nger 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-

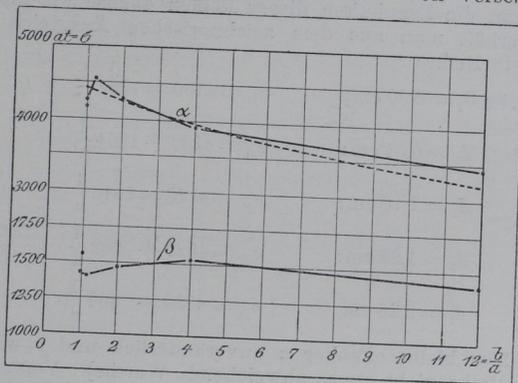


Fig. 109.

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 Röhren 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 Probetab 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	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○	□	○	○
$\frac{1}{n} = \sqrt{f/l}$	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
$\gamma = \sqrt{f/l}$	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
$-\sigma$ 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

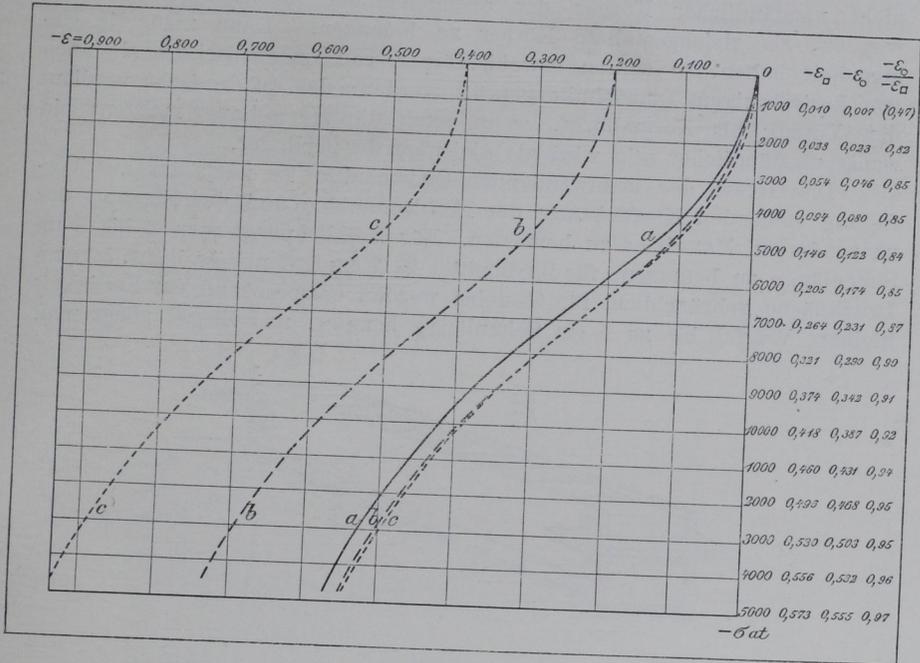


Fig. 110.

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

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

$$\frac{-\sigma_a}{-\sigma_b} = \frac{1}{0,82} \text{ bis } \frac{1}{0,97} = 1,22 \text{ bis } 1,03,$$

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

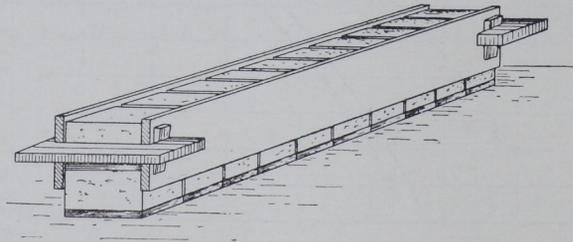


Fig. 111.

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

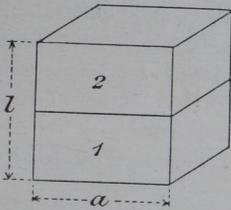


Fig. 112.

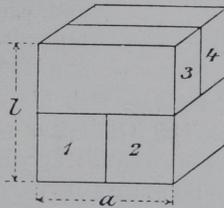


Fig. 113.

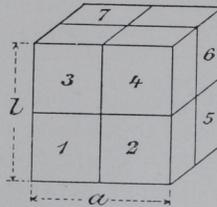


Fig. 114.

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 $\sigma_B = 1 \quad 0,94 \quad 0,89 \quad 0,88$

Ob bei fester Verbindung der Theile durch ein Bindemittel die Unterschiede in den Druckfestigkeiten zusammengefügtter 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.

wenn hier nur die Bedingungen für diese einfachen Fälle und die Vorgänge, die mit ihnen verknüpft sind, behandelt werden. Ausführlicheres über die Biegetheorie und die verwickelten Fälle wird man ja in den Werken über Festigkeitslehre, z. B. von Bach (*L 137*), dem ich hier im wesentlichen folgen werde, leicht finden können.

Ein prismatischer Körper (Fig. 115) von der Länge l sei an dem einen Ende A fest eingespannt und am anderen Ende B im Schwerpunkt

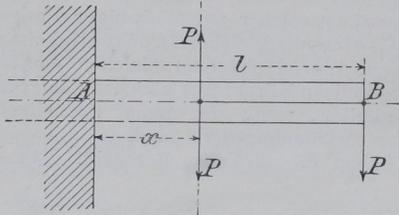


Fig. 115.

seiner Querschnittsfläche durch eine Kraft P belastet, die in der Ebene einer der Haupttaxen des Querschnittes und der Stabmittellinie liegt.

Im Querschnitt 1, in der Entfernung x von der Einspannstelle A , erzeugt die Kraft P ein Moment:

$$M = P(l - x)$$

und eine in die Querschnittsebene 1 fallende Kraft P , die in den folgenden Betrachtungen zunächst ausser

Acht gelassen werden soll, so dass sich die angreifenden äusseren Kräfte für den Querschnitt 1 durch ein Kräftepaar ersetzen lassen.

Die Kraft P des Kräftepaares strebt den Körper zu biegen; der Körper erfährt eine Krümmung.

169. Unter der Voraussetzung, dass die ursprünglichen, senkrecht zur Mittellinie AB gedachten Querschnittsebenen des Körpers auch nach der Krümmung eben und senkrecht zur Mittellinie bleiben, können zwei benachbarte, um dx von einander entfernte Querschnitte 1 und 2 (Fig. 116 und 117) nach eingetretener Krümmung nicht mehr parallel sein. Stellt

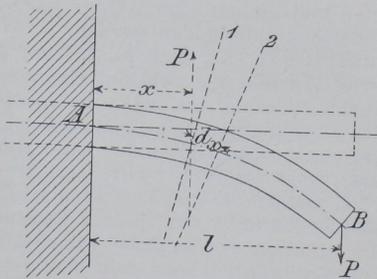


Fig. 116.

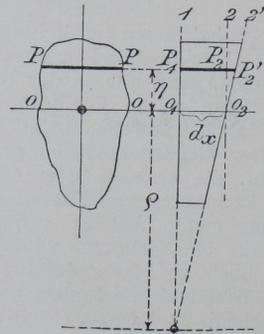


Fig. 117.

man sich den Körper aus einzelnen parallel zur Mittellinie laufenden Schichten PP bestehend vor, so wird bei der Krümmung eine dieser Faserschichten, z. B. OO ihre ursprüngliche Länge dx beibehalten können, während für die oberen Schichten, z. B. PP , eine Verlängerung, und für die unteren eine Verkürzung eintreten muss, da die Querschnitte auch nach geschehener Krümmung des Stabes eben sein sollen. Die Entfernung der Projektion der Spur von beiden Ebenen 1 und 2 von der Schicht $OO = \rho$ (Fig. 117) ist der Krümmungshalbmesser der Stabaxe. Die Dehnung, welche die Faserschicht PP erfuh, kann man ausdrücken:

$$\varepsilon = \frac{\overline{P_1 P'_2} - \overline{P_1 P_2}}{\overline{P_1 P_2}} = \frac{P_1 P'_2}{O_1 O_2} - 1, \text{ oder da } \frac{\overline{P_1 P'_2}}{O_1 O_2} = \frac{\varrho + \eta}{\varrho},$$

wenn η der Abstand der Schicht \overline{PP} von der Schicht \overline{OO} ist. Es ist also:

$$\varepsilon = \frac{\varrho + \eta}{\varrho} - 1 = \frac{\eta}{\varrho}$$

an der vom Krümmungsmittelpunkt abgewendeten Stabseite und

$$- \varepsilon = - \frac{\eta}{\varrho}$$

an der entgegengesetzten Seite des Stabes.

Unter der Voraussetzung, dass die Fasern keinen Einfluss auf einander ausüben, Seitenkräfte also ausgeschlossen sind, können aus den früheren Betrachtungen (34) die bei der Längenänderung der Fasern eintretenden Spannungen berechnet werden aus:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha}, \text{ und da } \varepsilon = \frac{\eta}{\varrho}, \text{ so wird}$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \frac{\eta}{\varrho} \dots \dots \dots 14.$$

170. Die inneren Kräfte, die Spannungen σ , müssen gleich Null und mit den äusseren Kräften, Moment M , im Gleichgewicht sein. Es muss also die Summe der Spannungen gleich Null und ihr Moment gleich M sein.

Wenn in Fig. 118 der Flächenstreifen PP von der Breite z und der Höhe $d\eta$, also $df = z d\eta$ ist, so ist die erste Forderung, dass die Summe der Spannungen gleich Null sei, erfüllt durch:

$$\int \sigma df = 0, \text{ wenn}$$

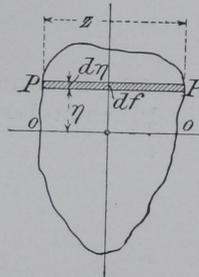


Fig. 118.

die Integration sich über den ganzen Querschnitt erstreckt.

Da ϱ für jeden Querschnitt eine Konstante und da $\sigma = 1/\alpha \cdot \eta/\varrho$ (Gl. 14), so ergibt sich:

$$\int \frac{1}{\alpha} \eta df = 0$$

Wenn die Dehnungszahl α des Materiales für Zug und Druck gleich ist, so gilt innerhalb der Proportionalitätsgrenze

$$\int \eta df = 0 \dots \dots \dots 15.$$

d. h. also, die Faserschicht, in der die Spannungen und Dehnungen Null sind, geht durch den Schwerpunkt der Fläche; diese Schicht nennt man auch wohl die neutrale Faserschicht; sie steht senkrecht zur Angriffsebene des Momentes M . Da diese Ebene, der Voraussetzung gemäss (168), die eine Hauptaxe des Querschnittes enthält, so enthält die neutrale Schicht die andere Hauptaxe.

Die zweite Gleichgewichtsbedingung lautete, dass das Moment der inneren Kräfte gleich dem Moment der äusseren Kräfte sein muss, d. h.

$$\int \sigma df \eta = M,$$

und wenn man, wie früher, $\sigma = 1/a \cdot \eta/\rho$ setzt und a für Zug und Druck gleich annimmt, so erhält man:

$$M = \frac{1}{\alpha \rho} \int \eta^2 df,$$

und wenn man $\int \eta^2 df$, das Trägheitsmoment des Querschnittes in Bezug auf die neutrale Faserschicht \overline{OO} , nämlich:

$$\int \eta^2 df = \Theta \text{ setzt, so wird:}$$

$$M = \frac{\Theta}{\alpha \rho} \text{ oder}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha M}{\Theta} \dots \dots \dots 16)$$

Aus Gleichung 14 und 16

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\eta}{\rho} \text{ und } \frac{1}{\rho} = \alpha \frac{M}{\Theta} \text{ ergibt sich:}$$

$$\sigma = \frac{M}{\Theta} \eta \dots \dots \dots 17)$$

Die Spannungen σ sind also proportional dem Abstände η der Flächenelemente von der neutralen Faserschicht; sie sind am

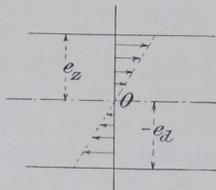


Fig. 119.

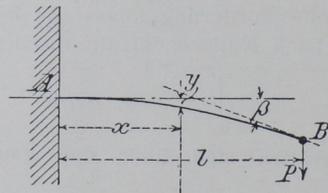


Fig. 120.

grössten in den äussersten Schichten des Querschnittes vom Abstände $\eta = e_z$ oder e_d (Fig. 119).

Dementsprechend ist also die

$$\left. \begin{array}{l} \text{grösste Zugspannung } +\sigma = \frac{M}{\Theta} e_z \\ \text{grösste Druckspannung } -\sigma = -\frac{M}{\Theta} e_d \end{array} \right\} \dots \dots \dots 18)$$

171. Mit der gleichen Annäherung, mit der man für den reciproken Werth des Krümmungsradius die zweite Ableitung von y nach da setzen darf:

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{d^2 y}{dx^2} \text{ ist auch nach Gl. 16 zu setzen}$$

$$M = \pm \frac{\Theta}{\alpha} \frac{d^2 y}{dx^2}, \text{ d. h.}$$

$$P(l-x) = \frac{\Theta}{a} \frac{d^2y}{dx^2}.$$

Hieraus ergibt sich aber unter der früheren Voraussetzung, dass a für Zug- und Druckbeanspruchung gleichen Werth hat und dass der Querschnitt des Stabes für die ganze Länge l der gleiche, also auch Θ eine Konstante ist, durch Integration:

$$\frac{\Theta}{a} \frac{dy}{dx} = P \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) + C.$$

Da die gekrümmte Stabaxe, d. i. die elastische Linie, die ursprüngliche gerade Stabaxe (Fig. 120) in der Einspannstelle berührt [eine Voraussetzung, die allerdings nur ausnahmsweise erfüllt ist], so ist:

für $x=0$; $\frac{dy}{dx} = 0$, also auch $C=0$ und daher

$$\frac{dy}{dx} = \frac{a}{\Theta} P \left(l - \frac{x}{2} \right) x \dots \dots \dots a)$$

Hieraus kann man für jeden Punkt der elastischen Linie den Winkel β (Fig. 120) berechnen, welchen deren Tangente im betrachteten Punkte mit der ursprünglichen Stabaxe einschliesst.

Für das freie Ende B ist nach Gl. a , da $x=l$

$$\text{tg } \beta = \frac{a}{\Theta} \cdot P \left(l - \frac{e}{2} \right) l = \frac{a}{2\Theta} Pl^2$$

und da β stets nur ein kleiner Winkel ist, so kann man setzen:

$$\beta = \frac{a}{2\Theta} Pl^2.$$

Aus der Gleichung a folgt, dass für

$$x=0 \text{ auch } y=0 \text{ wird.}$$

Durch Integration ergibt sich nun die Gleichung der elastischen Linie:

$$y = \frac{a}{\Theta} \frac{P}{2} \left(l - \frac{x}{3} \right) x^2.$$

Die Durchbiegung δ am Ende B beträgt daher für $x=l$

$$\delta = \frac{a}{\Theta} \frac{P}{2} \left(l - \frac{l}{3} \right) l^2, \text{ d. h.}$$

$$\delta = \frac{a}{\Theta} \frac{P}{3} l^3 \dots \dots \dots 19)$$

172. Für Biegungsversuche zur Erprobung von Materialien wird fast ausschliesslich der Probestab auf zwei Stützen aufgelegt und in der Mitte zwischen diesen durch eine Kraft P beansprucht. Man kann sich in diesem Falle den Stab als in der Mitte eingespannt vorstellen und am Ende mit $P/2$ in umgekehrter Richtung beansprucht denken (Fig. 121).

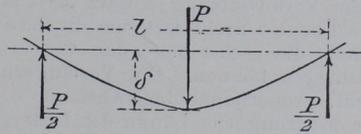


Fig. 121.

Daher kann also geschrieben werden:

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{Pl}{4} \text{ und nach Gl. 18}$$

$$\pm \sigma = \frac{Pl e}{4 \Theta} \dots \dots \dots 20$$

Unter den gleichen Voraussetzungen findet sich die Durchbiegung δ in der Stabmitte, indem man in Gleichung 19 für den einseitig eingespannten Stab $l = l/2$ und $P = P/2$ einsetzt. Dann wird:

$$\delta = \frac{\alpha P l^3}{\Theta 2^3 2^3} \text{ oder}$$

$$\delta = \frac{a P l^3}{48 \Theta} \dots \dots \dots 21$$

a. Obwohl diese Formeln für die Biegefestigkeit eigentlich nur für den Zustand des Materials innerhalb der Proportionalitätsgrenze, wo a konstant ist, aufgestellt sind, so werden sie dennoch der Einfachheit wegen bei den Materialprüfungen vielfach so benutzt, als ob sie bis zum eintretenden Bruch, oder bis zur übermässigen Verbiegung Gültigkeit hätten.

Bei der Ableitung der Gleichungen ist ausserdem eine ganze Reihe von Voraussetzungen gemacht, deren Zuverlässigkeit ohne weiteres angenommen wurde. Man wird sich darüber klar werden müssen, wie weit diese Voraussetzungen berechtigt sind, und in welchem Maasse das Nichtzutreffen der Annahmen das Ergebniss eines Biegeversuches beeinträchtigen kann. Ich folge hierbei den Darstellungen von Bach (L 137 § 20).

b. Die erste Voraussetzung war, dass die auf den Körper wirkenden äusseren Kräfte für jeden Querschnitt nur ein Kräftepaar ergeben, dessen Ebene den Querschnitt in einer der beiden Hauptaxen senkrecht schneidet. Die zweite Voraussetzung war, dass die Fasern, aus denen der Stab bestehend gedacht wurde, nicht aufeinander einwirken. Drittens sollten die ursprünglich ebenen und senkrecht zur Stabaxe stehenden Querschnittsflächen auch nach der Krümmung eben und senkrecht zur Axe bleiben. Viertens sollte die Dehnungszahl a für Zug und Druck gleich gross und bis zur Proportionalitätsgrenze konstant sein.

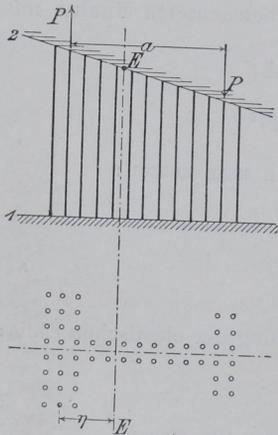


Fig. 122.

Ueber den Grad der Zulässigkeit dieser Annahmen lässt sich am besten ein Urtheil gewinnen, wenn man sich, wie Bach es thut (L 137 § 20), einen Körper so ausgeführt denkt, dass sie wirklich erfüllt sind. Demnach nimmt Bach an, der Stab bestehe aus lauter gleichlangen Spiralfedern, die unabhängig von einander, alle mit den beiden Endflächen 1 und 2 (Fig. 122) fest verbunden sind. An 2 wirkt in der Symmetrieebene [der Ebene der einen Hauptaxe des Querschnittes — siehe Voraussetzung Absatz 168] das Kräftepaar P , dessen Moment $M = Pa$ ist. Die Ebene ε dreht sich um die Axe EE . Die links liegenden Federn werden gedehnt, die rechts liegenden verkürzt; diese letzteren sollen nach der Seite nicht ausbiegen können. Die Verlängerungen und Verkürzungen λ müssen, wie man sieht, proportional dem Abstände η von der Axe EE sein. Man hat also, wenn l die ursprüngliche Länge der Feder war:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l}$$

Ist die Dehnung im Abstände 1 = ε_1 , so ist:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \eta; \text{ alsdann ist die Spannung } \sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{\varepsilon_1}{\alpha} \eta, \text{ und dieser entspricht, wenn}$$

der Querschnitt der fraglichen Faserschicht f_0 ist, eine Kraft:

$$\sigma f_0 = \frac{\epsilon_1}{a} \eta f_0.$$

Um Gleichgewicht zu erzielen, muss die Summe dieser inneren Kräfte gleich Null sein, d. h.

$$\Sigma \sigma f_0 = \Sigma \frac{\epsilon_1}{a} \eta f_0 = 0 \dots \dots \dots a)$$

und ferner muss die Summe der Momente dieser inneren Kräfte gleich dem Moment der äusseren Kräfte sein, also:

$$M = Pa, \text{ d. h.}$$

$$\Sigma \sigma f_0 \eta = \Sigma \frac{\epsilon_1}{a} \cdot f_0 \eta^2 = M \dots \dots \dots b)$$

Da hier a für Zug und Druck gleich gesetzt werden kann, folgt aus der ersten Gleichung:

$$\Sigma f_0 \eta = 0,$$

d. h. die Nullaxe EE geht durch den Schwerpunkt aller Faserquerschnitte und bildet die zweite Hauptaxe des Stabquerschnittes.

$$\text{Da } \Sigma f_0 \eta^2 = \Theta,$$

so geht die zweite Bedingungsgleichung b , unter denselben Voraussetzungen für a , über in:

$$M = \frac{\epsilon_1}{a} \Theta.$$

Sind e_z und e_d die Werthe von η für die äussersten Fasern des Querschnittes, so ist deren Spannung:

$$+ \sigma = \frac{\epsilon_1}{a} e_z \text{ oder } - \sigma = - \frac{\epsilon_1}{a} e_d \text{ daher}$$

$$\frac{\epsilon_1}{a} = + \frac{\sigma}{e_z} \text{ oder } \frac{\epsilon_1}{a} = - \frac{\sigma}{e_d}$$

Eine Krümmung des Stabes durch das Kräftepaar PP findet nicht statt, der Stab bleibt gerade. Die Querschnittsebene hört auf senkrecht zur Stabaxe zu stehen. Alle Querschnitte schneiden sich vielmehr in der Linie, deren Projektion M im Abstände ρ (Fig. 123) von der neutralen Faserschicht EE liegt. Danach ist also ρ nicht mehr der Krümmungshalbmesser, M nicht mehr Krümmungsmittelpunkt, denn da der Stab gerade bleibt, ist der Krümmungshalbmesser gleich ∞ .

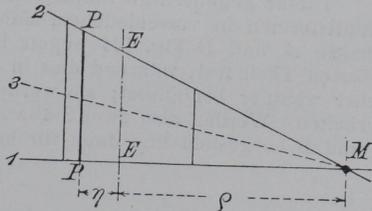


Fig. 123.

Die Beziehungen:

$$\epsilon = \frac{\rho + \eta}{\rho} - 1 = \frac{\eta}{\rho},$$

die für den gebogenen Stab unter der Voraussetzung abgeleitet wurden, dass die Querschnitte senkrecht zur Stabaxe bleiben, gelten eben auch dann, wenn die Axe gerade bleibt und diese Bedingung nicht erfüllt ist.

Da ρ nicht mehr die Bedeutung des Krümmungshalbmessers hat, darf man

$$\frac{1}{\rho} \text{ nicht mehr durch } + \frac{d^2 \eta}{dx^2}$$

ersetzen.

c. Die erste Voraussetzung, dass auf den Stab nur ein Kräftepaar als äussere Kraft wirke, ist in der Regel nicht erfüllt; die Erzeugung des biegenden Momentes erfordert fast immer Nebenkräfte. Meistens ist immer noch eine Schubkraft vorhanden, deren Einfluss allerdings in vielen Fällen unbedeutend ist. Oertliche Anstrengungen des Materials in Folge der Auflagerungen und der Ein-

wirkung der Angriffsvorkehrungen sind fast immer vorhanden (*L 120*) und können ähnliche Wirkungen, wie die Einspannvorrichtungen bei Zug- und Druckversuchen haben. Bei starken Biegungen des Probestückes hat z. B. die Reibung zwischen Probestück und Auflager einen erheblichen Einfluss, namentlich wenn starke Belastungen erforderlich sind. Unter diesen Umständen wirkt dann auch die in der Regel nicht gut zu vermeidende Aenderung der Stützweite l beeinflussend auf das Ergebniss des Biegeversuches.

d. Die zweite Voraussetzung, dass die Fasern keinen Einfluss auf einander ausüben, ist für den aus einem Ganzen bestehenden Stab durchaus nicht erfüllt, denn, wie in Abschnitt 43 und 59 bereits dargelegt, ist mit den Längenänderungen der Fasern immer eine Querschnittsänderung verbunden; je grösser die Längenänderungen, desto grösser sind die Querschnittsänderungen; sie sind also am grössten in den äussersten Schichten und gleich Null in der neutralen Faserschicht. Die Fasern müssen, wegen der Querschnittsänderungen, während der Krümmung ihre Lage gegen die neutrale Schicht verändern und sich hierdurch gegenseitig beeinflussen. Jeder Zwang aber, der der Querschnittsänderung entgegen wirkt, erhöht die Zug- und Druckfestigkeit (*103*), daher ist auch die Beziehung:

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

nicht mehr streng anwendbar.

Ausser durch die Querschnittsänderungen beeinflussen sich die Fasern auch durch die verschiedene Längenänderung, die sie je nach dem Abstände η von

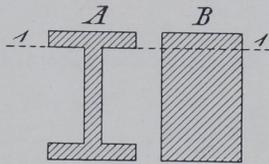


Fig. 124.

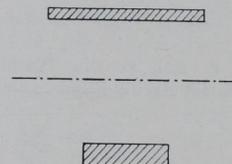


Fig. 125.

der neutralen Faserschicht erfahren und die ein Gleitbestreben zwischen den benachbarten Fasern erzeugen.

Dieser gegenseitige Einfluss der Fasern macht sich bei verschiedenen Querschnittsformen in verschiedenem Maasse geltend. Im Schnitt 1 der beiden Querschnitte A und B Fig. 124 liegen in A die Fasern nach der einen Seite zum grössten Theil frei, während dies in B nicht der Fall ist. In A sind diese Fasern daher weniger beeinflusst; sie werden sich daher mehr der Theorie entsprechend verhalten. Werden also zwei Stäbe aus gleichem Material nach den Querschnitten A und B hergestellt und dann für beide auf Grund der Gleichung:

$$M = \sigma \frac{\Theta}{e_z}$$

aus den Versuchsergebnissen die Bruchspannungen berechnet, so muss sich für B eine etwas grössere Biegefestigkeit ergeben als bei A.

Je mehr der Stabquerschnitt sich in zwei schmale, der [idealen] neutralen Faserschicht parallele Streifen (Fig. 125) auflöst, um so vollkommener ist die Voraussetzung wegen der gegenseitigen Einflusslosigkeit der Fasern erfüllt.

e. Die dritte Voraussetzung, dass die Querschnitte eben bleiben, trifft ebenfalls nicht genau zu, denn die meistens gleichzeitig mit den biegenden Momenten auftretende Schubkraft wirkt auf Krümmung der Querschnitte hin. Unter anderen haben aber Bauschinger, Bach u. A. durch Versuche erwiesen, dass bei Schmiedeeisen im rechteckigen Querschnitt die Querschnittsflächen eben und senkrecht zur Stabaxe bleiben, selbst wenn die Durchbiegung erheblich über die Elasticitätsgrenze hinausgetrieben wird. Die oben gemachte Annahme ist daher für vorwiegend auf Biegung beanspruchte Stäbe als zutreffend anzuerkennen.¹⁾

¹⁾ Vergl. indessen, was in Abs. 382 zu Fig. 261 gesagt wird.

f. Dass die vierte Voraussetzung, die Dehnungszahl a sei für Zug und Druck gleich und die Proportionalitätsgrenze nicht überschritten, nur für einige Materialien zutreffend ist, z. B. für Schmiedeeisen oder Stahl, wurde in Abschnitt 37, S. 20 bereits besprochen.

173. Weil man nach Voraufgehendem nicht erwarten darf, dass die Ergebnisse der Biegeversuche mit den Ergebnissen der Theorie übereinstimmen, die auf Grund einer Anzahl von vereinfachenden Annahmen aufgestellt worden ist, darf man auch nicht erwarten, dass die aus den Ergebnissen des Biegeversuches berechneten Bruchspannungen für Zug und Druck mit den aus den Ergebnissen der Zug- und Druckversuche abgeleiteten übereinstimmen (*L 105*, S. 41, No. 26 und S. 97 u. f.). Am wenigsten stimmen sie bei denjenigen Materialien überein, bei denen die Proportionalitätsgrenze überhaupt nicht besteht und bei denen die Dehnungszahl a nicht gleich der Verkürzungszahl ist. (Vergl. aber auch *L 112*.)

Aus diesen Gründen würde es am zweckmässigsten sein, die für die Konstruktion zulässigen Biegebeanspruchungen bei den vorgenannten Materialien nicht aus Zug- und Druckversuchen, sondern unmittelbar aus Biegeversuchen abzuleiten oder wenigstens auf dem Versuchswege die gesetzmässigen Beeinflussungen festzustellen (*L 138*). Dabei würde dann, wie aus dem Voraufgehenden einleuchtet, das Ergebniss mehr oder minder von der Querschnittsform abhängig sein.

174. Nun würde es aber auf der einen Seite erhebliche Kosten und Umstände verursachen, wollte man die Biegefestigkeit der Materialien auch für alle möglichen Querschnittsformen und Belastungsformen ermitteln, und auf der andern Seite würde man bei Berücksichtigung aller Nebenumstände bei Aufstellung der Theorie auf solche Weitläufigkeiten stossen, dass man einstweilen für das Materialprüfungswesen sicher bei den in Abschn. 168—171 benutzten Annahmen stehen bleiben wird. Die einfache Theorie wird man wohl nur in besonderen Fällen durch genaue Rechnung ergänzen, wenn die Verhältnisse so liegen, dass man ihre Wirkungen klar übersehen kann. Für gewöhnlich wird man darauf zu achten haben, dass die Biegeversuche unter solchen Umständen ausgeführt werden, dass möglichst ungetrübte Biegebeanspruchungen auftreten.

Man ist also auch bei den Biegeversuchen darauf angewiesen, die Bedingungen für eine möglichst gute Art der Inanspruchnahme der Stäbe aufzusuchen und die Formen thunlichst so zu wählen, dass man an allen Orten zu unmittelbar vergleichbaren Ergebnissen kommt.

2. Der Biegeversuch.

175. Bei der praktischen Ausführung des Biegeversuches pflegt man dem Probekörper eine der einfachen Querschnittsformen zu geben, von denen man die Trägheitsmomente Θ in den Tabellen der Handbücher für den Konstrukteur entweder zahlenmässig berechnet vorfindet, oder von denen man sie nach einfachen, dort ebenfalls angegebenen Formeln berechnen kann. Kommen complicirte Querschnitte vor, so sind die Trägheitsmomente durch Annäherungsrechnungen oder mit Hilfe eines Momentenplanimeters zu bestimmen.

Ich will auf diese Dinge hier nicht näher eingehen, behalte mir vielmehr vor, hierauf am Schluss des Buches noch zurückzukommen.

176. Wie bereits früher (172) erwähnt, wird der Biegeversuch im Materialprüfungswesen meistens nach Fig. 121, S. 125 so angeordnet, dass der Stab auf zwei Auflager gelegt und in der Mitte belastet wird. Bei stufenweiser Vergrößerung von P pflegt man dann für jede Laststufe die Durchbiegung δ in der Mitte zu messen.

Aus der Kraft P und der erzielten Formänderung δ kann man, wie beim Zerreiß- und Druckversuch, eine Schaulinie (Fig. 126) entwerfen.

Ist für das untersuchte Material a konstant, so ist die Durchbiegung des Stabes gemäss Gleichung 21:

$$\delta = \frac{a Pl^3}{48 \Theta}$$

proportional der Kraft P , und da:

$$\sigma = \frac{Pl e}{4 \Theta},$$

auch proportional der Spannung σ .

Die Schaulinie wird daher anfangs bis zum Punkte P geradlinig sein. P ist die Proportionalitätsgrenze für die Biegung. Von P ab zeigt die Linie eine sanfte Krümmung bis zum Punkte S , wo die Biegungen bei wachsendem P plötzlich stark zunehmen. Den Punkt S nennt man die Biegegrenze, entsprechend der bereits bekannten Streck- und Quetschgrenze (37—39) des Materiales.

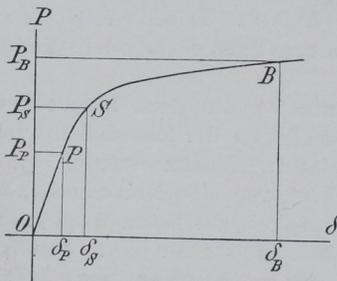


Fig. 126.

Während manche Körper bei Weiterführung des Versuches zu Bruche gehen, also auch die Spannung an der Bruchgrenze (Punkt B , Fig. 126) zu bestimmen gestattet, lassen sich andere auch durch die stärksten Biegungen nicht zum Bruche bringen. In diesen Fällen muss, ebenso

wie beim Druckversuch, die Streckgrenze an Stelle der Bruchgrenze als Gütemaassstab für das Material genommen werden. Für den Technologen ist aber auch hier wiederum der weitere Verlauf des Schaubildes oft von Wichtigkeit, weil er Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit des Materiales gestattet.

177. Nachdem also auch beim Biegeversuch die Punkte P , S und B als charakteristische Punkte hervortreten und die zugehörigen Spannungen und Formänderungen zur Kennzeichnung der Eigenart der Materialien vielfach benutzt werden, ist es wünschenswerth, auch hier eine abgekürzte, leicht übersichtliche Bezeichnung einzuführen. Deswegen wird im weiteren Verlaufe dieses Werkes überall da, wo es darauf ankommt, kurz anzudeuten, aus was für einer Art der Beanspruchung die angegebenen Werthe hervorgingen, neben der Bezeichnung:

σ_P, S, B oder ϵ_P, S, B für Zugbeanspruchung	}	gewonnen aus dem
$\sigma_{-P, -S, -B}$ oder $\epsilon_{-P, -S, -B}$ für Druckbeanspruchung		
Zug- oder Druckversuch, die Bezeichnung:		
$\sigma_{P', S', B'}$ oder $\epsilon_{P', S', B'}$ für Zugbeanspruchung	}	gesetzt werden,
$\sigma_{-P', -S', -B'}$ oder $\epsilon_{-P', -S', -B'}$ für Druckbeanspruchung		

wenn angedeutet werden soll, dass die Werthe durch einen Biegeversuch

festgestellt wurden oder sich auf den Fall der Biegung beziehen. Sind in gleicher Weise die einfachen Zeichen σ , ε kenntlich zu machen, so werden sie geschrieben werden σ_1 , ε_1 u. s. w.

178. Ebenso wie beim Zug- und Druckversuch kann es von Interesse werden, beim Biegeversuch das Verhalten des Materials bei Entlastung und wiederholter Belastung zu studiren. Man kann diese Vorgänge, ebenso wie in Absatz 41, auch hier im Schaubilde zum Ausdruck bringen, indem man die Linien für die bleibende (Biegeungsrest) und elastische Biegung (Federung) verzeichnet.

Auch die Nachwirkungsercheinungen kann man durch den Biegeversuch studiren und kann, wie beim Zug- und Druckversuch, aus den Schaubildflächen die gesammte und die spezifische Formänderungsarbeit für die Biegebeanspruchung ermitteln. (Vergl. 48—54) (*L* 137, § 42, S. 215.)

179. Auch bei den Biegeversuchen treten an den Staboberflächen häufig ähnliche Fließfiguren auf, wie bei den Zugversuchen (88—90), und ebenso sind die Erscheinungen auf den Bruchflächen durchaus charakteristisch. Ich möchte aber auf die Einzelheiten hier noch nicht eingehen und behalte mir vor, hierauf bei Besprechung der Schlagbiegeversuche im Abs. 272 u. f. zurückzukommen und auf Einzelheiten auch bei der Behandlung der Brucherscheinungen bei Dauerversuchen (333 u. f.) näher einzugehen.

180. Was über die eigentliche Versuchsausführung zu sagen ist, bezieht sich auf eine kurze Darstellung der Messverfahren und der Apparate für die Feinmessungen bei Biegeversuchen; indessen sollen an dieser Stelle nur die allgemeinen Grundsätze behandelt werden.

Bei rohen Versuchen wird gewöhnlich durch Anlegen eines Maassstabes die Durchbiegung in der Mitte von einer in Bezug auf die Auflager-

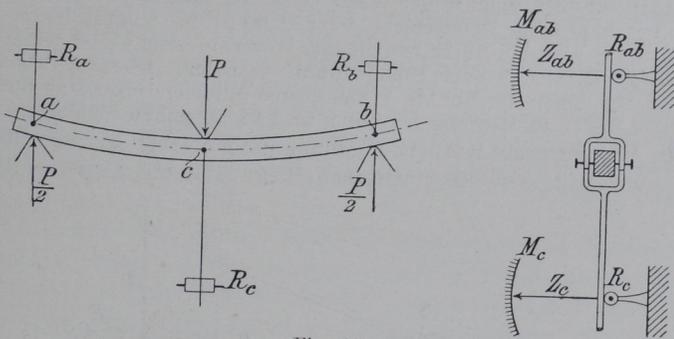


Fig. 127.

punkte festliegenden Marke (Lineal oder gespannter Faden) aus gemessen. Da aber hierbei, wie noch zu zeigen ist (268), Lagenänderungen gegen die Auflager, Verdrückungen in diesen Punkten und unter den Angriffsstellen für die Kraft P nicht wohl vermieden werden können, so müssen namentlich Feinmessungen mit grösster Vorsicht ausgeführt werden, wenn man sich frei von Fehlern machen will.

Man pflegt diese Messungen gewöhnlich von der neutralen Faserschicht ausgehend vorzunehmen. Bauschinger hat hierfür einen sehr sinnreichen Apparat erdacht, dessen Beschreibung gut kennzeichnen wird, worauf es bei

den Apparaten für Biegemessung ankommt. Das Schema der Anordnung ist in Fig. 127 gegeben. In der neutralen Faser werden vor dem Versuch auf den Seitenflächen des Körpers Körnerpunkte a , b und c eingeschlagen, und zwar über den beiden Auflagern in der Entfernung l von einander und in der Stabmitte. Sie dienen den Spitzschrauben der drei Bügel als Festpunkte. Die Bügel tragen in Gelenken (in der Figur nicht angedeutet) bewegliche Stangen, die sich mit ihren Enden auf die Rollen $R a b c$ der Rollenfühlhebel auflegen und diese durch Reibung bewegen, sobald die Punkte a , b , c ihre Lage ändern. Die Bewegungen der Zeiger z werden an den Gradbögen M abgelesen. Das Uebersetzungsverhältniss [Verhältniss der Rollenhalbmesser zum Halbmesser der Messbögen] ist $\frac{1}{20}$ oder $\frac{1}{50}$, so dass man, je nach Benutzung der grossen oder der kleinen Rollen, am Apparate die Bewegungen der Körnerpunkte gegen die fest aufgestellten Rollenständer mit $\frac{1}{2000}$ oder $\frac{1}{5000}$ cm ablesen kann, da die Bögen mit Millimetertheilung versehen sind. Durch die beiden seitlichen Rollen a und c werden die Bewegungen über den Auflagern, durch b diejenigen der Stabmitte gemessen; der Unterschied der Ablesungen

$$c - \frac{a + b}{2} = \delta$$

gibt also die wirkliche Durchbiegung des Stabes in der Mitte an. Bei starken Verbiegungen ändert sich natürlich im Laufe des Versuches die Länge l . (Vergl. hierüber $f 5$ Abs. 266—270.)

Die beiden Messungen über den Auflagern lassen sich vermeiden, wenn man in irgend einer Weise neben dem Probekörper eine feste Latte anbringt, die die Bewegungen der Punkte in der neutralen Faserschicht über den Auflagern ohne Zwang mitmacht, und wenn man dann die Verschiebungen des mittleren Punktes gegen die Latte misst.

Bei Biegeversuchen mit Holzbalken wird in der Charlottenburger Versuchsanstalt zuweilen auch in der Weise verfahren, dass in den Punkten a und b (Fig. 127) der neutralen Faserschicht feine Drahtstifte eingeschlagen werden. Ueber diese Stifte wird ein durch angehängte Gewichte beschwerter feiner Kupfer- oder Stahldraht [Kratzen- oder Blumendraht] gespannt. Dieser Draht dient als Zeigermarke für einen im Punkte c befestigten Millimetermaassstab aus Papier. Man kann bei dieser Einrichtung bis auf etwa 0,02 cm genau ablesen.

181. Hat man mit Körpern zu thun, die nur sehr geringe Biegungen erfahren, oder will man die elastischen Biegungen mit grösserer Genauig-

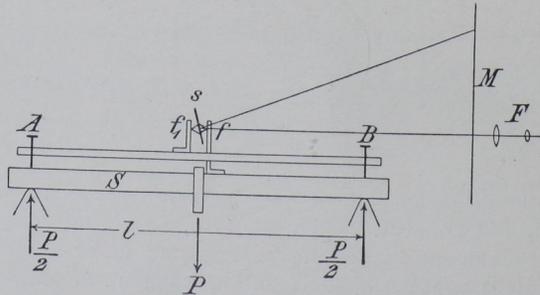


Fig. 128.

keit feststellen, so kann man Spiegelapparate (87) benutzen und die Durchbiegungen mit ausserordentlicher Feinheit feststellen. Auf den Probekörper S (Fig. 128) stellt man eine Latte L mit drei Spitzen [Holzbrett mit

eingeschlagenen Nägeln], von denen eine über dem linken [A] und zwei über dem rechten Auflager B liegen, so dass die Entfernung zwischen den Spitzen in A und B gleich der Stützweite l ist. Auf Stab und Latte werden mit Wachskolophoniumkitt zwei federnde Winkelchen f und f_1 in der Mitte aufgeklebt. Zwischen f und f_1 wird nun der Spiegelkörper genau so eingeschaltet, wie früher beim Zugversuch unter 87 beschrieben. Die Ablesungen geschehen mittelst des Fernrohrs am Maassstab M in der bereits bekannten Weise. Man kann auf diese Weise leicht die Durchbiegungen bis auf $\frac{1}{50000}$ cm schätzen. Die gemessene Gesamtbiegung darf freilich bei dieser Art der Messung nicht über 0,05 cm hinausgehen, aber bei Steinen, Mörtel- und Betonkörpern ist das Verfahren alsdann ein sehr leistungsfähiges.

182. Eine sehr sinnreiche Anwendung des Spiegels benutzte Intze, um seinen Zuhörern die Durchbiegungen eines Stabes nach allen Richtungen sichtbar zu machen. Er verwendete einen Grundsatz, der übrigens auch früher schon befolgt wurde, um feinere Bestimmungen der Durchbiegung von Stäben in einer Ebene auszuführen. Hierbei bestimmt man den Winkel β (Fig. 120, S. 124), den die elastische Linie über den Auflagern mit ihrer

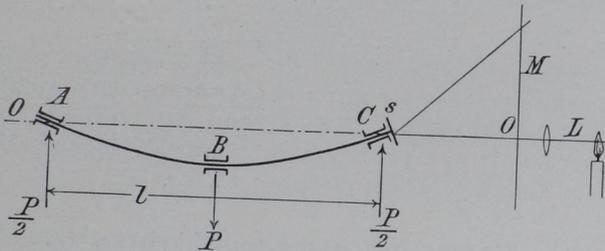


Fig. 129.

ursprünglichen Richtung bildet. An das eine Stabende wird ein Spiegel befestigt, und dessen Winkelbewegung wird abgelesen. Intze lagerte nun seinen Stab derart, dass er ihn unter der Last P um seine ursprüngliche Längsaxe drehen konnte (Fig. 129).

Wurde auf den Spiegel mittelst einer optischen Linsenzusammensetzung L ein dünnes Lichtbündel geworfen, so dass auf der Bildfläche M ein Lichtpunkt erschien, so konnte man den doppelten Winkel β an dem Maassstabe ablesen, oder auf dem Papier anzeichnen. Drehte man nun den Stab [z. B. ein Winkeleisen] und die Papierfläche gemeinsam um die ursprüngliche Mittellinie OO' , so musste sich der Winkel β , entsprechend den verschiedenen Trägheitsmomenten des Stabquerschnittes, für die verschiedenen Lagen des Stabes ändern. Wenn die den verschiedenen Stablagen zugehörigen Bildpunkte in allen Lagen verzeichnet wurden, so erhielt man eine Ellipse, entsprechend der sogenannten Trägheitseellipse des Stabquerschnittes.

183. Für die Materialprüfung wird, wie im Abschnitt 172 und 175 bereits hervorgehoben, der Stab über zwei Auflagern liegend in der Mitte belastet geprüft. Als Ergebnisse des Biegeversuchs pflegt man nach der Gleichung:

$$\sigma_1 = \frac{Pl e}{4 \Theta} \dots \dots \dots 20.$$

Die Spannungen für die
 σ_p , Proportionalitätsgrenze,
 σ_s , Biegegrenze,
 σ_B , Bruchgrenze

und die dazu gehörigen Biegungen δ_1 zu bestimmen.

Aus der Gleichung für die Biegungen und den gefundenen Werthen für δ berechnet sich:

$$\alpha_1 = 48 \frac{\Theta \delta}{l^3 P}, \dots \dots \dots 22.$$

oder wenn man das Verhältniss δ/l als den Biegunbspfeil bezeichnet:

$$\alpha_1 = 48 \frac{\Theta \delta}{l^2 P l} \dots \dots \dots 23.$$

Da der Elasticitätsmodul $E = 1/\alpha$, so ergibt sich:

$$E_1 = \frac{1}{\alpha} = \frac{l^2 P l}{48 \Theta \delta} \dots \dots \dots 24.$$

Bezeichnet man den von der Spannungseinheit erzeugten Biegunbspfeil als die Biegungsgrösse, so ist [Gl. 20 und 23] diese:

$$\frac{\delta/l}{\sigma} = \frac{\alpha Pl^2 4\Theta}{48 \Theta Pl e} = \frac{\alpha l}{12 e} \dots \dots \dots 25.$$

Die Biegungsgrösse ist mit α innerhalb der Proportionalitätsgrenze eine Konstante, die, ausser von dem Material, abhängig ist von dem Verhältniss der Stützweite zur Entfernung der äussersten Faserschicht von der neutralen Faser.

3. Biegung und das Aehnlichkeitsgesetz.

184. Auch für die Biegeversuche kann man aus dem Aehnlichkeitsgesetz gewisse Vortheile ziehen. Kick (*L 100*) spricht das Gesetz für den Fall der Biegung wie folgt aus:

Stäbe geometrisch ähnlicher Form desselben Materiales bedürfen zu ähnlicher Durchbiegung, wenn sie in gleicher Art unterstützt oder befestigt und in gleicher Weise beansprucht sind, Belastungen, welche sich proportional ihren Querschnitten verhalten.

Die Worte „wenn sie in gleicher Art unterstützt“ und „in gleicher

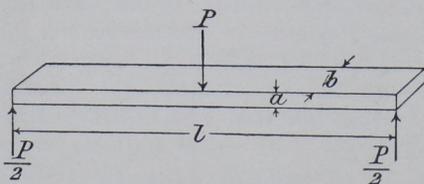


Fig. 130.

Weise beansprucht sind“ können leicht missverstanden werden. Es ist daher darauf aufmerksam zu machen, dass sie sich nicht ganz allgemein auf die Art und Weise der Versuchsanordnung beziehen; im Besonderen müssen vielmehr auch die Abmessungen der Auflager- und Befestigungstheile geometrisch ähn-

liche Abmessungen erhalten, wenn die Bedingungen des Gesetzes streng erfüllt sein sollen.

185. Um die Begründung für das Gesetz zu suchen, seien zwei

geometrisch ähnliche Körper A und A_1 von prismatischer Form (Fig. 130) untersucht. Alle Werthe, die sich auf A beziehen, werden ohne Index, die auf A_1 bezüglichen mit dem Index 1 bezeichnet.

In den beiden Körpern verhalten sich:

1. die Längen $\frac{a}{a_1} = \frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n}$,
2. die Flächen $\frac{ab}{a_1 b_1} = \frac{\cancel{l}}{\cancel{l_1}} \frac{1}{n^2}$,
3. die Körperinhalte und Gewichte $\frac{J}{J_1} = \frac{G}{G_1} = \frac{1}{n^3}$,
4. die Trägheitsmomente $\frac{\Theta}{\Theta_1} = \frac{1}{n^4}$.

Wenn die Durchbiegungen durch den Biegeungspfeil ausgedrückt werden, so ist eine ähnliche Formänderung in beiden Proben A und A_1 erzeugt, wenn:

$$\frac{\delta}{l} = \frac{\delta_1}{l_1} \text{ ist,}$$

denn es wird:

$$\frac{\delta}{\delta_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n}.$$

Aus der Gleichung 23, S. 134, ergibt sich für Körper A :

$$\frac{\delta}{l} = \frac{\alpha P l^2}{48 \Theta} \text{ und für Körper } A_1:$$

$$\frac{\delta_1}{l_1} = \frac{\alpha P_1 l_1^2}{48 \Theta_1} \text{ d. h. } = \frac{\alpha P_1 l^2 n^2}{48 \Theta n^4} = \frac{\alpha P_1 l^2}{48 \Theta} \frac{1}{n^2}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{\delta}{l} \cdot \frac{l_1}{\delta_1} = 1 = \frac{\alpha P l^2}{48 \Theta} \cdot \frac{48 \Theta n^2}{\alpha P_1 l^2} = \frac{P}{P_1} n^2.$$

Der gleiche Biegeungspfeil, d. h. geometrisch ähnliche Formänderung, wird also erzielt, wenn die Belastungen sich verhalten wie 1 zu n^2 oder wie die Querschnittsflächen.

Das Verhältniss der Spannungen ergibt sich aus:

$$\sigma = \frac{P l}{4} \cdot \frac{e}{\Theta} \text{ und, da } e_1 = e n \text{ und } P_1 = P n^2,$$

$$\sigma_1 = \frac{P_1 l_1}{4} \cdot \frac{e_1}{\Theta_1} = \frac{P n^2 l n}{4} \cdot \frac{e n}{\Theta n^4} = \frac{P l}{4} \cdot \frac{e}{\Theta}, \text{ so wird}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = 1 \text{ oder}$$

Gleiche Spannungen erzeugen in geometrisch ähnlichen Körpern gleiche Biegeungspfeile.

Benutzt man also zur Auftragung der Schaulinien die Spannungen σ und den Biegeungspfeil δ/l , so erhält man für geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material aufeinanderfallende Schaulinien.

186. Das Aehnlichkeitsgesetz gilt ganz unabhängig von der Biegeungs-

theorie für jede Formänderung, auch für die bleibenden Formänderungen, und wenn seine Forderungen beim Versuch nicht erfüllt erscheinen, obwohl alle Grundbedingungen über die Aehnlichkeit der Verhältnisse innegehalten sind, so können nur Unterschiede im Material wirkend gewesen sein.

Um also vergleichbare Ergebnisse unter solchen Verhältnissen zu erzielen, die es unmöglich machen, völlig gleichgestaltete Probestäbe zu benutzen, empfiehlt es sich, in diesen Fällen wenigstens geometrisch ähnliche Stabformen zu verwenden.

Die Belastungsstufen sind dabei proportional den Quadraten der Längenabmessungen, beziehungsweise proportional den Querschnittsflächen zu machen und die Biegungen zweckmässig als Biegungspfeil aufzuschreiben. Die Biegungsgrösse und die Dehnungszahl a sind dann innerhalb der Proportionalitätsgrenze konstante Zahlen und die Biegungspfeile auch über die Elasticitätsgrenze hinaus für die gleichen Spannungen gleich, sobald die Stäbe verschiedener Grösse aus gleichem Material von gleichem Zustande hergestellt sind.

Man erkennt auch hier wieder die Wichtigkeit der Einführung einheitlicher Prüfungsverfahren, die von möglichst weiten Kreisen anerkannt werden. Die Versuche von Bach (*L 138*) mit Gusseisenstäben von verschiedener Form lehren sehr schlagend den geringen Werth, den die Mittheilung von Prüfungsergebnissen aus einem Biegeversuch mit Gusseisen hat, wenn nicht zugleich die Angaben über die benutzten Querschnittsformen beigefügt sind, oder wenn nicht angegeben wird, dass die Ergebnisse auf einen einheitlichen Querschnitt, z. B. das Quadrat oder den Kreis mit den Erfahrungszahlen umgerechnet wurden. Die Erfahrungszahlen sind übrigens noch sehr spärlich und bedürfen der Vermehrung um so dringender, als es keineswegs ausgeschlossen ist, dass sie mit den äusseren Umständen [Verhältnisse beim Giessen, Abkühlen u. s. w.] zusammenhängen.¹⁾

Für die Prüfung von Gusseisen haben diese Erörterungen besonderen Werth, weil dieses Material sehr häufig und unzweifelhaft am zweckmässigsten durch den Biegeversuch geprüft wird. Bei uns in Deutschland ist vielfach der von den Konferenzen zur Vereinheitlichung der Materialprüfungsverfahren (*L 128*) empfohlene Stab von quadratischem Querschnitt mit 3,0 cm Seite und 1 m Stützweite im Gebrauch. Man sollte diesen Stab möglichst allgemein einführen, und wo seine Anwendung unmöglich, wenigstens mit Stäben arbeiten, deren Verhältniss der Stützweite zur Quadratseite

$$l/a = 33,3$$

genommen ist. Uebrigens ist die Art des Giessens und der Umstand, ob die Gusshaut an den Stäben vorhanden ist oder nicht, von erheblichem Einfluss auf das Ergebniss (*L 138*).

c. Knickfestigkeit.

1. Begriffsentwicklung.

187. Die Ausführung des Knickversuches gehört im eigentlichen Materialprüfungswesen zu den Ausnahmen. Kommt ein Knickversuch vor, so handelt es sich fast immer um die Feststellung der Formänderung (Ausbiegung) von Konstruktionstheilen unter Probelasten, z. B. um Prüfung

¹⁾ Jedenfalls ist auch das Verhältniss $\sigma_B : \sigma_B'$ für Gusseisen von dessen chemischer Zusammensetzung abhängig.

von Ständern, Säulen, Gestängen, Brückengliedern u. s. w., selten aber um die vollständige Ermittlung der Materialkonstanten.

Ich will daher auf eine Entwicklung der Knickungstheorien nicht eingehen, sondern kurz die Eulerschen Gleichungen (189) hinschreiben, die ja die wichtigste Grundlage für die Knickungstheorie zu bleiben scheinen. Im Uebrigen verweise ich auf die Werke über Festigkeitslehre von Bach (*L 137*), Grashof (*L 139*) u. A. oder auf die eingehenden Versuche von Bauschinger (*L 140*), Tetmajer (*L 141. 142*) u. A. Bauschinger kommt zu dem Schluss, dass die Eulerschen Gleichungen ausreichend für die Theorie der Knickung sind; Zimmermann (*L 143*) ist gleicher Ansicht. Eine hübsche Herleitung der Eulerschen Gleichungen gab neuerdings Land (*L 144*).

188. Wenn ein langer prismatischer Stab auf Druck geprüft wird, so wird er fast niemals, wie der kurze Körper gleichen Querschnittes, ausbauchen und tonnenförmige Gestalt annehmen, oder die in Absatz 125 mitgetheilten Brucherscheinungen zeigen. Er wird vielmehr fast immer nach der einen oder anderen Seite ausbiegen, und die Brucherscheinungen werden denjenigen ähnlich sein, die man beim Biegeversuch erhält.

Der lange Körper ist niemals ganz streng geradlinig; auch ist es fast unmöglich, ihn so in die Maschine einzuspannen, dass die Krafrichtung genau in die Schwerpunktsaxe des Körpers fällt. Ebenso sind Nebenspannungen, die auf Verbiegen wirken, z. B. die aus mangelhafter Anlage in den Druckflächen, oder bei wagerechter Anordnung der Probirmaschine, in Folge der aus dem Eigengewichte des Probekörpers sich ergebenden Verbiegungen, fast gar nicht zu vermeiden; sie treten im Laufe des Versuches hervor. Alle diese Umstände veranlassen, dass neben der Druckbeanspruchung auch noch Biegungsbeanspruchungen auftreten. Das auf Biegung wirkende Moment ist bei kurzen Körpern klein, und die Kraft P kann noch die Druckfestigkeit überwinden. Aber wenn die Körper im Verhältniss zu den Querschnittsabmessungen lang genug werden, so vergrössert sich unter dem Einfluss der in der Richtung der Stabaxe wirkenden Kraft P der Hebelarm des Biegemomentes schliesslich unaufhaltsam, und der Körper geht nun durch seitliches Ausbiegen zu Bruche. Die Ausbiegung erfolgt, wenn der Körper frei ausweichen kann, in der Regel in der Ebene, welcher das kleinste Trägheitsmoment des Körpers entspricht. War eine merkliche Anfangsbiegung vorhanden, wie das z. B. bei wagerechter Lagerung an langen Körpern vorkommen kann, so pflegt die Durchbiegung bei Körpern, deren Trägheitsmomente für verschiedene Richtungen gleich oder fast gleich sind, in der Regel in der Ebene der ersten Biegung zu verlaufen.

189. Je nach der Art, wie der Körper an seinen Enden befestigt ist, wird die Entwicklung der Form der elastischen Linie beim Knicken und demgemäss auch die Grösse der zum Knicken erforderlichen Kraft, eine andere. Man pflegt vier Angriffsformen zu unterscheiden.

a) Der Körper ist, wie in Fig. 131 angedeutet, an einem Ende fest eingespannt, und die Kraft P wirkt auf das andere Ende parallel zur ursprünglichen Stabaxe, aber sonst ungezwungen ein; das freie Ende des Stabes kann also ganz ungezwungen seitlich ausweichen. Dieser Fall kommt im Prüfungswesen fast gar nicht vor.

b) Der Körper ist, nach Fig. 132, an beiden Enden frei beweglich (in Schneiden-, Spitzen- oder Kugelgelenken), aber die Enden

sind so geführt, dass die Krafrichtung stets durch die Stützmittelpunkte geht. Dieser Fall wird bei Versuchen häufig benutzt.

c) Der Körper ist, nach Fig. 133, wie im Fall *a* fest eingespannt und am andern Ende wie bei Fall *b* beweglich und geführt.

d) Der Körper ist, nach Fig. 134, an beiden Enden fest eingespannt, aber die Enden sind so geführt, dass die Krafrichtung stets durch die Stützmittelpunkte geht. Bei Versuchen häufig angewendet.

Die für diese vier Fälle sich ergebenden Grenzbelastungen *P*, bei welchen nach Bauschinger die bereits von vornherein vorhandenen und bei der langsamen Steigerung der Belastung zuerst langsam wachsenden

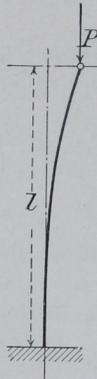


Fig. 131.

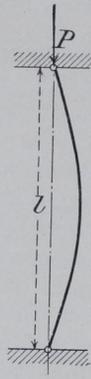


Fig. 132.

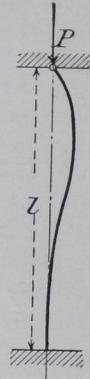


Fig. 133.

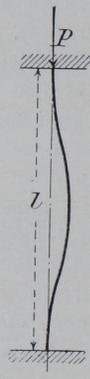


Fig. 134.

Ausbiegungen fast plötzlich jedes Maass überschreiten,¹⁾ sind durch die folgenden vier Eulerschen Gleichungen für die einzelnen Belastungsarten gegeben, und zwar beim Vorgange nach Fig. 131:

$$a) P = \frac{\pi^2}{4} \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \dots \dots \dots 26.$$

wenn *a* die Dehnungszahl, *l* die Stablänge und Θ das für die Biegungrichtung maassgebende Trägheitsmoment ist.

Beim Vorgange nach Fig. 132 wird:

$$b) P = \pi^2 \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \dots \dots \dots 27.$$

bei Beanspruchung nach Fig. 133 wird:

¹⁾ Bach (*L 137*, §. 24) giebt für die Ausbiegung *y* im Fall *a* die Gleichung:

$$y = a \frac{1 - \cos\left(x \sqrt{\frac{aP}{\Theta}}\right)}{\cos\left(e \sqrt{\frac{aP}{\Theta}}\right)} \text{ und}$$

stellt hierzu eine sehr anschauliche Rechnung über die Biegungen an, die ein schmiedeeiserner Stab von 100 cm Länge und 1 cm Durchmesser erfährt, wenn *P* allmählich wächst. Wenn *a* der unbekannt kleine Hebelarm ist an dem die Kraft *P* das Biegemoment erzeugt, so wird für

Belastung *P* = 5 10 15 20 22,5 24,7 kg,
 die Biegung *S* am Stabende 0,32*a* 0,85*a* 1,95*a* 5,54*a* 13,16*a* ∞*a*, der Stab knickt aus.

$$c) P = 2\pi^2 \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \dots \dots \dots 28.$$

und wenn Fig. 134 in Frage kommt:

$$d) P = 4\pi^2 \frac{1}{a} \frac{\Theta}{l^2} \dots \dots \dots 29.$$

Bei Anwendung dieser Formeln für die Rechnung muss man im Auge behalten, dass man hinsichtlich ihrer Ableitung gegen die Voraussetzungen ähnliche Einwendungen machen kann, wie sie in Abschnitt 172 gegen die Biegungstheorie vorgeführt wurden. Auch wird man nicht vergessen dürfen, dass die vier Belastungsformen praktisch nie zum Ausdruck kommen, dass es vielmehr Uebergänge von einem Fall zum andern giebt, ja dass es sogar vorkommen kann, dass während des Versuches die Art der Inanspruchnahme von einem Fall zum andern überspringt. Der Konstrukteur muss diese Möglichkeiten von Fall zu Fall erwägen. Aus diesen Gründen haben die empirisch abgeleiteten Formeln wohl nicht immer den praktischen Werth, den sie scheinbar wegen der Uebereinstimmung mit den Versuchsergebnissen besitzen, aus denen sie abgeleitet wurden.

2. Der Knickversuch.

190. Die Einspannvorrichtungen für die Ausführung von Knickversuchen müssen so eingerichtet sein, dass der Körper seine Form möglichst ungetrübt nach einer der in Fig. 131 bis 134 gegebenen Arten ändert. Deswegen pflegt man die Körper selbst oder besondere Auflagerstücke mit Schneiden, Spitzen oder Kugeln zu versehen, und im letzteren Falle richtet man es auch wohl so ein, dass die Auflagerstücke auch unverrückbar fest mit den Maschinentheilen verbunden werden können.

In Fig. 38, Absatz 73, S. 44, ist die Einspannvorrichtung für die Werdermaschine schematisch angegeben. Die Platte ist in der Kugelschale entweder frei beweglich [allerdings durch die Reibung auf der Kugelfläche gehindert], oder sie kann mit Hilfe von vier Schrauben unbeweglich eingestellt werden.

191. Die Messung der Formänderung ist meistens eine etwas umständliche Sache. Am einfachsten kann sie sich in den Fällen gestalten, in denen die Körper selbst mit den Schneiden, Spitzen oder Kugeln für die Auflagerung versehen sind, und wenn man sicher ist, dass die Auflagerpunkte keinerlei Seitenverschiebung erfahren können. Das wird aber nur selten der Fall sein, und bei Feinmessungen ist man daher darauf angewiesen, immer die Möglichkeit der Verschiebung an den Auflagern vorzusetzen.

Sind die Seitenbewegungen in den Auflagern ausgeschlossen, so genügt es, die Messung der Durchbiegung in der Stabmitte, bezogen auf zwei feste Punkte im Raum, vorzunehmen, so dass die beiden Bewegungskomponenten in der Ebene des Mittelquerschnittes rechtwinkelig zu einander festgestellt werden. Im zweiten Falle wird man in gleicher Weise auch noch die Bewegungskomponenten in zwei möglichst nahe den Auflagern liegenden Querschnittsebenen messen, und dann die wirkliche Stabbiegung aus allen diesen Messungen rechnerisch oder zeichnerisch ermitteln; allerdings ein umständliches aber nothwendiges Verfahren.

192. Bauschinger hat auch für diese Art der Messung sehr zweckmäßige Apparate konstruirt, deren schematische Zeichnung in Fig. 135 gegeben ist. Die Bewegungen des Säulenquerschnittes S , in Folge der Aus-

knickung in der Richtung AB , werden mittelst der in eine Körnermarke eingreifenden Spitze der Stange h auf den Zeiger Z übertragen, der an einem mit dem Maschinengestell fest verbundenen Rahmen G seinen Drehpunkt hat und die Bewegungskomponente von S in AB in doppeltem Maassstabe am Messbogen M anzeigt. Ganz in gleicher Weise werden die Komponenten in CD durch die Stange h_1 auf den Zeiger Z_1 übertragen, der an M_1 die Bewegung ebenfalls in doppeltem Maassstabe anzeigt. Die Messbogen werden zu Anfang durch eine Einstellvorrichtung auf Null gestellt; sie tragen positive und negative Bezifferung, so dass man aus der Ablesung den

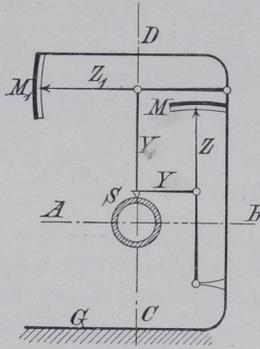


Fig. 135.

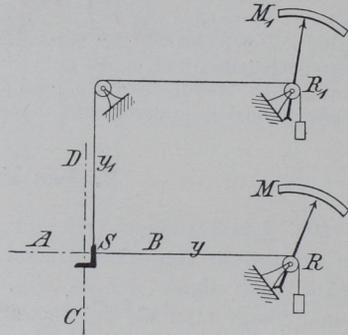


Fig. 136.

Quadranten erkennt, in den der Mittelpunkt des Querschnittes eintritt. Bauschinger wendet drei solcher Apparate an, wie oben angegeben; sie arbeiten recht sicher.

193. Bauschinger hat gelegentlich auch seinen in Abschnitt 77, S. 47, Fig. 42 beschriebenen Rollenapparat benutzt, indem er ihn, wie in Fig. 136 angedeutet, aufstellte. Die Bewegungen des Stabquerschnittes S werden durch die Drähte Y und Y_1 auf die Rollen R und R_1 übertragen und von den Zeigern im zehnfachen oder zwanzigfachen Maassstabe angezeigt. Die Stützen für alle Rollen müssen natürlich fest im Raume stehen.

194. Man kann das Bauschingersche Verfahren ganz gut auch für Selbstaufzeichnungen bis zu etwa fünffacher Vergrößerung benutzen, wenn man nach Fig. 137 an leichten Holzhebeln H eine Tafel P und einen Schreibstift Z befestigt. Der Stift wird dann Biegungsrichtung und Biegungsgrösse angeben, und man braucht keine Berechnung aus Beobachtungswerthen anzustellen.

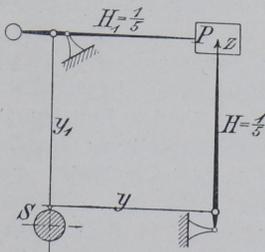


Fig. 137.

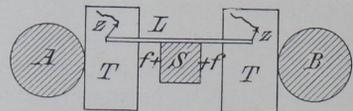


Fig. 138.

195. Im Ingenieur-Laboratorium in Boston, Mass., wird an der Emerymaschine, die in Fig. 138 schematisch angedeutete Einrichtung benutzt, um die Verbiegungen der Knickprobe selbstthätig aufzuzeichnen.

Zu dem Zweck ist an dem Probestab S eine Latte L befestigt, die mittelst der beiden Zeiger Z die Bewegungen ihrer Endpunkte auf die Tafeln T verzeichnet, die ihrerseits mit den Säulen A und B des Maschinengestells fest verbunden sind. Aus den Aufzeichnungen werden die Bewegungen des Stabmittelpunktes in der Querschnittsebene von S abgeleitet. Man misst übrigens durch die beiden bei f angebrachten Mikrometer zugleich auch die Zusammendrückungen des Stabes in der Längsrichtung.

196. Bauschinger hat, um sich von der Messung der Verschiebungen an beiden Stabenden frei zu machen und die Messung nur auf die Mittelebene zu beschränken, die in Fig. 139 schematisch angedeutete Einrichtung getroffen. Auf dem Stabe S sind drei zweitheilige auseinander klappbare Ringe R durch je vier Stellschrauben befestigt. Die beiden äusseren Ringe tragen auf Vorsprüngen die lose aufliegende Latte L . Der mittlere Ring trägt die beiden Ablesemikroskope M_1 und M_2 , von denen das eine am Objektiv-Mikrometer O_1 die Verschiebungen des Stabes in senkrechter Richtung angiebt; das Mikroskop M_2 misst an O_2 die Verschiebung in wagerechter Richtung. Die Latte L ist durch die Eigenbewegungen der beiden Stützpunkte nur äusserst wenig beeinflusst, so dass man ihre Lage in Bezug auf die Mittelpunkte des Stabquerschnittes in der Befestigungsebene der Lattenenden als unverrückbar ansehen darf. Man misst also unmittelbar die beiden Komponenten der Durchbiegungen des Stabes, bezogen auf die Lattenlänge l . Die Messungen sind aber etwas umständlich und erfordern geübte Beobachter.

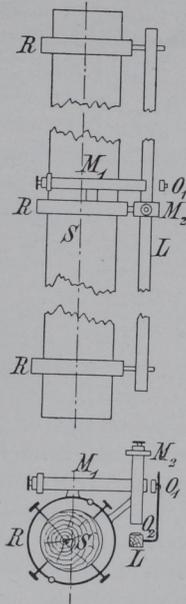


Fig. 139.

197. Für die Knickversuche werden meistens liegend angeordnete Maschinen gebraucht, weil diese Versuche vielfach ausgeführt werden, um grosse Körper, Säulen u. s. w. zu probiren und weil aufrechtstehende Maschinen für lange Stücke unbequem werden. Bei den liegenden Maschinen hat man besondere Vorkehrungen für zwanglose Aufhebung des Eigengewichtes der Probekörper zu treffen, falls man feine Versuche durchführen will. Bauschinger hat dies bei der Werdermaschine gethan, indem

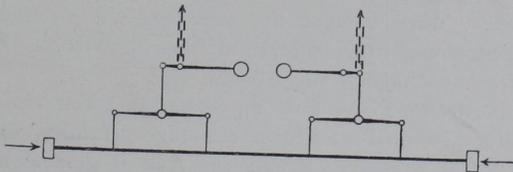


Fig. 140.

er unter die Säule Balancirhebel angreifen liess, die ihre Stütze am Maschinengestell hatten. Man muss solche Hebel dann aber so einrichten, dass sie auch die Seitenbewegungen der Säule ohne Zwang gestatten. Wo Krane über der Maschine vorhanden sind, kann dies leicht und recht vollkommen geschehen, indem man nach Maassgabe von Fig. 140 die Probe

an Hebeln aufhängt, wobei die Stützpunkte so gewählt werden können, dass die Biegungen unter dem Eigengewicht zwischen den Stützpunkten ein Minimum werden. Tetmajer giebt (*L 142*, S. 22) eine Aufhängung in Federn an.

198. Bei den Knickversuchen wird meistens die grösste Durchbiegung unter einer vorgeschriebenen Probelast gemessen und festgestellt, ob bleibende Durchbiegungen vorhanden sind oder nicht. Wird der Versuch als Materialprüfung bis zur Zerstörung durchgeführt, so pflegt man die Durchbiegung für bestimmte Laststufen bis zur Erreichung der Grenzbelastung zu messen, bei welcher unaufhaltsames Ausweichen des Körpers oder der Bruch stattfindet.

Will man Schaubilder über die Grösse der Biegungen unter verschiedenen Lasten verzeichnen, so können hierzu natürlich nur die absoluten Biegungen benutzt werden. Man wird innerhalb der Proportionalitätsgrenze proportionale Biegungen finden, indessen meistens durch viele Zufälligkeiten getrübt.

d. Verdrehungsfestigkeit.

1. Begriffsentwicklung.

199. Ebenso wie die Knickfestigkeit, wird die Verdrehungs- oder Verwindungsfestigkeit im eigentlichen Materialprüfungswesen selten festgestellt (*L 136*, 1896 S. 1381). Wenn dies geschieht, so pflegt es sich meistens um die Prüfung cylindrischer Stücke, namentlich von Wellen und Axen zu handeln. Die Prüfung von Konstruktionstheilen auf Festigkeit gegen Verdrehen kommt vor, ist aber dann nicht mehr Aufgabe des Materialprüfungswesens. Ich gebe deswegen nur die Gleichungen für den kreisförmigen Querschnitt und verweise auch hier wieder auf die Werke über Festigkeitslehre, z. B. von Bach, Grashof u. A. (*L 137* und *139*), sowie auf die eingehenden Arbeiten von Bauschinger (*L 145*) und Bach (*L 138*).

200. Ein gerader prismatischer Körper wird allein auf Verdrehung beansprucht, wenn die auf ihn wirkenden äusseren Kräfte in allen Querschnitten nur ein Kräftepaar erzeugen, dessen Ebene senkrecht zur Axe des Körpers steht.

Das Drehmoment M_a der Kräftepaare bewirkt eine Verdrehung des Endquerschnittes 2 gegen den Endquerschnitt 1 des Körpers Fig. 141. Die Erfahrung lehrt, dass hierbei die ursprünglich ebenen Querschnitte auch nach der Verdrehung eben sind, und dass die Grösse der Verdrehung des Stabes in allen Abschnitten die gleiche ist.

Ist nun die Verdrehung, die zwei im Abstände 1 von einander stehende Querschnitte 1 und 2, Fig. 142, gegen einander erfahren, die Schiebung γ senkrecht zu OA im Abstände r von der Axe O gemessen, so wird für den Punkt B im Abstände r' von der Axe die Schiebung:

$$\gamma' = \gamma \frac{r'}{r}$$

sein, d. h. die Schiebungen sind proportional dem Abstände r' an der Axe O ; ihre Grösse für verschiedene Abstände r' ist durch die Gerade $A'O$ bestimmt.

Wird die in die Querschnittsfläche fallende senkrecht zu OA wirkende Schubspannung mit τ bezeichnet, und nennt man die Schiebung, welche durch $\tau = 1$ at (kg/qcm) erzeugt wird, die Schubzahl β , entsprechend der Dehnungszahl a , so ist

$$\tau' = \frac{\gamma'}{\beta} \dots \dots \dots a)$$

die Spannung in der Entfernung r' von der Axe O .

Die Schubzahl β ist, ebenso wie die Dehnungszahl a , für gewisse Materialien bei niedrigen Spannungen eine Unveränderliche; für andere Materialien, z. B. Gusseisen, ist sie von Anfang an eine Veränderliche. Im ersteren Falle ist also mit γ auch τ proportional dem Abstände von der Axe O ; ihre Grösse für verschiedene r' ist durch die Gerade $A''O$ bestimmt.

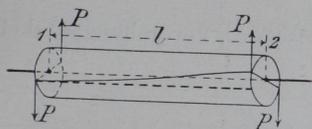


Fig. 141.

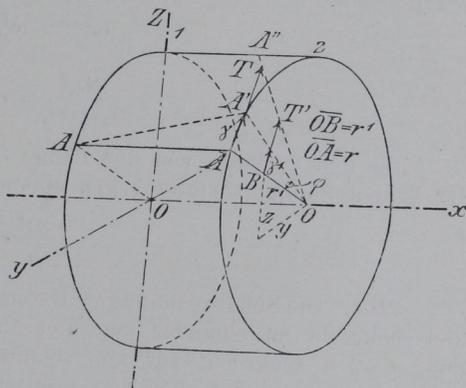


Fig. 142.

Im zweiten Falle ändert sich τ nach dem gleichen Gesetz wie β ; an Stelle der Linie $A''O$ bestimmt eine gekrümmte Linie die Grösse von τ für die verschiedenen Abstände von O .

201. Die äusseren und inneren Kräfte im verdrehten Körper müssen im Gleichgewicht sein, d. h. das am Körper wirkende Drehmoment M_a muss gleich dem Moment der Schubkräfte τ werden, also:

$$M_a = \int \tau df r'$$

da $\tau = \frac{\gamma'}{\beta} = \gamma \frac{r'}{r} \cdot \frac{1}{\beta}$, so wird:

$$M_a = \frac{\gamma}{r} \int \frac{1}{\beta} r'^2 df \text{ und}$$

für den Fall, dass auch β unveränderlich:

$$M_a = \frac{\gamma}{r} \cdot \frac{1}{\beta} \int r'^2 df.$$

Wegen $r'^2 = y^2 + z^2$ (Fig. 142) und wenn:

$$\int y^2 df = \Theta_z \text{ und } \int z^2 df = \Theta_y$$

die Trägheitsmomente bezogen auf die Z- und Y-Axe sind [für den Kreisquerschnitt einander gleich], so wird:

$$M_d = \frac{\gamma}{r} \frac{1}{\beta} (\Theta_y + \Theta_z) = \tau \frac{(\Theta_y + \Theta_z)}{r} = \tau \frac{\Theta_p}{r}, \dots 30.$$

worin $(\Theta_y + \Theta_z) = \Theta_p$ das polare Trägheitsmoment genannt wird.

Für den Kreisquerschnitt ergibt sich also:

$$\Theta_y = \Theta_z = \frac{\pi}{4} r^4 \text{ und}$$

dementsprechend:

$$M_d = \tau \frac{\Theta_p}{r} = \tau \frac{\pi}{2} r^3.$$

Die Verdrehung des Querschnittes 2 gegen Querschnitt 1, der kleine Verdrehungswinkel S , Fig. 142, ist:

$$\varphi = \frac{\gamma}{r} \text{ oder nach Gl. 30:}$$

$$\varphi = \frac{M_d \beta}{\Theta_y + \Theta_z} = \frac{2\beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4}.$$

Für den Cylinder von der Länge l wird also der Verdrehungswinkel der beiden Endquerschnitte gegen einander:

$$\varphi_l = \frac{2\beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4} l \dots 31.$$

202. Die Schubspannungen treten immer paarweise (*L 137*, § 30.32.) und senkrecht zu einander gerichtet auf. Dementsprechend ist die Spannung τ auch senkrecht zur Querschnittsfläche in der Richtung der Axe vorhanden und nimmt auch hier proportional der Entfernung von der Axe zu, wenn β unveränderlich, oder wächst nach dem Gesetze von β , wenn dieses veränderlich. Die Folgen dieser Schubspannungen kann man an Körpern, deren Material nach den verschiedenen Richtungen verschiedene Schubfestigkeit hat, leicht erkennen. Walzeisen, Drähte u. s. w. zeigen beim Verdrehen leicht Verschiebungen des Materiales längs ihrer Fasern, die dann am verwundenen Stück oft sehr deutlich hervortreten.

2. Der Drehversuch.

203. Die Einspannung der Probekörper in die Maschine ist bei den Drehversuchen so auszuführen, dass der Körper nur ein Drehmoment erleidet und Nebenwirkungen möglichst ausgeschlossen sind; das ist meistens

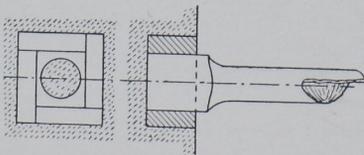


Fig. 143.

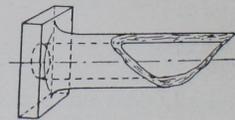


Fig. 144.

keine leichte Sache, und daher giebt es viele Arten der Einspannung, die ausführlicher bei Beschreibung der einzelnen Maschinen zu erörtern sind.

Bei Gusseisen und ähnlichen Materialien wird man den Probekörper in den meisten Fällen für den Versuch besonders giessen und kann dann

den, am besten cylindrisch oder prismatisch geformten Stab mit einem angegossenen Kopf versehen, der sich für die zur Verfügung stehende Maschine eignet. Bauschinger und Bach benutzten die in Fig. 143 und 144 skizzirten Stabformen, bei denen die angegossenen Vierkante, wenn nöthig mit Hilfe von Beilagestücken, in die entsprechenden Höhlungen der Werder-Maschine passten.

Müssen oder können die Proben aus grösseren Stücken herausgearbeitet werden, so pflegt man kleinere ähnliche Formen mit vierkantigen Enden, Fig. 145, zu verwenden. Kann man aber solche besonderen Köpfe nicht anarbeiten, sondern muss man die glatten cylindrischen Stäbe [Wellen und

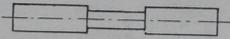


Fig. 145.

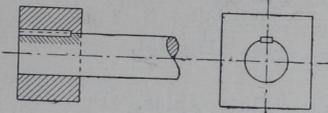


Fig. 146.

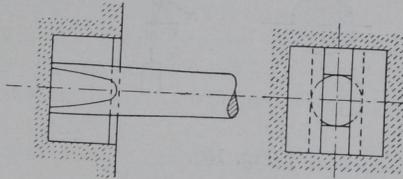


Fig. 147.

Rohre] als solche einspannen, so pflegt man mit Nuthe und Feder besondere Vierkante auf die Enden aufzuziehen, Fig. 146, oder man flacht das Wellenende mit schlankem Uebergange ab, Fig. 147. Bei diesen beiden Arten der Einspannung tritt leicht Bruch am Auflager ein. Zuweilen findet man auch Klemmkeile, die am Umfange der Welle wirken, ähnlich wie die Beisskeile in den Einspannungen für den Zugversuch und die sich mit wachsendem Drehmoment immer fester anspannen.

204. Die Messung der Verdrehung geschieht in der Regel an einem bestimmt abgegrenzten Stück des prismatischen Körpers mit der Messlänge l entweder durch Zeiger am Gradbogen oder durch Spiegelapparate.

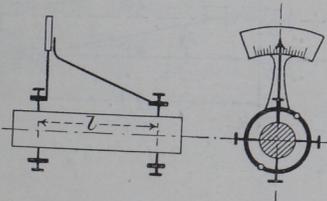


Fig. 148.

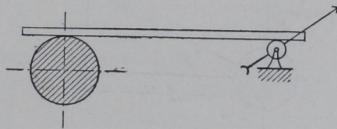


Fig. 149.

Man kann den Zeigerapparat etwa nach dem Schema der Fig. 148 konstruiren, indem man mit vier Spitzenschrauben den Gradbogen A so am Körper centrirt, dass der Mittelpunkt der Theilung möglichst genau in die Stabaxe fällt. In der Entfernung l wird dann der Zeiger Z ebenfalls mit Spitzenschrauben angeklemt. Der Verdrehungswinkel wird am Gradbogen abgelesen. Auch die bereits besprochenen (77, 180, 193) Bauschingerschen Rollenapparate lassen sich in sehr praktischer Weise für die Verdrehungsmessung benutzen, indem man zwei solche Apparate in den um l von einander entfernten Querschnittsebenen des Probestabes nach Maassgabe von Fig. 149 oder von Fig. 150 aufstellt und die Ablesungs-

unterschiede beider Apparate als Maass für die Verdrehung aufschreibt; man erhält die Verdrehung auf diese Weise in zehn- oder zwanzigfacher Vergrösserung. Der Apparat Fig. 149 arbeitet mit aufgelegtem Stab, der Apparat Fig. 150 mit feinem Blumendraht.

205. Für die Bestimmung des elastischen Verhaltens hat Bauschinger zwei Fernrohre benutzt, die er auf zweitheiligen Ringen zum Auseinanderklappen mittelst je vier Spitzenschrauben in den Endquerschnitten der Messlänge festklemmte, Fig. 151, und mit deren Hülfe er die Verdrehung

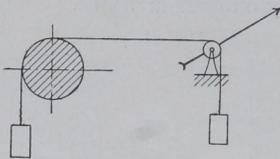


Fig. 150.

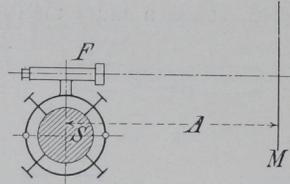


Fig. 151.

an entsprechend aufgestellten geraden Maassstäben ablas. Bei der Entfernung A des Maassstabes vom Stabmittelpunkt liest man am Millimetermaassstab den kleinen Verdrehungswinkel φ ab, wenn $A = 3^m$,

$$\varphi = \text{tg } \varphi = 1/3000$$

und schätzt ihn bis auf $1/30\,000$. Für grosse Verdrehungswinkel muss der Fehler wegen Ablesung am geraden Maassstab berücksichtigt werden [es gilt nicht mehr $\varphi = \text{tg } \varphi$]. Ausserdem wird bei der Aufstellung der Fernrohraxe ausserhalb der Drehaxe des Probestabes die Ablesung fehlerhaft, wie

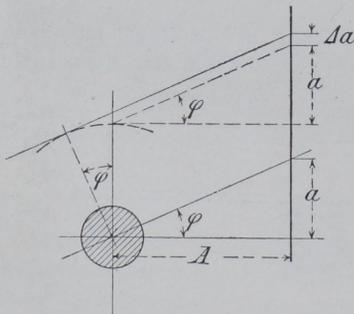


Fig. 152.

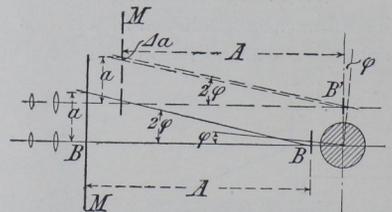


Fig. 153.

aus Fig. 152 einleuchtet, in welcher Δa der sich ergebende Fehler der Ablesung a sein würde.

206. Der Spiegelapparat von Martens kann bei Aufstellung nach Maassgabe von Fig. 153 ebenfalls zur Bestimmung kleiner Verdrehungswinkel benutzt werden; auch er zeigt fehlerhaft an, wenn die Excentricität der Aufstellung zur Wirkung kommen kann, also am fehlerhaftesten, wenn die Aufstellung im Punkt B^1 gewählt wird; der Abstand A ist bei gleichem Uebersetzungsverhältniss, wie bei der vorerwähnten Bauschingerschen Ablesungsart, nur halb so gross. Meine Aufstellung hat vor der Bauschingerschen den Vorzug, dass man nicht das schwere Fernrohr, sondern nur den

leichten Spiegel am Probekörper zu befestigen hat, was ganz gut mit ein wenig Wachs-Kolophoniumkitt geschehen kann. Ausserdem behält man die Fernrohre auf dem Stativ an ihrem gewöhnlichen Orte und vermeidet die Beeinflussung des Probekörpers und der Befestigungstheile für das Instrument durch die Körperwärme.

207. Schaulinienzeichner für Verdrehungsversuche werden später besprochen.

208. Bei den Verdrehungsversuchen wird meistens bei stufenweiser Zunahme des Drehmomentes die Verdrehung gemessen. Man findet hierbei, entsprechend den Ableitungen im Absatz 201, S. 143, bei den Materialien mit unveränderlichem β anfangs eine den Spannungen τ proportionale Schiebung γ und demnach eine Proportionalitätsgrenze, dann entsprechend der Fließ- und Biegegrenze, eine Drehgrenze und schliesslich die Bruchgrenze, ausgedrückt in den Spannungen τ und den zugehörigen Formänderungen γ , bezogen auf den Abstand 1 der Schichten von einander und auf den Halbmesser $r' = 1$.

Die Schubzahl β kann aus τ und γ nach Gleichung a, S. 143, gefunden werden:

$$\beta = \frac{\lambda}{\tau}$$

Sie steht, wie die Festigkeitslehre (*L* 137, § 31) entwickelt, im Verhältniss zur Dehnungszahl, wie:

$$\frac{a}{\beta} = \frac{m}{2(m+1)} \text{ oder in Zahlen, da } m = 3 \text{ bis } 4:$$

$$\frac{a}{\beta} = \frac{3}{8} \text{ bis } \frac{4}{10} = 0,375 \text{ bis } 0,400.$$

Auch bei den Drehversuchen kann die Elasticitätsgrenze, die elastische und bleibende Verdrehung, die Drehfederung, die Nachwirkung, die Formänderungsarbeit u. a. m. Gegenstand der Untersuchung sein; indessen würde eine eingehende Besprechung dieser Dinge zu weit führen.

209. Das Gesetz der Aehnlichkeiten lässt sich auch auf den Drehversuch übertragen, und man kann aussprechen, dass bei Anwendung geometrisch ähnlicher Abmessungen der Probekörper, gleiche Spannungen gleiche Formänderungen, bezogen auf die Längeneinheit, liefern müssen.

3. Bruchformen.

210. Auf Taf. 2 Fig. 25, 29 und 30 ist eine Reihe von Bruchflächen abgebildet, wie sie bei Flusseisen und Gusseisen an cylindrischen Probestäben in der Regel vorkommen. Beim Gusseisen, Stahl und Materialien von ähnlichem Gefüge folgt der Bruch auf der Cylinderfläche einem vollen Umgang einer Schraubenlinie, um dann von einem Endpunkt der Schraubenlinie zum anderen in einer Ebene zu verlaufen, die die Cylinderaxe enthält. (Vergl. 203 Fig. 143 und Taf. 2 Fig. 25, 29 und 30.) Bach gab eine Reihe von Abbildungen solcher Bruchflächen von Gusseisenstücken verschiedener Querschnittsformen in (*L* 138, 1889, S. 137, Fig. 8—19).

Bei feinkörnigem Material findet man Bruchlinien (122), die in der Mitte der Schraubenlinie von einem Punkte am Umfange auszustrahlen pflegen (Taf. 2 Fig. 25). Man darf auch hier vermuthen, dass der Strahlungspunkt der Ausgangspunkt zur Bruchbildung gewesen sein wird. Man erkennt, dass ein eingehenderes vergleichendes Studium der Bruchvorgänge hier wiederum einen Hebelpunkt findet. Ich werde später weitere Hinweise auf diese Erscheinungen geben.

211. Weiche zähe Metalle geben eine Bruchfläche (Taf. 2 Fig. 29), die fast ganz in einer Normalebene des Stabes verläuft und nur in der Mitte in den Theilen nahe an der Stabaxe eine kleine Erhöhung zu zeigen pflegt. Die Bruchfläche hat das charakteristische Aussehen einer Scheerfläche, nur sind die Schuppen nach Spirallinien gerichtet, die gut erkennbar gegen den Mittelpunkt der Bruchfläche verlaufen. Auf der Oberfläche, namentlich von Drähten, kann man die einzelnen Windungen, die der Draht ertragen hat, fast an den scharfen Schraubenlinien auszählen, die beim Verdrehen entstehen. Auffallend ist, wie vollkommen sich Ungleichmässigkeiten im Material durch das Bestehenbleiben von ganz glatten blanken Drahttheilen äussern, die an der Verwindung jedenfalls keinen nennenswerthen Antheil genommen haben. Vergl. Taf. 2 Fig. 26.

Auf die von Bach gegebene eingehende Behandlung der Drehfestigkeit und besonders auf die Darstellung der Formänderungen durch Netzwerke, die auf Körper von verschiedener Querschnittsform aufgerissen sind möchte ich zum Schluss nochmals verweisen (*L 137*).

e. Scheerfestigkeit.

212. Die Scheerfestigkeit der Materialien wird häufig festgestellt, deswegen ist hier näher auf die betreffenden Verhältnisse einzugehen. Es hat sogar nicht an Versuchen gefehlt, dem Scheerversuch für das Materialprüfungswesen zu einer ähnlichen Bedeutung zu verhelfen, wie sie der Zerreißversuch bereits erlangte. Alfred E. Hunt machte im Jahre 1893 noch einen solchen Vorschlag (*L 146*); Kick schlug den Scheerversuch für die Feststellung der Härte von Materialien vor (*L 147, 148*).

Der Scheerversuch pflegt in zweierlei Formen ausgeführt zu werden, und zwar entweder als eigentlicher Scheerversuch und als Lochversuch.

1. Scheeren.

213. Die Scheerfestigkeit τ , ist der Widerstand, den ein Körper dem Verschieben seiner Theilchen in einer Fläche entgegensetzt. Streng genommen müsste also die Schubfestigkeit τ (200) gleichbedeutend mit Scheerfestigkeit sein, wenn der Abstand der beiden Querschnitte, die gegen einander verschoben werden, sehr klein wird. In Wirklichkeit wird aber durch den Scheerversuch niemals die Schubfestigkeit des Materiales gemessen, weil immer eine Reihe von Nebenumständen auftritt, die die wahre Schubfestigkeit nicht zum Ausdruck kommen lässt. Deswegen ist es gut, die Ausdrücke Scheerfestigkeit und Schubfestigkeit auseinander zu halten, und dementsprechend wird in Folgendem überall da, wo von der Feststellung der Materialeigenschaften durch den Scheerversuch oder von den Ergebnissen des Scheerversuches die Rede ist, ausschliesslich der Ausdruck

Scheerfestigkeit gebraucht werden, während die Schubfestigkeit stets nur im Sinne der Festigkeitslehre, also wie sie im Biegeversuch oder beim Verdrehen in Frage kommt, verstanden werden soll.

2. Der Scheerversuch.

214. In der einfachsten Form pflegt man den Scheerversuch nach Maassgabe von Fig. 154 anzuordnen, nämlich so, dass die Scheerbacken SS den Körper A mit der Kraft P in der Linie \overline{OO} zu zerschneiden, d. h. seine Hälfte A in der Linie \overline{OO} gegen die Hälfte A_1 zu verschieben streben. Denkt man sich die sheerende Kraft P über den abzuschneerenden Querschnitt f gleichmässig vertheilt, so ergibt sich die Scheerspannung $\tau = P/f$. Im ersten Augenblick kann man zu der Auffassung kommen, dass der Versuch die reine Schubfestigkeit liefern müsse; das ist aber nicht der Fall, wie folgende Ueberlegung ergibt.

Reine Schubbeanspruchung kann nur ganz zu Anfang des Versuches eintreten, in dem Augenblick, wo beide Scheerbacken den Stab eben berühren. Da diese Berührung günstigsten Falles nur in einer Linie stattfindet, so muss beim weiteren Vorgehen die Quetschgrenze des Materiales gleich

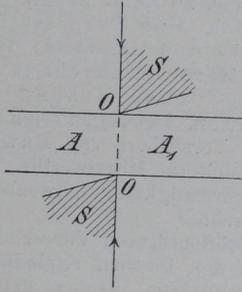


Fig. 154.

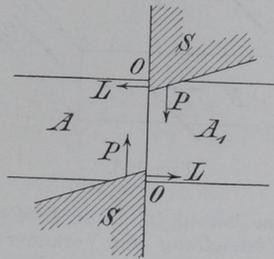


Fig. 155.

nach geschעהer Berührung überschritten werden. Das Material weicht zur Seite aus, bis die unter den Schneiden sich bildenden Anlageflächen so gross sind, dass die Kraft P ein weiteres Zurseitefliessen unter der Schneide nicht mehr hervorruft. Dann fällt aber die Richtung der beiden Kräfte P nicht mehr in die Linie \overline{OO} . Die Kräfte gehen vielmehr als Resultirende durch einen Punkt der unter den Schneiden S gebildeten Anlageflächen, Fig. 155, und erzeugen in Folge dessen ein rechtsdrehendes biegendes Moment, so dass neben der Schubbeanspruchung noch eine Biegebeanspruchung auftritt, die allerdings gegen die erstere klein ausfällt. Dem rechtsdrehenden Moment der Kräfte P hält ein linksdrehendes das Gleichgewicht, dessen Kräfte L entstehen, indem sich das Probestück gegen die Flanken der Schneiden stützt. Die Kräfte L erzeugen an diesen Flanken Reibungswiderstände, zu deren Ueberwindung ein, wenn auch kleiner Betrag von P verloren geht. Kurz, man sieht, dass das Ergebniss des Scheerversuches nicht streng die Schubfestigkeit des Materiales liefern kann.

215. Ist der zu sheerende Körper ein weicher nachgiebiger Körper, z. B. Holz, Blei, Leder u. s. w., so findet neben der örtlichen Eindrückung

unter den Scheerbacken noch eine weitergehende Materialzusammendrückung statt und macht den ganzen Vorgang noch verwickelter, als es vorhin geschildert wurde, so dass man sogar darüber in Zweifel kommen kann, ob bei Berechnung der Scheerfestigkeit $\tau, = P/f$ das f aus der Breite und ursprünglichen Höhe der Probe oder aus der beim Beginn des eigentlichen Scheerens vorhandenen Probenhöhe zu berechnen ist.

a. Die theoretische Betrachtung pflegt zu ergeben, dass zwischen der Normalspannung σ und der Schubspannung τ ein gewisses Verhältniss besteht, aber die hierbei über die Materialeigenschaften und die auftretende Kraftvertheilung gemachten Voraussetzungen treffen sehr selten zu. Für Schmiedeeisen und Stahl findet man häufig das Verhältniss zwischen der Scheerfestigkeit τ_B und der Zugfestigkeit $\sigma_B = 0,7$ bis $0,8$ angegeben; für Gusseisen kann man es sogar grösser als $1,0$ finden (165a). Versuche mit Materialien, deren Gefügebau Anlass zur Ausbildung verschiedener Festigkeit nach bestimmten Richtungen im Körper giebt, können noch viel mannigfaltigere Ergebnisse liefern.

Die Zugfestigkeit ist hierbei, eben so wie die Scheerfestigkeit, nach verschiedenen Richtungen sehr erheblich verschieden, und sehr verschieden stellen sich diese Zustände bei den Hölzern. Die Prüfung des Holzes auf seine technischen Eigenschaften sollte deswegen auch nicht bloß auf seine Druckfestigkeit erstreckt werden, die sich ja am einfachsten ermitteln lässt, sondern man sollte mindestens auch den Scheerversuch zu Rathe ziehen.

b. Man vergisst übrigens leicht den Umstand, dass auch bei Metallen durchaus ähnliche Dinge zur Wirkung kommen können. Deswegen seien hier einige aus Versuchen von Bauschinger abgeleitete Mittelwerthe über die Scheerfestigkeit von Eisenblechen mitgetheilt.

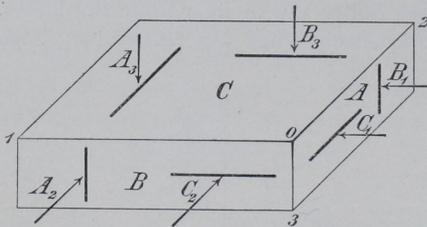


Fig. 156.

Diese bereits im Jahre 1874 (L 2 Heft 2) veröffentlichten Versuche bezweckten die Feststellung der Veränderungen, die in den Blechen explodirter Kessel vor sich gegangen waren. Die aus den untersuchten Blechen entnommenen Proben wurden auf Zugfestigkeit parallel und senkrecht zur Walzrichtung der Bleche und auf Scheerversuche nach den drei durch Fig. 156 angegebenen Hauptrichtungen 01, 02 und 03 ausgedehnt. Die Richtung 01 fiel mit der Walzrichtung zusammen. Die Schnitte erfolgten nach den Flächen A, B und C, von denen C die Walzfläche selbst ist. Die nachfolgende Tab. 21 giebt eine Uebersicht über die Mittelwerthe, welche an neuen Blechen verschiedener Gattung gewonnen wurden.

Tabelle 21. Scheerversuche von Bauschinger mit Kesselblechen.

Art der Bleche	Scheerfestigkeiten τ_B in at						Zugfestigkeit σ_B in at in Richtung		Verhältnisse $\tau,/\sigma$ in			
	Schnittebene u. Richtung (Fig. 156)						Richtung					
	A_2	A_3	B_3	B_1	C_1	C_2	1	2	A_2	A_3	B_3	B_1
a) Puddelbleche . . .	3160	2780	2590	3080	1570	1580	2630	2480	1,20	1,06	1,04	1,24
b) Low-Moor-Bleche . .	3210	2830	2680	3190	1480	1420	3200	2800	1,00	1,13	0,96	1,14
c) Holzkohlenbleche . .	2900	2760	2550	3030	1460	1330	3300	2540	0,88	0,84	1,00	1,19
d) Kesselbleche . . .	3150	2830	2690	3230	1480	1370	3590	2880	0,88	0,79	0,93	1,12
e) Walzeisenbleche . . .	3590	3440	2840	3060	1780	1770	4160	—	0,86	0,83	—	—
f) Bessemereisenbleche	4390	3980	3920	4460	3780	3720	5030	5180	0,87	0,79	0,76	0,86

Man bemerkt leicht, wie verschieden die Werthe für τ_B und für das Verhältniss $\tau,/\sigma$ ausfallen, und wie sehr die Scheerfestigkeit parallel zur Fläche C beim

Schweisseisen gegen die Scheerfestigkeit nach den Flächen *A* und *B* zurücksteht. Zugversuche nach der Richtung $\overline{03}$ lassen sich bei Grobblechen sehr schwer ausführen.

216. Man pflegt den Scheerversuch auch wohl so anzuordnen, dass zwei Scheerflächen 1 und 2 Fig. 157 entstehen. Bei der im vorigen Abschnitt beschriebenen Art des Versuches wird der Körper einschnittig, bei der in Fig. 157 angedeuteten Art wird er zweischnittig beansprucht, bezw. durchgesehert.

Aber auch bei dieser Anordnung sind Biegungsbeanspruchungen nicht zu vermeiden. Man kann sich die hierbei stattfindende Kraftvertheilung, wie in Fig. 158 gezeichnet, vorstellen. Auch hier müssen also Biegemomente auftreten, deren Grösse sich aber der strengen Rechnung entzieht, weil man die Kraftvertheilung über die Strecken *a* und *b* nicht kennt, also die

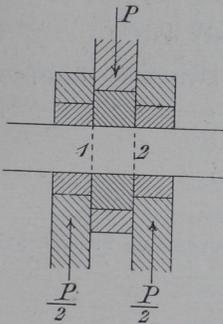


Fig. 157.

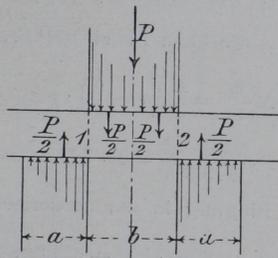


Fig. 158.

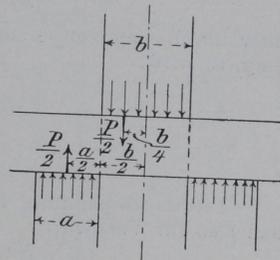


Fig. 159.

Grösse der Hebelarme nicht finden kann. Wollte man streng rechnen, so kämen auch die Reibungen über den Auflagern und deren Einfluss auf die Spannungsvertheilung in Betracht.

Nimmt man unter Vernachlässigung der Reibung willkürlich an, dass die Kräfte über die Strecken *a* und *b* gleichmässig vertheilt seien [in Wirklichkeit stellen sich die Verhältnisse ein wenig günstiger], so findet man nach Massgabe von Fig. 159 das Biegemoment [Körper in der Mitte fest eingespannt gedacht]:

$$M = \frac{P}{2} \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{2} \right) - \frac{P}{2} \frac{b}{4} = \frac{P}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right).$$

Dieses Moment ist unter Umständen ausreichend, um an sich schon den Bruch herbeizuführen.

a. Bach (*L 137* § 40) stellte mit Rundstäben aus Gusseisen von 2,0 cm Durchmesser ($f = 3,14$ qcm) nach der in Fig. 157 angedeuteten Anordnung folgende Scheerversuche an:

- No. 1. Bei $P = 3000$ kg bricht der Stab infolge der Biegung im Theil *b*. Der Versuch wird fortgesetzt und bei $P = 10200$ kg findet erst das Abscheeren statt.
- No. 2. Bei 2825 kg bricht der Stab wie früher; bei $P = 9950$ erfolgt Abscheeren.
- No. 3. Bei 3350 kg Bruch; bei 10370 kg Abscheeren.

Wegen der zweischnittigen Beanspruchung und unter der üblichen Annahme, dass sich die Kraft *P* auf die Schnitte gleichmässig vertheilt [was aber keineswegs streng zutrifft], berechnet sich die Scheerfestigkeit, des zu den Bachschen Versuchen verwendeten Gusseisens aus:

$$\tau = \frac{P}{2F}, \text{ also für Versuch}$$

$$\text{No. 1. } \tau = \frac{10200}{2 \cdot 3,14} = 1624 \text{ at}$$

$$\text{No. 2. } \tau = \frac{9950}{2 \cdot 3,14} = 1584 \text{ at}$$

$$\text{No. 3. } \tau = \frac{10370}{2 \cdot 3,14} = 1651 \text{ at}$$

$$\text{oder im Mittel} = 1620 \text{ at.}$$

Berechnet man aus den Abmessungen des von Bach verwendeten Apparates (nach Fig. 159)

$$a = 2,2 \text{ cm und } b = 3,0 \text{ cm, aus } \frac{\Theta}{e} = \frac{\pi}{32} 2^3 = 0,785$$

und aus der oben entwickelten Gleichung:

$$M = \frac{P}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right) \text{ sowie aus Gleichung 17 Absatz 170 S. 123}$$

unter Einführung von e_z statt η , die beim Bruch der Probe herrschende Zugspannung, so wird:

$$\begin{aligned} \sigma_{+B'} &= M \frac{e_z}{\Theta} = \frac{P}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right) \cdot \frac{1}{0,785} \\ &= P \cdot \frac{2,2 + 1,5}{4 \cdot 0,785} = P \cdot 1,18. \end{aligned}$$

Die Bruchspannung für Biegung in der äussersten gezogenen Faser erhält man also für Versuch:

$$\text{No. 1. } \sigma_{+B'} = 3000 \cdot 1,18 = 3540 \text{ at}$$

$$\text{No. 2. } \sigma_{+B'} = 2825 \cdot 1,18 = 3334 \text{ at}$$

$$\text{No. 3. } \sigma_{+B'} = 3350 \cdot 1,18 = 3953 \text{ at}$$

$$\text{oder im Mittel } \sigma_{+B'} = 3609 \text{ at}$$

Bei Zugversuchen mit denselben Rundstäben fand Bach für Versuch:

$$\text{No. 1. } \sigma_B = 1560 \text{ at}$$

$$\text{No. 2. } \sigma_B = 1586 \text{ at}$$

$$\text{No. 3. } \sigma_B = 1640 \text{ at}$$

$$\text{oder im Mittel } \sigma_B = 1595 \text{ at.}$$

Versuche von Bach über die Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit des Gusseisens von der Querschnittsform (*L 137*, § 22 und *L 138*, 1888. 89) haben ergeben, dass für cylindrische Stäbe die Biegezugfestigkeit für die Zugseite aus der durch den Zerreißversuch ermittelten sich findet nach:

$$\sigma_{+B'} = 2,12 \sigma_B;$$

rechnet man hiermit, so würde man aus dem Mittelwerth von σ_B erhalten:

$$\sigma_{+B'} = 1595 \cdot 2,12 = 3381 \text{ at,}$$

was befriedigend mit dem aus den Biegeversuchen gefundenen Mittelwerthe $\sigma_{+B'} = 3609 \text{ at}$ übereinstimmt, da die Hebelarme für das Biegemoment sicher etwas zu gross genommen wurden und die Auflagerreibung ausser Acht gelassen worden ist.

Das Verhältniss zwischen der Scheerfestigkeit $\tau_{B'}$ und der Zerreißfestigkeit findet sich aus den Versuchen zu:

$$\frac{\tau_{B'}}{\sigma_B} = \frac{1620}{1595} = 1,02.$$

Bei diesen Vergleichen darf man nicht vergessen, dass sehr oft der Gefügebau des Materialies eine wesentliche Rolle spielen kann. Bei den Probestücken mit Gusseisen kommt das leicht vor, wenn man mit Eisen zu thun hat, das in gewissem Maasse zum Abschrecken neigt. Dann wird das Netzwerk weissen Eisens nahe an den Oberflächen dichter, und das kann zuweilen, ohne gerade auffällig hervorzutreten, in umfangreichem Maasse geschehen, so dass selbst nach Fortarbeitung der äusseren Gushaut der ungleichmässige Gefügezustand noch besteht.

Dass das Verhältniss zwischen Zugfestigkeit und Scheerfestigkeit in hohem Maasse von der Eigenart der Materialien abhängig ist, geht sehr schlagend aus Fig. 160 hervor, welche die Abhängigkeit der Zug-, Druck- und Scheerfestigkeit von dem Nickelgehalt einer Eisen-Nickellegirung darstellt. Alle Versuche gleicher Art sind immer mit gleichen Stabformen von gleichen Abmessungen ausgeführt.

b. Man erkennt aus dem oben im vorigen Absatz mitgetheilten Beispiel, dass der Einfluss der Biegungsspannungen bei zweisehnittigen Scheeren jedenfalls von

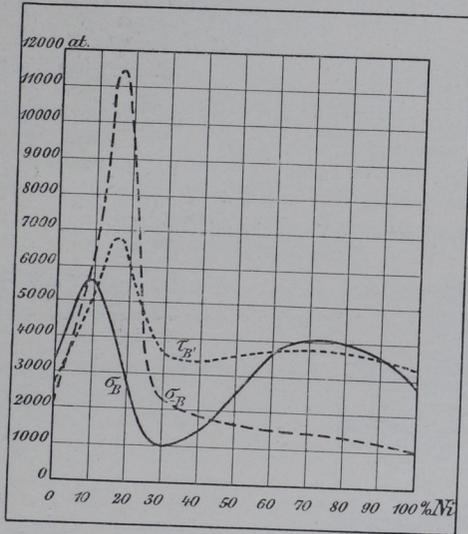


Fig. 160.

Festigkeitseigenschaften von Eisen-Nickellegirungen mit wachsendem Nickelgehalt.
 σ_B = Tragfestigkeit, σ_B' = Druckfestigkeit, τ_B' = Scheerfestigkeit.

dem Verhältniss der Scheerbackenbreiten zum Durchmesser des Probestückes abhängig ist. Denn je schmäler die Backen werden, d. h. je kleiner a und b , desto kleiner werden auch die Hebelarme für das biegende Moment. Will man den Scheerenapparat einem bestimmten Material anpassen, und ihn so einrichten, dass das Biegemoment möglichst klein wird, so kann man von folgenden Gesichtspunkten ausgehen.

Wird dabei vorausgesetzt, dass sich die Kräfte P und $P/2$ über die Längen a und b Fig. 159 gleichmässig vertheilen, und ferner, dass man den Druck, den die Backen a und b auf den Umfang des cylindrischen Probestückes ausüben, den Laibungsdruck, über die Projektion der Druckfläche als gleichmässig vertheilt ansehen darf, so wird die Laibungsbeanspruchung unter den Backen bei:

$$a) p_l = \frac{P}{2 a d} \text{ und}$$

$$b) p_l' = \frac{P}{b d} \text{ wenn}$$

d der Durchmesser der Probe.

Man wird den Druck $p_l = p_l'$ bis nahe an die Bruchgrenze des Probekörper-

materialen anwachsen lassen dürfen, weil bei spröden Materialien die Formänderungen bis zum Bruch gering sind, und weil bei zähen und bildsamen Materialien nach Ueberschreitung der Quetschgrenze die Höhlung der Scheerbacken genau ausgefüllt wird und die Druckfestigkeit deswegen über die an freien Probestücken bestimmten Werthe anwächst. Die Scheerbacken wird man ja immer aus möglichst hartem und festem Material herstellen. Setzt man also als äussersten Grenzwert

$$p_l = p'_l = \sigma_B$$

gleich der am freistehenden Würfel ermittelten Druckfestigkeit des Probematerials, so wird:

$$P = 2 a d \sigma_B = b d \sigma_B; \quad a = \frac{b}{2}$$

Die Scheerfestigkeit der Probe ist aber:

$$\tau = \frac{P}{2 d^2 \frac{\pi}{4}} \quad \text{und}$$

hieraus ergibt sich:

$$P = 2 d^2 \frac{\pi}{4} \tau, \quad = b d \sigma_B \quad \text{oder}$$

$$b = 2 a = \frac{\pi}{2} d \frac{\sigma_B \tau}{\sigma_B} = 1,57 d \frac{\tau}{\sigma_B}$$

Für die oben besprochenen Versuche mit Gusseisen war $d = 2,0$ cm; $\tau_{B'} = 1620$ at,

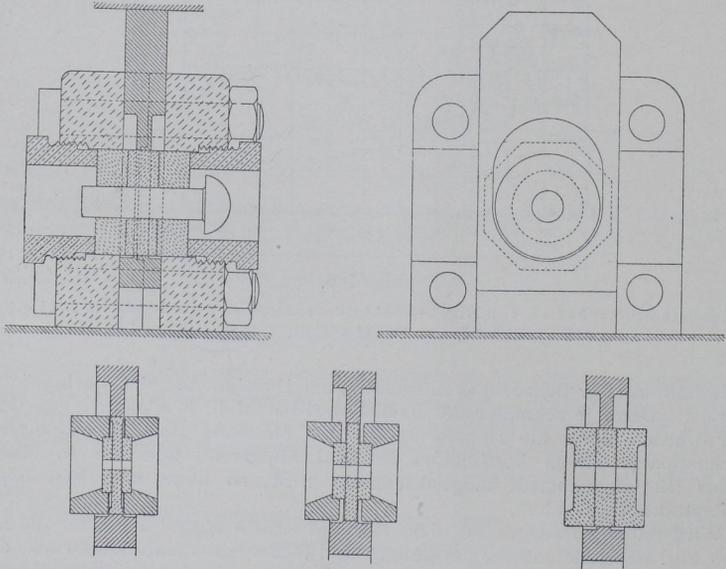


Fig. 161.

und σ_B wird man auf etwa 7500 at setzen können. Demnach würde man unter den gemachten Annahmen:

$$b = 2 a = 1,57 \cdot 2 \cdot \frac{1620}{7500} = 0,68 \text{ cm}$$

machen dürfen. Der Apparat von Bach hatte $a = 2,2$ cm und $b = 3,0$ cm.

Berechnet man aus der mittleren zum zweischnittigen Scheeren erforderlichen Kraft (Absatz a) $P = (10200 + 9950 + 10370) \frac{1}{3} = 10173$ kg und aus den vor-

hin errechneten Abmessungen die eintretende Biegungsspannung nach dem gleichen Grundsatz wie früher, so erhält man bei Anwendung der schmaleren Scheerbacken:

$$\sigma_{+B'} = M \frac{e_z}{\Theta} = \frac{P}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right) \cdot \frac{1}{0,785} =$$

$$\sigma_{+B'} = \frac{10173}{4} \cdot \frac{0,34 + 0,34}{0,785} = 2203 \text{ at.}$$

Der Bruch auf Biegung würde also nicht mehr erfolgt sein.

c. In der Versuchsanstalt zu Charlottenburg wird für die Ausführung der Scheerversuche ein von mir konstruierter Scheerapparat benutzt Fig. 161 (*L 149*), bei dem die Scheerbackenbreiten gleich dem Durchmesser der Probekörper sind. Der Apparat besteht aus einem zweitheiligen Gusseisenkörper, in welchem ein gut eingepasster Schieber gleitet. Die Scheerbacken sind gehärtete und dann ausgeschliffene Stahlringe, die entweder unmittelbar oder mittelst besonderer Einsatzringe im Gehäuse und Schieber so eingebracht werden, dass die mittlere Scheerbacke genau zwischen den beiden Seitenbacken mit Hilfe des Schiebers bewegt wird. Die beiden hohlen Schraubenmutter des Gehäuses dienen dazu, die Seitenbacken von der Hand so einzustellen, dass die Bewegung der Mittelbacke gerade ganz schliessend, aber ohne wesentliche Reibung erfolgt. (Fig. 161 ist $\frac{1}{5}$ nat. Gr.) Der Apparat hat Einlage-Ringe für Proben von 2,4; 2,2; 1,9; 1,5 und 0,9 cm Durchmesser; er wird in die Maschine wie beim Druckversuch eingebaut und ist namentlich für stehende Maschinen sehr bequem; ich habe ihn gelegentlich auch zur Ausführung von Scheerversuchen unter dem Fallwerk benutzt.

3. Der Lochversuch.

217. Der Vorgang des Lochens ist von gleicher Art wie der Vorgang des Scheerens, nur wird statt der ebenen Schnittfläche eine cylindrische erzeugt.

Man führt den Versuch in der Regel derart aus, dass die plattenförmige Probe auf eine Matrize *M*, Fig. 162, aus hartem Stahl gelegt wird. Dann

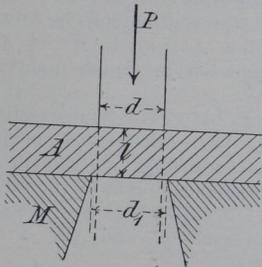


Fig. 162.

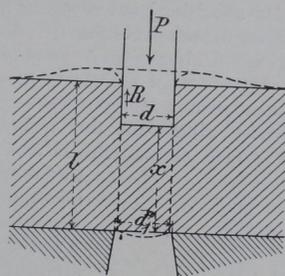


Fig. 163.

wird mit dem Stempel *S* aus hartem Stahl ein Cylinder vom Durchmesser *d* und der Länge *l* unter der Einwirkung der Kraft *P* herausgescheert.

Die Lochfestigkeit, d. h. Festigkeit gegen Lochen ist dann

$$\tau'' = \frac{P}{f}, \text{ wenn}$$

$f = \pi dl$ die Grösse der Schnittfläche ist und angenommen wird, dass die Kraft *P* sich über diese Fläche gleichmässig vertheilt. Es ist also für eine cylindrische Schnittfläche:

$$\tau'' = \frac{P}{\pi dl}.$$

Für dünne Probestücke, bei denen *l* gegen *d* klein ist, wird die Loch-

festigkeit der Schubfestigkeit nahe kommen; für dicke Stücke ist aber der Vorgang ein sehr verwickelter.

a. Man kann sich eine Vorstellung von den Spannungsverteilungen beim Loch machen, wenn man annimmt, dass ein dicker cylindrischer Bleiklotz in der Axenrichtung geflocht werden soll, Fig. 163. So lange nicht die Kraft P gross genug ist, um in dem punktiert angedeuteten Cylindermantel Abscheeren zu bewirken, wird das Material unter dem Stempel zur Seite hin und nach oben hin ausweichen, und zwar am meisten dahin, wo es den geringsten Widerstand findet, wie in Fig. 163 punktiert angedeutet. Man wird bemerken, dass die Reibung an den Auflagerflächen und an den Stempelflächen zum Ausdruck kommt und dass es neben dem Stempel mehr aufquillt als in einigem Abstände davon, weil die radial wirkenden Spannungen im Körper [namentlich in einem elastischen] mit wachsender Entfernung von der Axe abnehmen und schliesslich kein Fließen in radialer Richtung mehr bewirken können. Ist der äussere Durchmesser des vorausgesetzten Bleicylinders sehr gross, so wird nur Fließen in den Hohlraum der Matrize und Aufquellen nach oben stattfinden können, weil Blei ein Körper vom Dichtigkeitsgrade 1 ist, und daher der Rauminhalt des ursprünglichen Körpers gleich dem Inhalt des Körpers nach dem Eindringen des Stempels sein muss. Das Eindringen kann in merkbarer Weise erst stattfinden, wenn die [am Würfel festgestellte!] Quetschgrenze des Materials erheblich überschritten ist, weil hier, wie oben gesagt, die freie Bewegung der Masse behindert ist, also gewissermassen die in Absatz 25 (S. 10) besprochenen Umstände eintreten. Ist die Spannung an der Quetschgrenze für den hier vorausgesetzten Versuchskörper und unter der ausgeübten Art der Beanspruchung σ_{-s} , so kann nennenswerthes Fließen erst ein-

treten, wenn $P > d^2 \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_{-s}$. Das Abscheeren des Cylinders kann aber erst stattfinden, wenn die Höhe x so weit vermindert ist, dass $\tau, d\pi x < P$.

Man erkennt aus dieser Betrachtung leicht, dass die äussere Form des zu lochenden Stückes das Versuchsergebniss beeinflussen muss, wenn die um das Loch stehen bleibende Wandstärke nicht gross genug ist, um seitliches Ausfließen zu verhindern. Nebenspannungen sind also auch beim Lochen unvermeidlich, und das Lochen ist daher kein einfacher Vorgang.

b. Da aber der Lochvorgang äusserlich einfach erscheint, so fehlte es nicht an Vorschlägen, diesen Versuch für die regelmässige Materialkontrolle in Anwendung zu bringen. Ueber einen solchen Vorschlag, den Alfred E. Hunt auf dem Ingenieurkongress in Chicago (L 146) machte, sagte ich in einem nichtveröffentlichten Reiseberichte Folgendes.

„Hunt ging von der irrigen Annahme aus, dass die Scheerfestigkeit in einfacher Weise einen Schluss auf die Zugfestigkeit des Flusseisens machen lasse und empfahl daher die Ausführung von Scheerversuchen an Stelle der Zerreißversuche, indem er für die Scheerversuche ihre leichte Durchführbarkeit, die geringen Kosten der Prüfungsmaschine und der Probenherstellung in Anspruch nahm.“

„Man kann nicht leugnen, dass dieser Vorschlag sehr viel Verlockendes hat, denn man kann einen tragbaren und durch einfache Handpumpe betriebenen Apparat nach dem Schema der Fig. 164 leicht herstellen und mit einem Selbstzeichner versehen. Der Kolben K drückt den Lochstempel S durch die Probe P ; M ist eine auswechselbare Matrize. Die im Cylinder C herrschende Pressung wird durch einen Indikator auf die Papiertrommel P gezeichnet und die Trommel erfährt zugleich eine Drehung vermittelt des Hebels H , der Rolle r und der Schnur s , die der Kolbenbewegung folgt. Das Gegengewicht G treibt den Kolben zurück.“

„Es ist nicht ohne weiteres möglich, sich ein zutreffendes Urtheil über den Huntschen Vorschlag zu bilden; die von ihm gegebenen Zahlen reichen hierfür nicht aus und bedürfen weiterer Ergänzung [es ist mir entgangen, was schliesslich aus dem Vorschlage geworden ist]. Der Schluss auf die durch den Zerreiß-

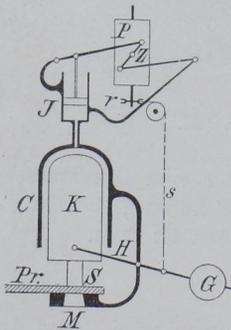


Fig. 164.

versuch gekennzeichneten Eigenschaften eines Materiales aus den Ergebnissen des Lochversuches dürfte wol kaum zulässig sein (vergl. 214). Vor allen Dingen erscheint es unmöglich aus dem Lochversuch ein Maass für die Dehnbarkeit und Zähigkeit des Materiales zu gewinnen.“

„Ein anderes ist es aber, ob der Apparat nicht doch zu einer Materialkontrolle im Fabrikbetriebe sich eignet. Um hierüber ein Urtheil zu gewinnen müssten erst folgende Punkte klargestellt werden.“

„Eine Grenze der Anwendbarkeit haben alle Methoden, die wie die Scheermethode auf die Anwendung von schneidenden Werkzeugen gegründet sind. Sie sind unbrauchbar, sobald die Härte der Schneiden nicht mehr ausreicht, um diesen die Erfüllung ihrer Aufgabe ohne bleibende Formänderung zu gestatten. Nahe dieser Grenze, also bei hartem Probematerial, wird man immer im Zweifel über den etwaigen Einfluss der Formänderungen der Werkzeuge bleiben.“

„Bei der Lochprobe sind aber zwei Werkzeuge, der Lochstempel und die Matrize, vorhanden, und man weiss, dass der zum Lochen erforderliche Arbeitsaufwand vom Durchmesser des Lochstempels, von der Dicke der Probe,¹⁾ so wie dem Verhältniss des Stempeldurchmessers zum Matrizendurchmesser abhängt. Dieses Verhältniss muss wiederum mit Rücksicht auf die Blechdicke und die Art des zu sheerenden Materiales gewählt werden, wenn man grösste Oekonomie erzielen will; zu diesen geometrischen Verhältnissen kommt die Beschaffenheit der Schneidkanten am Lochstempel und an der Matrize hinzu. Welchen Einfluss hat die Abnutzung dieser Kanten auf das Ergebniss von Versuchen an gleichem Material? Welchen Einfluss hat die grössere oder geringere Härte des Stempel- und Matrizenmaterials? Das sind Fragen, die sich nur durch sehr zahlreiche nach vielen hunderten zählende Versuche beantworten lassen. Man sieht also, dass die Sache kurzer Hand nicht beurtheilt werden kann. Die angeführten Punkte reichen aber jedenfalls nicht aus, um der Lochmethode alle Berechtigung absprechen zu dürfen.“

„Kommt es z. B. darauf an, im eigenen Betriebe eines grossen Werkes, etwa in einer Brückenbauanstalt oder Kesselschmiede, sich ein ungefähres Urtheil über die Gleichförmigkeit des Materiales zu verschaffen, so kann die Lochmethode vielleicht gute Dienste leisten, wenn es gelingt, den Messapparat so zu konstruiren, dass er bei gleichem Material gleiche Ergebnisse liefert. Eine einfache praktische Probe wäre es, einen Huntschen Apparat zur Prüfung einer Anzahl von Blechen verschiedener Qualität zu benutzen, diese Proben aufzubewahren und nun den Apparat in regelmässigen Gebrauch zu nehmen, um nach 1000, 5000 oder 10 000 Proben wieder die ersten Bleche zu prüfen. Diese Probe würde über die praktische Brauchbarkeit des Huntschen Vorschlages, meines Erachtens, zuverlässiger entscheiden als der Vergleich mit den Ergebnissen des Zerreiessversuches am gleichen Material, wie ihn Hunt gegeben. Den Zerreiessversuch kann der Lochversuch doch nicht ersetzen, weil er keinen Anhalt für die Arbeitsfähigkeit des Materials bei Zug-, Druck- oder Biegebeanspruchungen zu geben vermag.“

218. Dass Biegungsspannungen u. s. w. beim Lochen dicker Bleche einhergehen, kann man namentlich an durchgeschnittenen und geätzten Proben von Schweisseisen oder anderen Metallen leicht nachweisen. Man bemerkt hieran, wie sich die einzelnen Schichten, sowohl am Lochrande als auch am Rande des herausgescheerten Putzens umgebogen haben, Fig. 165, und wie sie dann zur Seite gedrängt werden. Das Loch fällt darum auch immer etwas grösser aus als der Durchmesser des Stempels.

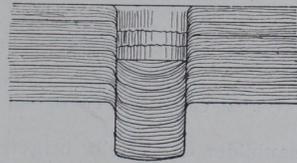


Fig. 165.

219. Aus Erfahrung weiss man, dass die Arbeit des Lochens verringert und das Loch glatter wird, wenn man der Matrize einen grösseren

¹⁾ Von deren Gestalt, wenn das Loch in der Nähe der Kante sitzt, z. B. bei Flacheisen, Winkeln u. s. w.

Durchmesser d_1 giebt als dem Stempel. Hieraus und aus dem Voraufgehenden kann man entnehmen, dass auch die Abmessungen des Apparates von Einfluss auf das Ergebniss des Lochversuches sein müssen.

Will man also bei Scheer- und Lochversuchen vergleichbare Ergebnisse erzielen, so muss man zwischen den Probenabmessungen und den Abmessungen der Apparate gewisse Beziehungen aufsuchen und diese bei den Versuchen stets innehalten. Versuche zum Aufschluss dieser Frage sind aber leider noch recht wenig ausgeführt.

Indem ich zugleich auf die älteren Versuche von H. Tresca (*L 150. 151. 152*) [aus dem Jahre 1869 u. f.] verweise, theile ich hier die Ergebnisse von einigen Uebungsversuchen meiner Schüler mit, die an verschiedenen Metallen unter verschiedenen Bedingungen ausgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Fig. 166 als

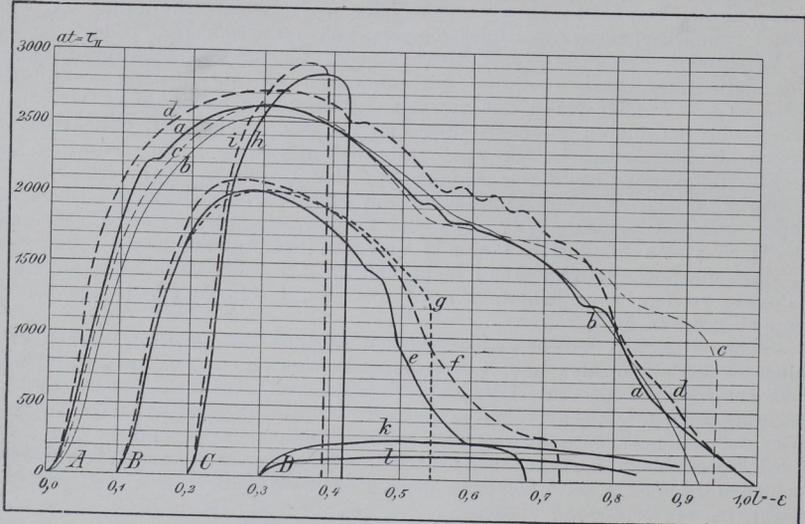


Fig. 166. Schaubilder von Lochversuchen.

Es bedeutet: d Stempeldurchm., d_1 Matrizendurchm., l Blechdicke. Starke Linien = Stempelfläche eben, schwache Linien = Stempelfläche hohl.

A. Feinkorn Eisen. $5,20 \times 1,35$ cm; $d = 2,00$ cm; $d_1 = 2,10$ cm; $l = 1,35$ cm; $l/d = 0,675$; $d_1/d = 1,050$.

In allen Fällen fand das Lochen unhörbar statt. Zeitdauer bei Versuch a und b 12 bis 14 Minuten, bei c und d weniger als 1 Minute. Einfluss der Geschwindigkeit also deutlich bemerkbar.

B. Kupferblech, gegläht. $d = 2,00$ cm; $l = 1,01$ cm; $l/d = 0,51$. Bei Versuch e , $d_1 = 2,01$ cm; f , $d_1 = 2,05$ cm; g , $d_1 = 2,10$ cm; demnach ist $d_1/d = 1,005, 1,025, 1,050$; Dauer = 2 bis 4 Minuten.

C. Messingblech, Anlieferung. $d = 2,50$ cm; $l = 1,00$ cm; $l/d = 0,40$. Bei Versuch h , $d_1 = 2,60$ cm; i , $d_1 = 2,55$ cm; demnach ist $d_1/d = 1,040, 1,002$; Dauer $h = 2$ Minuten; $i = 13$ Minuten; Einfluss der Geschwindigkeit erkennbar.

D. Blei, gegossen. Blockdurchm. = D . Für k : $D = 7,18$ cm; $d = 2,00$ cm; $d_1 = 2,05$ cm; $l = 4,10$ cm; $l/d = 2,05$; $d_1/d = 1,025$. Für l : $D = 10,03$ cm; $d = 2,00$ cm; $d_1 = 2,01$ cm; $l = 2,91$ cm; $l/d = 1,46$; $d_1/d = 1,005$.

Die Körper wurden nicht ganz durchlocht, der steckengebliebene Lochputzen hatte eine Höhe l_1 bei Versuch $k = 2,53$ cm; bei $l = 2,36$ cm.

Schaubilder dargestellt, in getreuer Nachbildung der von der Maschine selbst aufgezeichneten Linien; nur wurden statt nach Kräften und Stempelwegen die Aufzeichnungen nach Spannungen τ_H und Eindrucktiefen $-\varepsilon$ des Stempels, bezogen auf die Probendicke l als Einheit, gegenübergestellt. Die Zacken und Wellen in den Schaubildern entsprechen der Thatsache, dass das Scheeren nicht immer als glatter Vorgang verläuft, sondern zuweilen absatzweise stattfindet. Alle Versuchsbedingungen sind in den Erläuterungen zu den Figuren angegeben, so dass ich hier nur noch Folgendes hinzuzufügen habe.

Aus Fig. 166 Gruppe A und C kann man deutlich den Einfluss erkennen, den die Schnelligkeit der Versuchsausführung auf das Versuchsergebniss hat.

Die schneller ausgeführten Versuche erfordern etwas mehr Kraftaufwand. Aus Gruppe *D* lässt sich ableiten [ebenso wie aus den älteren Versuchen von Tresca¹⁾], dass das Blei zunächst eine erhebliche Verdrängung unter dem Stempel erfährt, dass die Höhe des herausgescheerten Lochputzens l_1 erheblich kleiner ist, als die ursprüngliche Probendicke l und dass l_1 für die gleiche Stempeldicke auch bei stark verschiedenem l , nahezu die gleiche bleibt.

Betrachtet man die Schaulinien in Fig. 166 im Allgemeinen, so ergibt sich für die Gruppen *A* bis *C*, dass die Spannungen anfangs schnell wachsen, bis dahin wo das Abscheeren beginnt, und durch ein Maximum gehen, um alsdann je nach den Materialeigenschaften und den Verhältnissen d_1/d zwischen den Matrizen- und Stempeldurchmessern mehr oder minder plötzlich zu fallen. Bei den Proben aus weichem Eisen nahm die Spannung hierbei ganz bis auf Null ab und die Lochung erfolgte unhörbar. Beim weichen Kupfer tritt der Bruch schon erheblich früher ein, bevor noch der Stempel den ganzen Weg l durchlaufen hat. Der Bruch erfolgt um so früher und plötzlicher, je grösser d gegenüber d_1 ist (Linien *g* und *c* Fig. 166); d. h. der Arbeitsaufwand wird um so kleiner, je grösser der Matrizen- durchmesser im Verhältniss zum Stempeldurchmesser gewählt wird. Beim Messingblech im Anlieferungszustande tritt der Bruch schon unmittelbar nach Erreichung der höchsten Spannung ein, bevor noch der Stempel einen Weg von $0,3l$ zurücklegte.

Die Beschaffenheit der Stempelendfläche übt einen Einfluss auf das Ergebniss aus. Hierüber und über den Einfluss des Verhältnisses d_1/d giebt auch die folgende Zusammenstellung Aufschluss. Die dort mitgetheilten Ergebnisse wurden mit geglähtem Messingblech von 0,40 cm Dicke und unter Anwendung von Stempeln von $d = 2,00$ cm mit ebenen und mit kugelförmig ausgehöhlter Endfläche gewonnen. Die Matrizenweiten d_1 waren 2,01; 2,10 und 2,20 cm und demnach die Verhältnisse $d_1/d = 1,005$; 1,050 und 1,100, während das Verhältniss $l/d = 0,20$ war. Man fand für

	$d_1/d = 1,005$	1,050	1,100
a) bei ebenem Stempel	$\tau_{B''} = 2830$	2770	2570 at
b) bei ausgehöhltem Stempel	$\tau_{B''} = 2590$	2510	2360 at

Verhältnisszahlen für $a = 100$ — 92 91 92

und wenn man die Werthe für $d_1/d = 1,005$ gleich 100 setzt, so erhält man für die Abnahme der Spannung bei wachsendem d_1/d die Werthe für

	$d_1/d = 1,005$	1,050	1,100
a) bei ebenem Stempel	$\tau_{B''} = 100$	98	91
b) bei hohlem Stempel	$\tau_{B''} = 100$	97	91

4. Scheerung und Aehnlichkeitsgesetz.

220. Aus den vorigen Abschnitten ging hervor, dass die Probenabmessungen und die Abmessungen der Apparate von Einfluss auf die Ergebnisse des Scheerversuches sind. Deswegen ist es nothwendig, für diese Dinge gewisse Festsetzungen zu treffen, wenn man einheitliche und unmittelbar vergleichbare Werthe durch den Versuch erhalten will. Leider sind die Gesetze, nach welchen sich diese Einflüsse geltend machen, noch sehr wenig erforscht. Man kann aber ohne weiteres aussprechen, dass auch für das Scheeren und Lochen das schon mehrfach behandelte Aehnlichkeitsgesetz gültig ist.

Nach dem Gesetz der Aehnlichkeiten müssen sich, bei Anwendung zweier geometrisch ähnlicher Probekörper A und A_1 aus gleichem Material die zum Scheeren oder

¹⁾ Diese Versuche erscheinen insofern nicht ganz zuverlässig, als die von Tresca gegebenen Schaubilder stets im Augenblick des Abscheerens [auch bei Blei] noch eine erhebliche Kraftanzeige liefern.

Lochen aufzuwendenden Kräfte verhalten wie die abzuschneerenden Flächen.

In Fig. 167 ist nach Voraussetzung:

$$\frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1} = \frac{1}{n} \quad \text{und} \\ \frac{f}{f_1} = \frac{1}{n^2}.$$

Wenn $\tau = \tau_1$ werden soll, so muss sein:

$$\frac{P}{f} = \tau = \frac{P_1}{f_1} \quad \text{oder} \quad \frac{P}{P_1} = \frac{f}{f_1} = \frac{1}{n^2} \quad \text{oder wegen} \quad \frac{b}{b_1} = \frac{l}{l_1}, \\ \frac{f}{f_1} = \frac{b}{b_1} \cdot \frac{l}{l_1} = \frac{l^2}{l_1^2}, \quad \text{also} \\ \frac{P}{P_1} = \frac{l^2}{l_1^2}, \quad \text{d. h.}$$

die aufzuwendenden Kräfte verhalten sich wie die Quadrate der Blechdicken. Man darf hierbei aber nicht übersehen, dass $b/b_1 = 1/n$ sein muss. Weil man ja die gleiche Betrachtung auf den Vorgang des Lochens übertragen kann [krummliniger Schnitt statt des geradlinigen], so muss beim Lochen auch Proportionalität zwischen Stempeldurchmesser d und Blechdicke l bestehen, d. h. die Spannungen τ_n werden bei gleichem Material und verschiedenen Stempeldurchmessern d gleich gefunden, wenn das Verhältniss l/d ein gleiches bleibt.

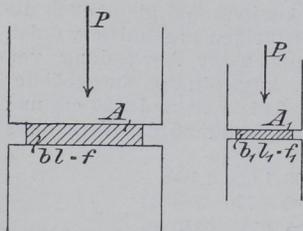


Fig. 167.

221. Da auch beim Scheren und Lochen Nebeneinflüsse, z. B. die äusseren Abmessungen des Probestückes beim Lochen, das Verhältniss zwischen Stempel- und Matrizendurchmesser d_1/d , die Form der Stempelendfläche, die Härte der Stempel und Matrizen u. a. m. von erheblicher Wirkung auf das Prüfungsergebniss sind, so können immer nur solche Scherfestigkeiten unmittelbar in Vergleich gestellt werden, die mit Apparaten erhalten sind, die das Gesetz der geometrischen Aehnlichkeit erfüllen. Hierbei bedarf es immerhin noch einer Feststellung durch Versuche, in welchem Maasse sich die Versuchsausführung so gestalten lässt, dass auch alle übrigen Forderungen, die unausgesprochen in dem Gesetz enthalten sind, erfüllt werden können.

Um den Forderungen des Gesetzes der Aehnlichkeiten zu genügen, konstruirte ich den in Fig. 161 bereits mitgetheilten Scheerapparat zum Abschneiden runder Körper. Dabei ist die Scheerbackendicke immer gleich dem Durchmesser des Probekörpers.

Für den geradlinigen Schnitt unter parallelen Schneidkanten, wie er im Materialprüfungswesen die Regel bildet, ist ja den Forderungen des Gesetzes der Aehnlichkeiten leicht durch Annahme eines bestimmten Verhältnisses b/l zwischen Schnittlänge und Probendicke genügt. Man sollte bei den Materialprüfungen sich auf bestimmtes Verhältnisse, z. B. $b/l = 5$ oder 10 einigen, oder sollte wenigstens das Verhältniss bei den Veröffentlichungen der Ergebnisse anführen.

222. Für Lochversuche habe ich den in Fig. 168 abgebildeten Apparat¹⁾ konstruiert, der sich in der Charlottenburger Versuchsanstalt ausgezeichnet bewährt hat.

Das untere Gussstück *A* trägt als Matrize einen gehärteten Stahlring *B*, auf dem das Probestück aufliegt. Der Lochstempel *C* passt in das Druckstück *D*. Damit der Stempel genau centrirt zur Matrize vorgeht, ist das Druckstück *D* in dem Gussstück *E* geführt und dieses hat seinerseits durch die beiden seitlichen Stifte Führung im unteren Gussstück. Ausserdem kann das obere Stück *E* mit dem unteren noch durch vier

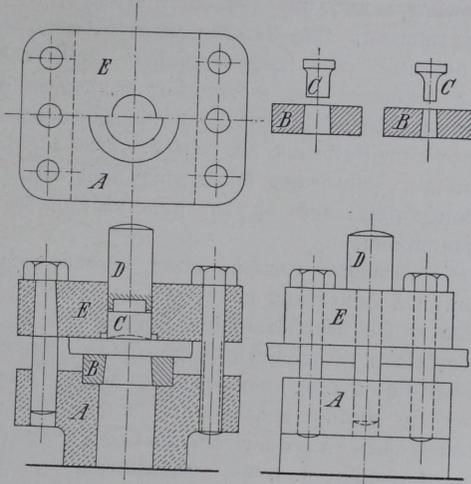


Fig. 168.

Schrauben verbunden werden, so dass die Probe fest eingespannt werden kann; von dieser Einrichtung wird indessen selten Gebrauch gemacht.

Lochstempel und Matrizen können ausgewechselt werden. Lochstempel sind in den Abmessungen $d = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ und $4,0$ cm mit ebener Endfläche vorhanden; ausserdem sind Stempel mit hohlen, nach der Kugel vom Halbmesser $2d$ ausgehöhlten Endfläche in Benutzung. Zu jedem der Stempel gehört ein Satz von 3 Matrizenringen mit dem oberen Durchmesser

$$d_1 = 1,005 d; 1,050 d \text{ und } 1,100 d.$$

Wählt man also den Durchmesser des Stempels nach der Probendicke aus, so wird man mit den vorhandenen Einrichtungen leicht ein nahezu gleiches Verhältniss l/d innehalten können, wie es das Gesetz der Aehnlichkeiten verlangt.

f. Stossfestigkeit.

1. Fallversuche, allgemeine Anordnung.

223. Bei den bisher besprochenen Versuchsarten wurde der Versuch immer unter Anwendung einer ruhig und sehr langsam wirkenden Belastung

¹⁾ Der von Tresca bereits im Jahre 1863 benutzte Apparat hat übrigens ganz ähnliche Einrichtung.

ausgeführt. Im Maschinenbau, im Eisenbahnbetriebe und bei vielen anderen Gelegenheiten, kommen aber sehr häufig Fälle vor, in denen das Material sehr schnell auftretenden Beanspruchungen, ja sogar Stößen ausgesetzt ist.

Die Materialien verhalten sich aber zum Theil recht verschieden gegenüber der ruhigen und der plötzlichen Inanspruchnahme. Stangen aus Pech, Siegellack, Glas u. a. m. kann man ziemlich stark belasten, wenn die Last ruhig und langsam wirkt. Pech und Siegellack geben bei langer Einwirkung allerdings schon sehr geringen Belastungen nach; sie erweisen sich unter diesem Umstande als sehr bildsam und zähe, aber ganz geringe Schlagwirkungen sind ausreichend, um sie ohne erkennbare Streckungen oder Biegungen zu zertrümmern. Das Material einer Eisenbahnschiene kann recht gute Ergebnisse bei Zug- und Biegeversuchen unter ruhiger Inanspruchnahme, aber sehr schlechte bei stossweiser Beanspruchung liefern. Aus diesem Grunde ist es schon früh gebräuchlich gewesen, Schienen und anderes Material unter dem Fallwerk zu prüfen. Erst als der Zerreißversuch wesentliche allgemeine Verbreitung fand, ging man zunächst mehr von der Prüfung durch den Fallversuch ab; in neuerer Zeit ist er jedoch wieder mehr zu Ehren gekommen.

224. Die Fallversuche werden unter sogenannten Fallwerken ausgeführt, Maschinen, bei denen ein schwerer, zwischen senkrechten Schienen geführter, aus der Höhe herabfallender Körper das Probestück so trifft, dass es auf Zerdrücken (Stauchen), Zerreißen, Biegen, Verdrehen, Abscheeren, Lochen u. s. w. beansprucht wird. Man pflegt die Fallversuche entweder an einfach gestalteten, zu dem Zweck besonders hergerichteten Probestücken, oder an ganzen Konstruktionstheilen (Achsen, Schienen, Radreifen u. s. w.) auszuführen.

2. Fallwerke.

225. Versuche mit dem Fallwerk lassen sehr bald erkennen, dass das Ergebniss durch die Art der Lagerung der Probestücke, durch die Massen des Apparates und manche anderen Dinge sehr merklich beeinflusst wird und dass man, namentlich auf verschiedenen Fallwerken, unter gleichen Versuchsbedingungen abweichende Ergebnisse erhalten kann. Wie auch die sonstigen zu Versuchszwecken benutzten Maschinen und Apparate der ständigen Kontrolle bedürfen und man bestimmte Konstruktions-Grundlagen für alle Apparate festhalten muss, wenn sie unmittelbar vergleichbare Ergebnisse liefern sollen, so ist dies auch bei den Fallwerken und zwar in erhöhtem Maasse der Fall. Nachdem hier lange Zeit ziemliche Willkür geherrscht, hat zuerst die „Konferenz zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren“ zu Dresden im Jahre 1886 (*L 128 S. 9*) Grundsätze aufgestellt, denen die Konstruktion eines Fallwerkes genügen muss, um vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Der „Verein deutscher Eisenbahnverwaltungen“ hat dann im Grossen und Ganzen diese Grundsätze für die Konstruktion derjenigen Fallwerke übernommen, mit denen die bei der Abnahme von Eisenbahnmaterial anzustellenden Fallproben ausgeführt werden.

226. Da vorauszusehen ist, dass die Vorschriften des Vereins deutscher Eisenbahnverwaltungen immer mehr zu allgemeiner Annahme gelangen werden, so seien hier die Grundbedingungen, denen ein

Fallwerk zu genügen hat, in erster Linie nach diesen Bestimmungen dargestellt; sie seien indessen ergänzt durch die Vereinbarungen der oben genannten Konferenzen. Um den Ursprung der nachstehenden Bestimmungen äusserlich erkennen zu können, sind die von den Eisenbahnverwaltungen aufgestellten Vorschriften am Schluss der Sätze mit einem *E* und die als Ergänzung angeführten Vereinbarungen der Konferenzen am Schlusse mit einem *K* bezeichnet.

1. Von der vollständigen Konstruktion eines Normalfallwerkes ist Abstand zu nehmen, vielmehr sind nur über diejenigen Theile genaue Vorschriften zu machen, welche einen Einfluss auf das Versuchsergebniss haben können. Es wird empfohlen, das Gestell der Fallwerke in Eisen auszuführen und es im geschlossenen Raum aufzustellen. *K*.
2. Als normales Bärgewicht ist 1000 kg anzunehmen; ausnahmsweise auch 500 kg zuzulassen. *K*.
Das Bärgewicht soll bei der Prüfung von Schienen, Axen und Radreifen zwischen 600 und 1000 kg, bei der Prüfung von Radgestellen 200 kg betragen. (Für Lokomotivaxen wird an anderer Stelle ein Bärgewicht von 800 kg vorgeschrieben.) *E*.
3. Die Bärmasse kann aus Gusseisen, gegossenem oder geschmiedetem Stahl bestehen. Die Bärform ist so zu wählen, dass der Schwerpunkt der ganzen Bärmasse möglichst tief liegt. *K*.
4. Die Schwerlinie des Bären muss in die Mittellinie der Bärführungen fallen. *E. K*.
5. Besondere Marken auf dem Ambos oder der Schabotte sollen diese Mittellinie kenntlich machen. *K*.
6. Das Verhältniss der Führungslänge des Bären zur Lichtweite zwischen den Schienen soll grösser als 2:1 sein. *K*.
7. Die Führungsprismen sind aus Metall, z. B. Eisenbahnschienen und so herzustellen, dass dem Bären kein grosser Spielraum bleibt. Schmierung der Führungen mit Graphit wird empfohlen. *K*.
8. Es ist eine besondere Hammerbahn aus geschmiedetem Stahl einzusetzen und durch Schwalbenschwanz und Keil durchaus centrisch zur Schwerlinie des Bären zu befestigen. Durch besondere Marken soll die Erfüllung dieser Bedingung erkennbar gemacht sein. *K*.
9. Die Hammerbahn ist stets eben zu machen; dementsprechend sind in allen Fällen, also bei der Prüfung von Schienen, Axen, Radreifen, Federn u. s. w. jedesmal bestimmte Aufsatzstücke von zweckentsprechender Form mit oberer ebener Fläche zu benützen. Die Aufsatzstücke müssen ein möglichst geringes Gewicht haben. *K*.
Begründung: Der gleiche Bär mit ebener Schlagbahn wird für alle Fälle mit Rücksicht auf die Vereinfachung der Zurichtungen für das Normalschlagwerk und auf die einmalige Berichtigung des Bärgewichtes nach Punkt 19 und 20 empfohlen. *K*.
10. Die Hammerbahn soll nach einem Halbmesser von nicht unter 15,0 cm abgerundet sein; bei Schlagversuchen mit Radreifen soll die Hammerbahn auf ein dem Querschnitte des zu prüfenden Stückes entsprechendes, in seiner oberen Fläche ebenes Aufsatzstück schlagen, dessen Gewicht kleiner als 20 kg sein soll. *E*.
11. Bei Veröffentlichungen von Versuchsergebnissen oder bei Ausstellung

von Prüfungszeugnissen ist die zur Verwendung gekommene Form der Aufsatzstücke genau anzugeben. *K.*

12. Die Auslösevorrichtung für den Bären soll so beschaffen sein, dass durch sie der freie Fall des Bären nicht beeinflusst wird. *E.*

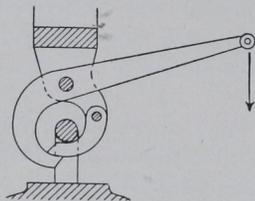


Fig. 169.

Die in Fig. 169 dargestellte Auslösevorrichtung wird besonders empfohlen. *K.*

Es ist eine Einrichtung zu treffen, durch welche das zufällige Herabfallen des theilweise oder ganz gehobenen Bären verhindert wird. *E.*

13. Das Schabottengewicht soll mindestens das 10fache des Bärgewichtes betragen. *K.*

Das Schabottengewicht soll mindestens 10000 kg betragen. Dieser Untersatz soll aus einem Stück Gusseisen bestehen. *E.*

14. Das Fundament soll unelastisch aus einem soliden Mauerkörper gebildet sein, dessen Grösse durch die Baugrundverhältnisse bedingt ist, *K. E.*, dessen Höhe aber mindestens 1 m betragen muss. *E.*
15. Die Auflagerstücke für den Probekörper sind an der Schabotte solide zu befestigen, z. B. zu verkeilen. *K. E.*
16. Es sind Einrichtungen zu treffen, durch welche das Herausspringen der Schienen, Axen und Radreifen aus den Auflagern nach erfolgtem Schlage verhindert wird, ohne deren freie Bewegung zu beeinflussen. Auch muss eine Vorrichtung vorhanden sein, durch welche der Radreifen zur Aufnahme des Schlages in richtiger Stellung gehalten wird. *E.*
17. Fallwerke bis zu 6 m Fallhöhe verdienen ein grösseres Zutrauen als solche mit grösseren Höhen; es empfiehlt sich daher, bei Neuanlagen 6 m Höhe nicht zu überschreiten. *K.*
18. Die Höhenthailung zur Ermittlung der Fallhöhe des Bären soll an der Geradföhrung verschiebbar sein und das Schlagmoment (Fallhöhe mal Bärgewicht = HG) in Meterkilogrammen angegeben werden. Nach jedem Schlage ist die Fallhöhe des Bären entsprechend der stattgehabten Formänderung des Probestückes zu regeln. *E.*

Bei Benutzung mehrerer Bären von verschiedenem Gewichte dürfte es praktischer sein, die verschiedene Höhenthailung nach Metern [Centimetern] anzunehmen, weil dann für alle die gleiche Theilung benutzt werden kann. Man beachte die grosse Mannigfaltigkeit der von *E.* vorgeschriebenen Bärweighte unter Satz 2.

19. Jedes Normal-Fallwerk ist zu aichen. *K.*

Begründung: Es ist nicht ausgeschlossen, dass Fallwerke, welche mit allen Vorsichtsmaassregeln konstruirt sind, durch unübersehbare Einflüsse dennoch unrichtige Wirkungen geben. Man kann nur dann vergleichbare Ergebnisse erhalten, wenn man die Reibungsverluste in Rechnung zieht, beziehentlich ausgleicht. *K.*

20. Zur Ermittlung des wirksamen Bärweightes können folgende Verfahren benutzt werden:

a) Man schaltet zwischen dem Bären und der Auslöse eine genügend kräftige Federwage ein und liest das wirksame Bärweight während des langsamen Sinkens des Bären

ab. Man erhält so das Bärgewicht weniger der Reibung, beim Anheben des Bären aber sein Gewicht einschliesslich der Reibung.

β) Man bestimmt das Bärgewicht aus der Wirkung eines Schlages von bestimmter Fallhöhe auf einen genau centrisch eingestellten kupfernen Normalcylinder, welcher aus bestem Stehbolzenkuper herzustellen ist und eine bestimmte, noch festzustellende Form und ein bestimmtes Gewicht haben soll. *K.*

21. Solche Normalkupfercylinder sollen auch zur Vergleichung der einzelnen Schlagwerke unter einander, zur Aichung derselben, benutzt werden. *K.*

[Die königliche mechanisch-technische Versuchsanstalt in Charlottenburg giebt auf Antrag solche verglichene Normalkörper ab.]

22. Schlagwerke, bei denen die Reibungsarbeit grösser als 2% der Schlagarbeit des Bären ist, sind zu verwerfen. *K.*

227. Zur Ausführung wissenschaftlicher Versuche hat Kick (*L 100*, S. 101) sich eines ballistischen Fallwerkes bedient, dessen Konstruktion er in der Quelle ausführlich mittheilt. Der Konstruktionsgrundsatz ist folgender.

Der Bär *B* und der Ambos *A* Fig. 170 sind an Drähten *ac* und *bd*

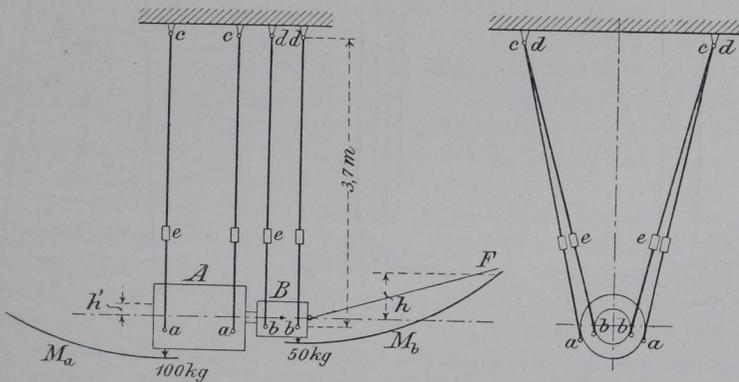


Fig. 170.

an der Decke aufgehängt, so dass beide Pendelbewegungen über den Messbögen *Ma* und *Mb* ausführen können. Die Aufhängungen sind so angeordnet, dass Schaukelbewegungen des Bären aus der Senkrechten heraus ausgeschlossen sind und durch die Schraubenverbindungen *ee* die Mittellinien von Bär und Ambos genau in eine Linie gebracht werden können. Zum Zwecke des Versuches wird der Versuchskörper am Ambos befestigt und der Bär durch Zurückziehen mittelst einer Hanfschnur in die beabsichtigte Höhenlage gebracht, die man mittelst einer Marke am Bogenmaass *Mb* ablesen kann. Die Auslösung des Bären erfolgt durch Abbrennen der Schnur *F*, so dass er ohne Seitenschwingungen fällt. Ein Theil der in *B* aufgespeicherten Arbeit wird zur Formänderung des Probekörpers angewendet und ein anderer auf den Ambos *A* übertragen, der einen entsprechenden Ausschlag macht, welchen man am Messbogen *Ma* ablesen kann.

228. Für die Charlottenburger Anstalt habe ich mehrere kleine Fallwerke konstruiert, deren Bärgegewichte zwischen 0,5 und 200 kg schwanken. Das kleinste dieser Fallwerke hat als Bärführung ein gezogenes Eisenrohr, in dem der Bär, aus Stahl mit glasharter Schlagfläche, durch einen Faden gehoben, in der Höhe durch einen einfach vorgehaltenen Stift abgefangen, und durch Zurückziehen dieses Stiftes lässt man den Bären aus der gewünschten Höhe herabfallen. Das in Fig. 171 skizzierte kleine Fallwerk war ursprünglich für die vergleichende Bestimmung der Härte von Jagdschrot bestimmt, hat aber seitdem mannigfache Anwendung gefunden.

229. Ein anderes etwas grösseres Fallwerk dient zur Prüfung von Bausteinen, Belagplatten, Dachsteinen, Pappen u. s. w. auf Stossfestigkeit und arbeitet mit freifallenden birnförmigen Bären von 1 bis 5 kg Gewicht.

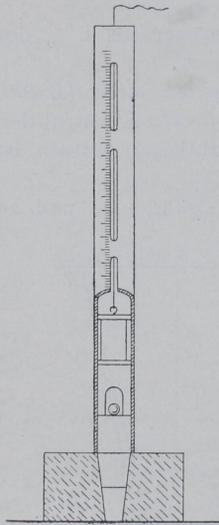


Fig. 171.

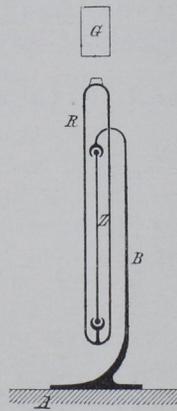


Fig. 172.

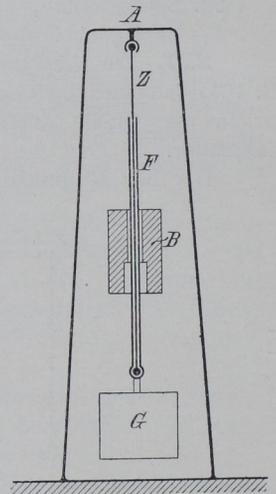


Fig. 173.

Die Steine werden auf trockenem gesiebtem Sand gelagert, die Pappen werden auf Holzrahmen aufgenagelt.

230. Ein Fallwerk von 4,5 m Fallhöhe und mit Bären von 20 bis 100 kg arbeitend, ist so konstruiert worden, dass es alle möglichen Arten von Festigkeitsversuchen unter Fallwirkung zulässt. Es ist für Zerreiß-, Biege-, Stauch- und Beulungsversuche eingerichtet, und auch Scheer- und Lochversuche kann man unter Benutzung der in Abs. 216 und 223, Fig. 161 und 168 dargestellten Vorrichtungen ausführen.

Die Einrichtung zur Ausführung von Zerreißversuchen¹⁾ unter diesem Fallwerk besteht im Grundsatz aus einem Bock *B*, Fig. 172, der auf dem Ambos *A* befestigt wird, und aus einem Rahmen *R*, der zwischen den Führungsschienen des Fallwerkes gleitet. Der Probestab *Z* wird mit dem oberen Ende in dem Bock *B*, mit dem unteren Ende in dem Rahmen *R* mit Beilegeringen ähnlich so befestigt, wie es in Abs. 70, Fig. 27, hinsichtlich der Ausführung von Zerreißversuchen besprochen wurde. Der Bär *B*

¹⁾ Eine ähnliche Einrichtung ist schon von Uchatius benutzt worden (*L* 100, S. 32).

schlägt auf den Kopf des Rahmens *R*, und dieser überträgt den Schlag auf die Probe, welche ihn durch den Bock *B* in den Ambos leitet.

231. Für die Prüfung von Radgestellen und Flusseisenscheibenrädern wird von den deutschen Eisenbahnverwaltungen neuerdings folgende Fallprobe vorgeschrieben.

Die Radgestelle und Scheibenräder werden mit dem Felgen- bzw. Spurkranze auf Holzunterlagen wagerecht gelagert. In die Nabenbohrung wird eine aus vier Segmentstücken bestehende Buchse geschoben, die im Inneren auf je 2,0 cm Länge um 0,1 cm verjüngt ist. Ein genau in die Buchse passender Stahldorn von quadratischem Querschnitt wird in die Buchse eingetrieben; bei den Rädern mit einer Nabenbohrung von 14,5 cm, geschieht dies durch 6, bei denen mit 13,0 cm Nabenbohrung durch 5 Schläge, mit einem 200 kg schweren Bären, die nacheinander aus 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 und 4 m Höhe erfolgen. Vor der Benutzung sind die Dorne und Innenflächen der Buchse mit Oel abzureiben und wieder trocken abzuwischen.

232. Ein viertes Fallwerk konstruirte ich für die Charlottenburger Anstalt zur Ausführung von Schlagversuchen mit Drahtseilen, die auf die Wirkung einer sehr grossen Zahl kleiner Schläge geprüft werden sollten. Hierbei ist der Ambos aus einem kräftigen Eisengerüst *A*, Fig. 173, gebildet. An diesem ist das Seil *Z* aufgehängt, das unten mit einem Gewicht *G* beschwert ist. Das Gewicht trägt ein Gasrohr *F*, das als Führung für den Bären *B* dient, der etwa 13 mal in der Minute von der Maschine gehoben und ausgelöst wird. Mit diesem Fallwerk sind sehr umfangreiche Untersuchungen über die Festigkeit von Seilen und Seilverbindungen ausgeführt worden, über welche Rudeloff (*L 153*) berichtete.

233. Von Rudeloff ist dieses Fallwerk auch mit einer Einrichtung versehen, welche zur vergleichenden Untersuchung von Schotter zur Bettung der Eisenbahnschienen gedient hat und sich vorzüglich bewährte. Er liess den Kies oder Steinschlag auf bestimmte Korngrösse absieben und brachte ihn dann in einen Kasten, dessen Seitenwände fest oder beweglich eingestellt werden konnten, und liess nun den Bären, dem die Form der Stopfhacke gegeben war, in den Schotter fallen. Als Vergleichsmaassstab wurde das Maass und die Art der Zerkleinerung benutzt, die das Schottermaterial bei einer bestimmten Summe von Schlagarbeit erfuhr. Der Grad der Zerkleinerung wurde hierbei durch wiederholtes Aussieben festgestellt.

234. In seiner einfachsten Form wird das Fallwerk häufig in Eisen- giessereien zum Zerschlagen grosser Gussblöcke und gelegentlich auch zur Erprobung von Gusseisen benutzt.

Hierbei legt man auf eine Unterlage von gleichmässig aufgesiebttem Formsand eine Probepatte von 1 m im Quadrat, 2 cm stark, Fig. 174, und lässt auf die Mitte einen Bären von 25 kg Gewicht aus verschiedenen Höhen fallen, indem man die Fallhöhe von 25 zu 25 cm wachsen lässt. Jüngst (*L 154*) prüfte auf diese Weise gusseiserne Platten, von denen die besten erst bei 4 m einen Riss bekamen und bei 5,25 m zersprangen.

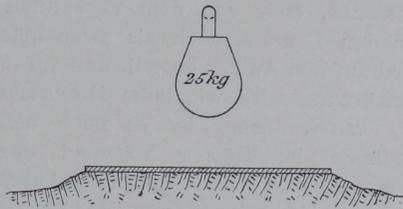


Fig. 174.

235. Aus den voraufgehenden Absätzen ergibt sich, dass das Fallwerk in einfacher Form zu allerlei Versuchen, namentlich im Fabrikbetriebe zur Kontrolle der Materialien weit leichter und bequemer benutzt und verworthen werden kann als die Zerreiissmaschine, weil es billiger, einfacher in der Bedienung ist, weniger Probenbearbeitung erfordert und das Versuchsergebniss sehr schnell liefert; man kann auch die Art der Versuchsausführung sehr leicht besonderen Bedürfnissen anpassen. Aus allen diesen Gründen sollte man bestrebt sein, dem Fallversuch immer mehr Eingang in das Prüfungswesen zu verschaffen.

3. Stauchversuch.

236. Dem Druckversuch unter ruhiger Belastung auf der Festigkeitsprobirmaschine entspricht der Stauchversuch unter dem Fallwerk; die Probekörper können die gleichen Formen erhalten, wie beim Druckversuch. Der Unterschied zwischen beiden Beanspruchungsarten besteht im wesentlichsten darin, dass in dem einen Falle die Formänderung sehr schnell, in dem Bruchtheil einer Sekunde, und im anderen Falle langsam ausgeführt wird.

Bei der Zerreiissmaschine können die wirkende Kraft und die hierdurch erzielten Formänderungen unmittelbar gemessen werden, man kann also auch die zur Formänderung aufgewendete mechanische Arbeit ohne weiteres messen; sie wird ganz an das Probestück abgegeben. Der gemessene Betrag ist also die Nettoarbeit.

Beim Fallwerk geht aber ein grosser Theil der im fallenden Bären aufgespeicherten Arbeit verloren, und man kann nur die Gesamtarbeit, die Bruttoarbeit des Bären $A = H G$ messen, wenn G das Bärgewicht in kg und H die Fallhöhe in m ist.

Man bemerkt also schon hier, dass die beiden für gleiche Formänderungen aufgewendeten Arbeitsbeträge nicht unmittelbar in Vergleich gestellt werden können.

237. Die praktische Ausführung der Stauchversuche gestaltet sich ebenso einfach, wie beim Druckversuch. Ein prismatischer Körper, in der Regel ein Würfel oder ein Cylinder von der Länge l gleich dem Durchmesser d , oder von dem Verhältniss $l = 0,886 d$, d. h. $\sqrt{f}/l = 1$ [wie sie für den Druckversuch als zweckmässig befunden wurden, 167, S. 119], wird auf den Ambos gestellt und auf ihn der Bär fallen gelassen. Die Längenverkürzung wird wie beim Druckversuch gemessen.

238. Bisher ist es noch nicht versucht worden, die Spannungszustände im Körper während der Formänderung durch den Schlag rechnerisch zu verfolgen, eine Aufgabe, die wegen der verwickelten Vorgänge recht schwer sein dürfte. Man begnügte sich damit, die Brutto-schlagarbeit mit den erzielten Formänderungen einfach in Vergleich zu stellen. Dies geschieht am besten und übersichtlichsten durch Schaubilder. Wie früher kann man die Schaubilder für den ganzen Körper als solchen auftragen, also die Gesamtarbeit $A = G h$ in Verbindung mit der erzielten Verkürzung $-\lambda$, oder man kann die spezifische Schlagarbeit, d. h. den von der Raum- oder von der Gewichtseinheit des Probekörpers aufgenommenen Arbeitsantheil, mit der Stauchung der Längeneinheit $-\varepsilon = \lambda/l$ in Verbindung bringen.

Hiernach ist also, wenn i der Rauminhalt des Probekörpers in cem und g dessen Gewicht in gr, die spezifische Schlagarbeit:

$$a = \frac{A}{i} \text{ oder } a_1 = \frac{A}{g} \text{ oder}$$

$$a = \frac{HG \text{ cm kg}}{i \text{ ccm}} \text{ oder } a_1 = \frac{HG \text{ cm kg}}{g \text{ gr}}.$$

Im Folgenden soll die spezifische Arbeit immer auf die Raumeinheit bezogen werden, wenn nichts anderes gesagt ist. Um diesen Werth auf die Gewichtseinheit umzurechnen ist er mit $\frac{1}{r}$, dem reciproken Werth des Raumgewichtes zu multipliciren, es ist also:

$$a_1 = \frac{a}{r}.$$

Die erzielte Verkürzung ergibt sich nach Fig. 175 zu:

$$-\lambda = l - l_1$$

oder die Stauchung:

$$-\varepsilon_s = \frac{l - l_1}{l} = -\frac{\lambda}{l}$$

oder in Procenten ausgedrückt:

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

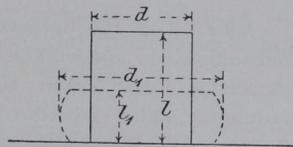


Fig. 175.

Der Index s wird in der Folge stets gebraucht werden, um die Werthe die sich auf den Stauchversuch beziehen, von den aus dem Druckversuch hervorgehenden zu unterscheiden.

Als Stauchungszahl a_s könnte man, wie früher (34), die Stauchung bezeichnen, welche die Längeneinheit durch die Arbeitseinheit erfährt, also

$$a_s = \frac{\varepsilon_s}{a}$$

239. Wenn ein Körper vom Dichtigkeitsgrad 1 geprüft wird, so wird er während der Formänderung seinen Rauminhalt nicht merklich verändern. Demnach besteht zwischen dem Durchmesser d_1 (Fig. 175) und der Länge l_1 eine Beziehung, die, abgesehen davon, dass der Körper in Wirklichkeit Tonnenform annimmt, durch die Gleichung:

$$i = i_1 \text{ oder } \frac{\pi}{4} d^2 l = \frac{\pi}{4} d_1^2 l_1^2$$

oder wenn $d = l = 1$ gesetzt wird

$$l_1 = \frac{1}{d_1^2}$$

gegeben ist; bei $l = 0,886 d$ wird $l_1 = \frac{0,886}{d_1^2}$. Bei dichten Körpern genügt also die Feststellung der Stauchung für die Darstellung der Formänderungen.

240. Wird nach den nunmehr festgestellten Begriffen ein Schaubild für einen Stauchversuch entworfen, so ist zu beachten, dass für jeden Schlag nur ein Punkt verzeichnet werden kann, nämlich der Endzustand, den der Körper infolge des Schlages angenommen hat. War der Versuch in der Weise durchgeführt, dass der Körper durch mehrere Schläge von

gleicher spezifischer Schlagarbeit für jeden Schlag, d. h. durch mehrere Schläge aus gleicher Fallhöhe gestaucht wurde, so würde sich die nach

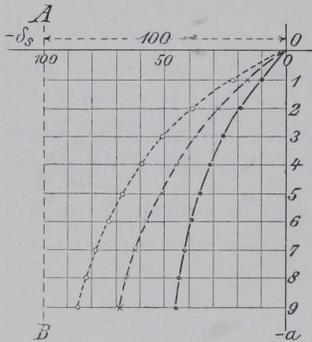


Fig. 176.

jedem Schläge erzielte Längenänderung durch eine Punktreihe (Fig. 176) darstellen lassen. Ein zweites Material unter gleichen Verhältnissen geprüft, würde eine zweite Punktreihe ergeben u. s. f. Um die Punktreihen besser übersehen zu können, werden die zusammengehörigen Punkte durch einen Linienzug steter Krümmung [durch eine Ausgleichlinie] verbunden. Die Entfernung der Punkte von der Linie $O - a$ giebt die jedesmalige Stauchung $-\delta_s$, und diejenige bis zur Linie AB die Länge des Körpers nach dem Versuch, ausgedrückt in Procenten der ursprünglichen Länge, an.

241. Um die Gesetze kennen zu lernen, nach denen die Formänderungen der Materialien beim Stauchversuch verlaufen, und um hieraus einheitliche Vorschriften für die Materialprüfung durch Stauchversuche abzuleiten, habe ich die Versuche von Kick ($L 100$) in grosser Zahl erweitert. Die Ergebnisse sind in den „Mittheilungen aus den Königlichen technischen Versuchsanstalten zu Berlin“ Jahrgang 1891 sehr eingehend besprochen. Aus diesen Versuchen und denjenigen von Kick lassen sich die in den folgenden Abschnitten besprochenen Gesetze ableiten.

a. Einfluss der Geschwindigkeit.

242. Die Arbeit, die der Bär leistet, ist gegeben durch Bärgewicht mal Fallhöhe. Wenn zur Erzielung gleicher Formänderung an gleichen Körpern nur gleiche Arbeit erforderlich wäre, so müsste es auch gleich sein, ob die Arbeit durch ein grosses Gewicht und kleine Fallhöhe, oder ob sie durch ein kleines Gewicht und grosse Fallhöhe erzielt wurde. Im ersten Falle ist aber die Geschwindigkeit, mit welcher der Bär auf den Körper trifft, d. h. die Geschwindigkeit, mit der die Formänderung vollzogen wird, kleiner als im letzteren. Man kann kurzer Hand durch den Versuch entscheiden, ob dieser Geschwindigkeitsunterschied von praktisch bemerkbarem Einfluss auf die Grösse der Formänderung ist; thatsächlich vorhanden ist dieser Einfluss sicher.

Kick hat durch seine Versuche erwiesen, dass für gewisse Materialien die Geschwindigkeit innerhalb ziemlich weiter Grenzen keinen bemerkbaren Einfluss ausübt, denn er erzielte bei Bleikörpern $d=l=1,51$ cm unter Anwendung einer Gesamtschlagarbeit von $1,77$ cm kg, d. i. bei $i=2,7$ ccm und $a=66 \frac{\text{cm kg}}{\text{ccm}}$, folgende Stauchungen beim:

Schlag	1	2	3
a) Fallhöhe $h = 307$ cm; Bärgewicht $G = 0,576$ kg	19,3	35,0	47,0%
b) Fallhöhe $h = 26,1$ cm; Bärgewicht $G = 6,75$ kg	19,8	34,4	46,3%

Die Geschwindigkeiten, die der Bär beim Auftreffen hat, sind aber nach dem bekannten Gesetz

$$v = \sqrt{\varepsilon g \delta}; \text{ da } \sqrt{2g} = \sqrt{2 \cdot 9,81} = 4,43$$

$$v_a = 4,43 \sqrt{3,07} = 7,75 \text{ m}$$

$$v_b = 4,43 \sqrt{0,261} = 2,22 \text{ m, oder}$$

$$v_a : v_b = 3,5 : 1.$$

Unter den gleichen Verhältnissen ergeben sich für andere Bleikörper $d = l = 1,8 \text{ cm}$ und für $a = 39 \frac{\text{cm kg}}{\text{ccm}}$ beim:

Schlag	1	2	3	4
für den Fall a) $h = 307 \text{ cm}; v = 7,75 \text{ m}$	15,1	25,6	34,8	41,8 %
für den Fall b) $h = 26,1 \text{ cm}; v = 2,22 \text{ m}$	15,1	26,5	35,9	44,4 %

Der Einfluss der Geschwindigkeit scheint hiernach nicht gross zu sein, indessen können diese Versuche mit Blei und geringen spezifischen Schlagarbeiten noch nicht als ausschlaggebend erachtet werden.

β. Stauchversuch und Aehnlichkeitsgesetz.

243. Nach dem Aehnlichkeitsgesetz sollten:

gleiche spezifische Schlagarbeiten (cm kg/ccm oder cm kg/gr) gleiche Stauchungen bei geometrisch ähnlichen Körpern aus gleichem Material erzielen.

Um dieses Gesetz zu prüfen, wurden Versuchsreihen mit sogenannten

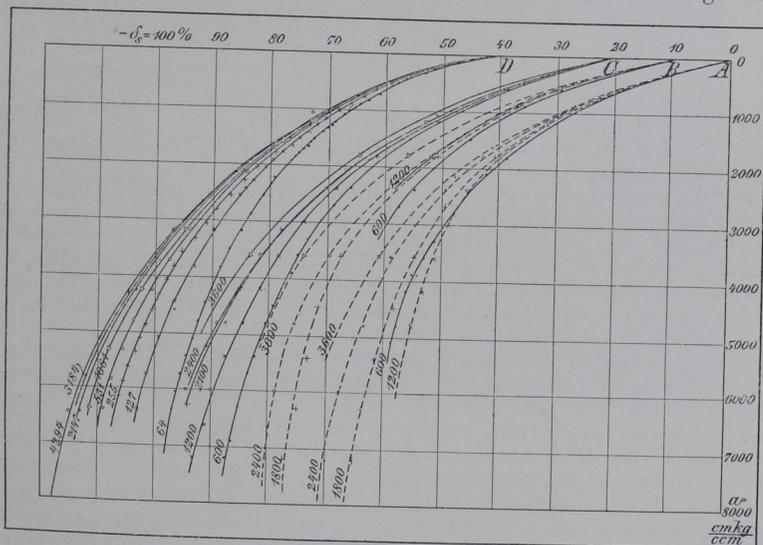


Fig. 177.

Gruppe A bis C, Walzmessing. Linien ausgezogen = mit Bär I geschlagen; Linien gestrichelt = mit Bär II geschlagen; $d = l$ für Gruppe A = 1,5; B = 1,3 und C = 1,0 cm. Die einzelnen Linien sind am Fuss

mit der für den Schlag aufgewendeten spezifischen Arbeit $\frac{\text{cm kg}}{\text{ccm}}$ bezeichnet.

Gruppe D, Kupfer. Darstellungsweise wie bei A bis C.

Normalcylindern, d. h. $d=l$, von verschiedenen Abmessungen mit gesetzmässig abnehmenden specifischen Schlagarbeiten geprüft. Hierzu benutzte ich Cylinder von $d=l=1,0; 1,3$ und $1,5$ cm aus Walzmessung und Kupfer, die mit $a=60$ bis 650 cm kg/ccm für jeden Schlag beansprucht wurden. Die erzielten Stauchungen δ_s sind in den Schaubildern Fig. 177 dargestellt.

a. Die Schaubilder über die Stauchversuche sind in den „Mittheilungen“ (L 155) nach anderen Gesichtspunkten aufgestellt, als sie hier benutzt werden sollen. Es sind nämlich dort der Summe der specifischen Schlagarbeiten Σa nicht die Formänderungen, d. h. die Stauchungen $-\delta_s$, sondern die Resthöhen der Probekörper, also die Werthe $100 - \delta_s$ gegenübergestellt, und die weitere Verarbeitung hat dann, anschliessend hieran, ebenfalls in abweichender Weise stattzufinden. Man wird aber den Vergleich trotzdem leicht bewerkstelligen können.

Hier soll im Anschluss an die früher in Absatz 56. 103 schon benutzte gemeinsame Darstellungsweise der Schaulinien für den Zug- und Druckversuch (Fig. 178) im ersten und dritten Quadranten eine ähnliche Darstellungsweise auch

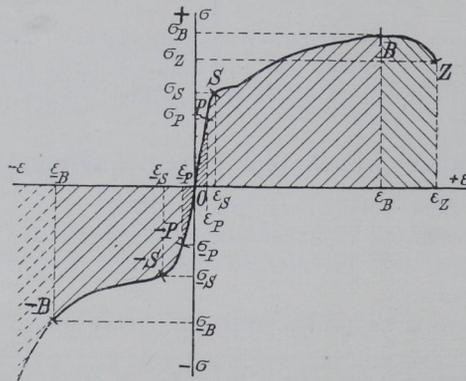


Fig. 178.

für den Zugversuch unter Schlagwirkung und für den Stauchversuch beibehalten werden. Danach ist, wie in Fig. 176 bereits geschehen, das Schaubild für den Stauchversuch in den dritten Quadranten verlegt.

b. Die Beibehaltung einer ganz bestimmten Darstellungsweise und, wie hier gleich hinzugefügt werden soll, einer ganz bestimmten Auswahl für das Ordinatenverhältniss, wenn nicht gar der anzuwendenden Maassstäbe, bietet so ausserordentliche Vortheile für die Anschaulichkeit und Uebersichtlichkeit der darzustellenden Prüfungsergebnisse, dass es mir nicht ein müssiges Spiel zu sein scheint, auf diesen Gegenstand hier etwas näher einzugehen, als dies bisher geschehen ist.

Früher schon ist der Werth des Zurückgehens auf die Spannungen und Formänderungen der Längeneinheit bei Darstellung der Prüfungsergebnisse mehrfach hervorgehoben worden (40. 185). Geometrisch ähnliche Körper aus gleichem Material geben alsdann bei Anwendung des gleichen Maassstabes für die Darstellung unmittelbar auf einander fallende Linien. Man hat also bei dieser Darstellungsweise die Möglichkeit vollkommensten Vergleiches. In der Charlottenburger Anstalt ist deswegen angeordnet, dass für solche Darstellungen, wo immer möglich, der gleiche Maassstab benutzt wird. Alle Schaulinien werden auf Netzpapier von $2,0 \times 2,0$ cm Maschenweite mit Untertheilungen von $0,2$ zu $0,2$ cm eingetragen; die Bildfläche hat ein Format 20×18 cm; das Blatt ist also bei ausreichender Randbreite sehr handlich. Ausnahmsweise werden zwei Blätter an einander geklebt. Auch für die Uebungen mit den Studirenden ist der gleiche Grundsatz aufrecht erhalten. Die Maassstäbe werden in der Regel so gewählt, dass 2 cm für σ , bez. τ , $= 1000 \text{ at}$ oder für ϵ , bez.

$\delta/l = 0,1$ oder für $\delta = 10\%$ sind; dieses Verhältniss für die Ordinaten der Spannungen und der Formänderungen wird bei Abweichungen vom Maassstab möglichst festgehalten, und nur bei sehr festen Materialien und bei solchen von sehr geringer Festigkeit wählt man für die Spannungen den halben, bez. den doppelten Maassstab. Kommt es darauf an, Besonderheiten der Formänderungen in anderem Maassstabe mehr zum Ausdruck zu bringen, so wird möglichst ein Vielfaches der ursprünglichen Theilung benutzt.

Hält man diese Maassnahmen fest, so gewinnt man auch für gelegentliche

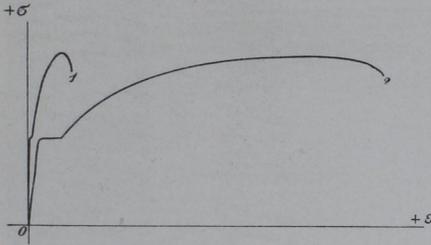


Fig. 179.

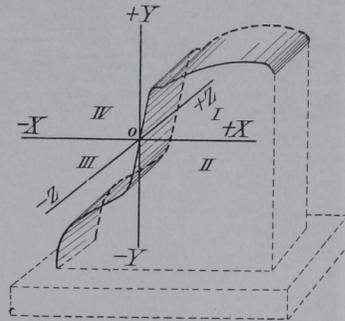


Fig. 180.

Veröffentlichungen anschauliche Bilder, da ja die photographischen Methoden eine Zurückführung auf die zur Veröffentlichung geeignete Bildgrösse ohne Störung des Ordinatenverhältnisses gestatten. Dass die allgemeine Einführung dieses Vorschlages von einigem Werthe sein würde, wird gewiss einleuchten,

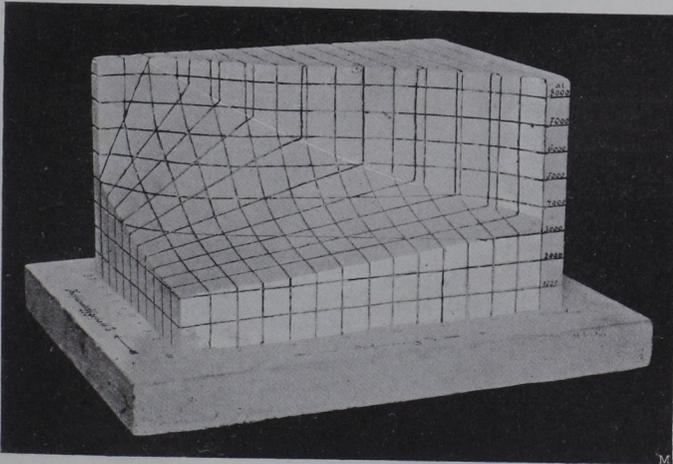


Fig. 181.

wenn man sich die Bilder vergegenwärtigt, die die Literatur als Schaulinien, z. B. für Flusseisen zu bieten pflegt. Ich habe in Fig. 179 zwei der äussersten Charaktere von Schaubildern für das gleiche Material skizzirt.

c. Man kann aber in der Entwicklung der Grundsätze für die Darstellung der Prüfungsergebnisse gelegentlich viel weiter gehen, und um auch hier Einheitlichkeit zu bewahren, soll in diesem Werke der in Fig. 180 schematisch veranschaulichte Plan innegehalten werden. Danach sollen die Spannungen σ , τ und die Arbeit a nach der Richtung Y , und die Formänderungen ε , δ , δ/l nach der

Richtung X aufgetragen werden; kommt die räumliche Darstellungsweise [z. B. Einfluss der chemischen Zusammensetzung, des Bearbeitungsgrades, der Wärme, der Zeit u. s. w.] in Frage, so steht die Richtung Z zur Verfügung. Der fein punktierte Körper in Fig. 180 deutet beispielsweise eine körperliche Darstellung der Abhängigkeit von Zug- und Druckfestigkeit von einer anderen Eigenschaft an.

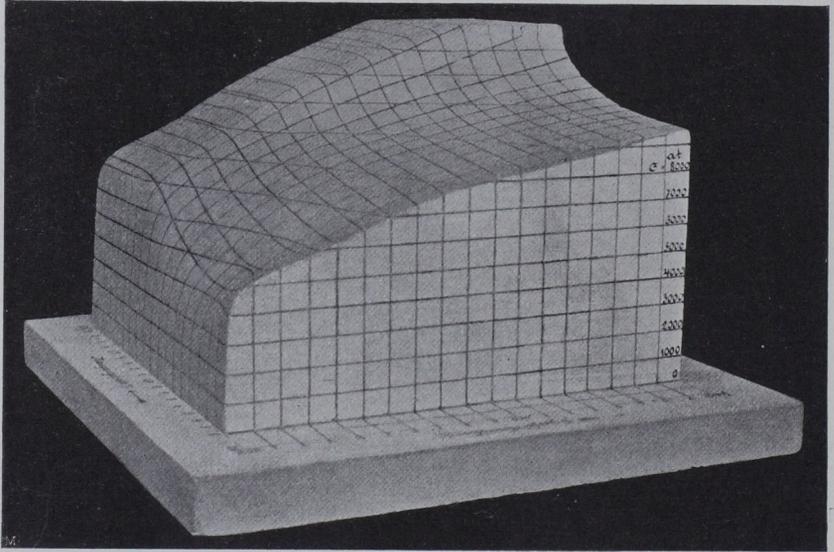


Fig. 182.

Hierbei hat natürlich aus einleuchtenden Gründen für die Darstellung im dritten Quadranten [Druck] gewissermassen von einer negativen Wiedergabe des Gesetzes für die Formänderung unter Druck Gebrauch gemacht werden müssen.

d. Um zu zeigen, was durch diese Darstellungsweise erreicht werden kann, sind in der Fig. 181 bis 183 einige Modelle über die Gesetze der Materialeigen-

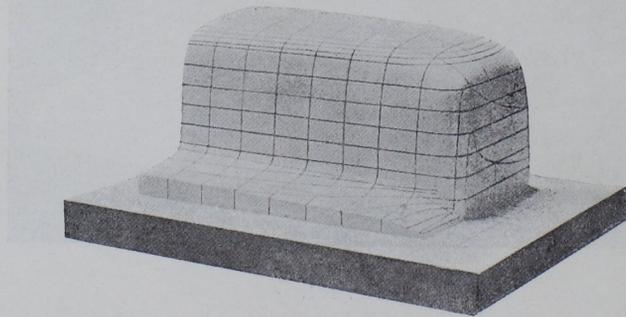


Fig. 183.

schaften aus der Sammlung der Versuchsanstalt in photographischer Abbildung wiedergegeben.

Fig. 181 stellt die Veränderung der Zugfestigkeit von Martineisen mit wachsendem Kohlenstoffgehalt, Fig. 182, die Veränderungen der Biegefestigkeit ähnlichen Materiales mit wachsendem Mangengehalt dar. Fig. 183 stellt das Gesetz über die Aenderungen der Dehnungen für den Spannungszuwachs $\Delta \sigma = 100 \text{ at}$

von hartgezogenem und nachher bei verschiedenen Wärmegraden zwischen 0 und 500 C° geglähten Kupferdraht dar; man erkennt den plötzlichen Uebergang vom harten in den weichen Materialzustand nach dem Glühen bei einer Hitze zwischen 300 und 400 C°.

Ausser der Darstellung von Gesetzen über die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von gewissen Bedingungen durch körperliche Modelle [Holz, Gyps u. s. w.] habe ich häufig von Nadeln mit bunten Glasköpfen Gebrauch gemacht und hierbei grosse Anschaulichkeit erreicht, z. B. bei der Darstellung der Ergebnisse von amtlichen Papierprüfungen. Dargestellt sind Reisslänge und Dehnung, bemessen durch den Abstand der Nadeln von den Nulllinien, Widerstand gegen Zerknittern und Reiben, gemessen durch die Länge der Nadeln, und die Stoffzusammensetzung des Papiers, gegeben durch die Farben der Nadelköpfe. Ausgespannte Fäden geben die Grenzen für die verschiedenen Papierklassen an.

Die Gesetze, die nach Linien im Raum verlaufen, kann man auch durch verschieden gefärbte, entsprechend gebogene Drähte zur Darstellung bringen; auch farbige Fäden benutzte ich, namentlich zur Darstellung durchdringender Flächen, aber sie sind unpraktisch, wegen der Verstaubung, wegen leichten Schlawfwerdens beim Feuchtigkeitswechsel und aus anderen Gründen. Das Auftragen farbiger Linienzüge und Flächen auf hintereinander gestellte Glasplatten, ja sogar die Aufbiegung von Glasplatten nach der Oberfläche von Gypsmodellen ist für andere Zwecke von anderen Autoren versucht worden.

244. Die in Fig. 177 gezeichneten Schaulinien sind nun benutzt

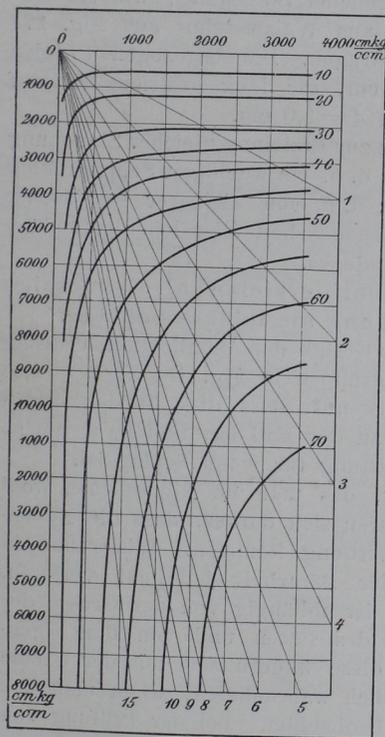


Fig. 184.

Walzmessing, $d = d = 1,5$ cm, Bär I.

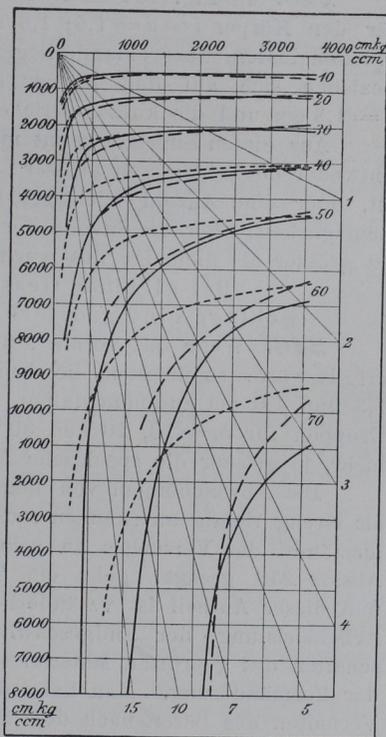


Fig. 185.

Walzmessing.

worden, um in den Fig. 184 bis 187 die Abhängigkeit der Stauchung von der für den einzelnen Schlag aufgewendeten Grösse der specifischen Schlagarbeit klarer darzustellen. Zu dem Zwecke sind Schnitte nach

den Ebenen für $\delta_s = 10, 20$ u. s. w. $\%$ durch den idealen Körper gelegt, der entsteht, wenn man sich die Schaulinien in Fig. 177 in den einzelnen Gruppen so hinter einander aufgestellt denkt, dass der Abstand der einzelnen Linien von der Nullebene [XY Fig. 180] proportional der spezifischen Schlagarbeit für den Schlag ist. Diese Schnitte würden also parallel zur YZ-Ebene, Fig. 180, liegen. Fig. 184 zeigt eine einzelne solche Schnittgruppe für die Körper $l = d = 1,5$ cm aus Walzmessing, die mit dem Bären I geschlagen wurden; sie giebt also die Linien gleicher Stauchung. Es ist aus dem ganzen Hergange beim Stauchversuch wohl klar, dass diese Linien hier nur gewissermassen als Hilfslinien auftreten können, denn da ja nicht Theile eines Schlages ausgeübt werden können, so können nur gewisse Punkte der Linienzüge der Wirklichkeit entsprechen, und diese liegen alle auf den mit 1 bis n bezeichneten Strahlen aus dem Punkte 0. Diese Strahlen geben die angewendete Schlagzahl an. Aus einem solchen Plan, wie er in Fig. 184 dargestellt ist, ist man nun im Stande, anzugeben, wieviel Schläge und welche Einheitsleistung für den Schlag anzuwenden sind, wenn bei dem vorliegenden Material eine bestimmte Stauchung erzielt werden soll.

245. In Fig. 185 sind die Linien gleicher Stauchung, wie sie sich für den Körper $l = d = 1,5; 1,3$ und $1,0$ aus Walzmessing aus Fig. 177 ableiten lassen, über einanderliegend eingetragen. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf den Körper $d = 1,5$ cm, die lang gestrichelten auf $d = 1,3$ cm und die kurz gestrichelten auf $d = 1,0$ cm.

Aus diesen Linien erkennt man, dass zur Erzielung gleicher Stauchung entweder ein Schlag von grosser Leistung, d. h. ein wuchtiger Schlag nöthig ist, oder eine Anzahl leichterer Schläge, d. h. von kleinerer spezifischer Schlagarbeit; aber die Summe der spezifischen Arbeit aller leichten Schläge ist grösser als diejenige des wuchtigen Schlages.

Bei gleicher Gesamtarbeit erzielen also wuchtige Schläge eine grössere Stauchung als leichte Schläge.

246. Wenn das vorhin aufgestellte Gesetz der Aehnlichkeiten streng erfüllt wäre, so müssten die drei Liniengruppen in Fig. 185 für $d = 1,5; 1,3$ und $1,0$ cm zusammenfallen. Man erkennt, dass dies in den ersten Gruppen für $\delta_s = 10, 20$ und 30% nahezu der Fall ist, und zwar um so mehr, je grösser die spezifische Arbeitsleistung für jeden Schlag ist.

Die Abweichungen von dem Gesetz, das man im Allgemeinen wohl als streng richtig anerkennen muss, erklären sich daraus, dass die Nebenstände des Versuches zu sehr zur Wirkung kommen. Wie schon in Absatz 236 gesagt, geht ein Theil der Bärarbeit jedesmal verloren, und dieser Antheil ist veränderlich. Er ist abhängig von der Grösse der Arbeitsleistung, der Endgeschwindigkeit des Bären und von den Eigenschaften des geprüften Materiales, und diese ändern sich mit der Grösse der Formänderung. Man kann das deutlich wahrnehmen, wenn man das Verhalten des Bären nach dem Schlage beobachtet. Bei der Prüfung von Blei bleibt der Bär nach dem Schlage fast ganz in Ruhe. Bei weichem Kupfer u. a. m. bleibt er anfangs in Ruhe, nach einigen Schlägen fängt er an zu tanzen. Das Blei bleibt weich und unelastisch; Kupfer wird härter und immer elastischer.

247. Das Gesetz der Aehnlichkeiten gilt für den ganzen Verlauf des Versuches; es kann daher auch bis zum Bruch der Probe ausgedehnt werden

(L 100). Man kann also sagen, dass bei gleichem Material unter ähnlichen Umständen an ähnlichen Körpern der Bruch durch die gleiche Summe von spezifischer Schlagarbeit herbeigeführt wird. Deswegen kann diese Summe von spezifischer Schlagarbeit, die zur Zerstörung des Körpers gerade ausreicht, auch als ein Maassstab für die Güte des Materiales gelten. Nennt man nach Kick (L 100) diejenige spezifische Arbeit, die den Bruch der Probe durch einen einzigen Schlag gerade herbeiführt, den Bruchfaktor des Materiales, so ist zu sagen, dass er für das Material und die gegebene Probenform eine Konstante ist, die das Material charakterisirt. Für diejenigen Materialien, die beim Stauchversuch nicht zu Bruche gehen, setzt man an Stelle des Bruchfaktors am besten diejenige spezifische Schlagarbeit ein, die den Körper um ein bestimmtes Maass, z. B. $-\varepsilon_s = 0,80$ zusammenstaucht. Ich möchte vorschlagen, diesen Begriff mit dem Namen Stauchfaktor zu belegen, aber in diesem Ausdruck der Einfachheit wegen den Bruchfaktor einzubegreifen. Dann ist also der Stauchfaktor diejenige spezifische Schlagarbeit in cmkg/ccm , die aufgewendet werden muss, um einen Körper bestimmter Grundform [Kugel, Würfel, Normalcylinder u. s. w.] durch einen einzigen Schlag gerade zum Bruch, oder auf $-\varepsilon_s = 0,80$ zu bringen.

Auch die Art und Form des Bruches ist dem Gesetz der Aehnlichkeiten unterworfen (L 100), wie aus Früherem vielleicht schon erkannt ist und aus Späterem sich bestätigen wird.

γ. Einfluss der Probenform.

248. Stauchversuche wird man ausschliesslich wohl für die Zwecke der Materialprüfung anwenden; selten wird die Aufgabe herantreten, den Stauchversuch zur Prüfung des Widerstandes eines Konstruktionsgliedes zu verwenden. Letzteres ist in der Charlottenburger Anstalt (L 155) bislang erst einmal vorgekommen, als es sich um Feststellung der Schlagarbeit handelte, welche zum Eintreiben eiserner Rohre als Spundwand angewendet werden konnte, ohne die Rohre zu beschädigen.

Bei den Versuchen zur Materialprüfung hat man selten einen Grund, andere als ganz einfache prismatische Körper zu benutzen, und zwar wird man in der Regel auf Würfel oder Cylinder von der Länge $l = d$ zurückgreifen, oder wenn ebenso wie bei den Druckversuchen verfahren werden soll, auf Cylinder von der Länge $l = \sqrt{f} = 0,886 d$. Die ersten beiden Formen seien auch hier als Normalkörper, die letzte als Proportionalkörper bezeichnet.

Auch die Untersuchung von röhrenförmigen prismatischen Körpern kann zuweilen geboten sein; sie hat in der Charlottenburger Anstalt z. B. bei Prüfung und Vergleichung von Mannesmann-Röhren mit anderen Fabrikaten recht gute Dienste geleistet.

249. Wenn nun im Allgemeinen auch die drei vorbeschriebenen Probenformen zu benutzen sein werden, so wird man sich doch davon überzeugen müssen, welchen Einfluss Abweichungen von diesen Formen auf das Ergebniss des Stauchversuches ausüben werden. Praktisch kommen hier in erster Linie etwaige Fehler im Längenverhältniss der cylindrischen Probekörper in Betracht.

Um diesen Einfluss festzustellen, führte ich einige Versuchsreihen mit Cylindern aus Kupfer und Walzmessing aus, bei denen bei gleichbleibendem

Durchmesser von 1,5 cm verschiedene Längen von 2,5 bis zu 0,2 cm benutzt wurden. Alle Körper sind dann mit gleicher Schlagarbeit, d. h. bei gleichbleibender Fallhöhe des Bären geprüft; sie wurden also entsprechend dem wechselnden Rauminhalt, mit verschiedenen spezifischen Schlagarbeiten für den Schlag gestaucht. Die Ergebnisse sind in den Figuren 186 für Kupfer und 187 für Messing u. s. w. dargestellt.¹⁾ In die Figur sind jedesmal, ausser den Linien gleicher Stauchung für Körper verschiedener Länge [ausgezogene Linien] auch die Linien gleicher Stauchung [gestrichelte Linien] für Normalkörper aus gleichem Metall eingetragen, die bei verschiedener

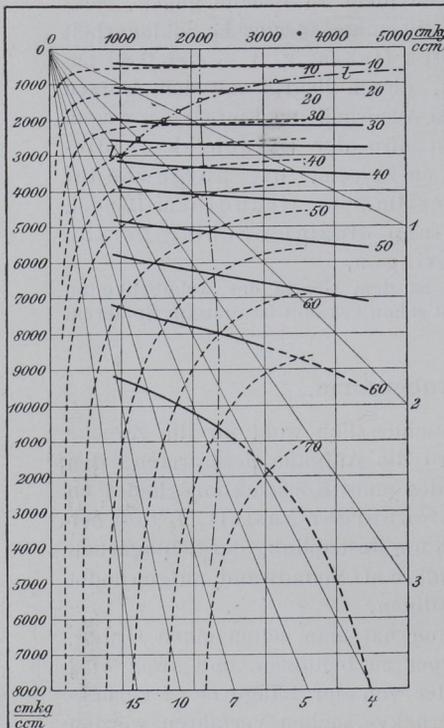


Fig. 186.
Stangenkupfer.

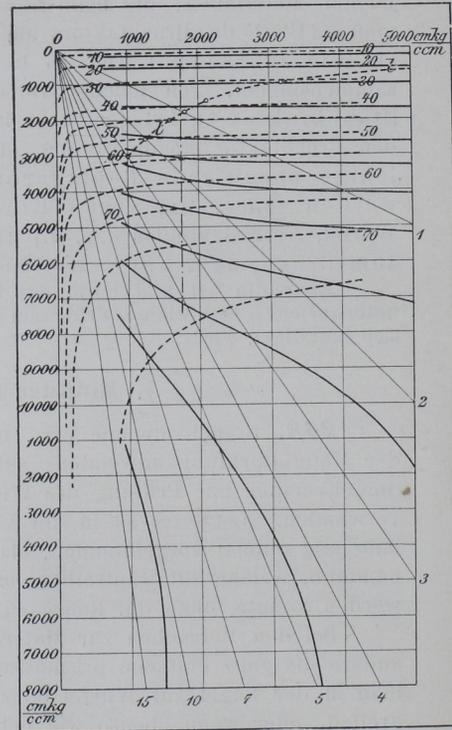


Fig. 187.
Walzmessing.

Staucharbeit gewonnen wurden. Die beiden, die Gesetze der Formänderung darstellenden, durch die ausgezogene und durch die gestrichelte Linienschaar gedachten gekrümmten Flächen müssen einander durchdringen, und die Spur beider Flächen ist in den Figuren 186 und 187 durch die feinen strichpunktirten Linien angedeutet; sie sollten in den beiden durch eine Figur dargestellten Versuchsreihen dem Normalkörper $d=l=1,5$ entsprechen, was mit hinreichender Annäherung der Fall ist, wenn man bedenkt, dass die Probekörper für die in Vergleich gestellten Metalle nicht aus den gleichen Stangen entnommen wurden. Ausser der Spur müssen die beiden idealen krummen Flächen jeder Figur aber auch noch die beiden

¹⁾ Nähere Angaben und die Zahlenwerthe findet man in der Quelle (*L 155*).

Grade in den Nulllinien [Linien *Y* und *Z* Fig. 180, S. 173] gemein haben. Denn für jeden Körper und jedes Material gilt, dass kein Schlag von beliebig grosser Einheitsleistung, oder beliebig viele Schläge von der Einheitsleistung Null, keine Formänderung am Probekörper hervorrufen können. Die durch die Linienzüge *l* verbundenen Kreise geben die angewendeten Probenlängen *l* an.

Aus den beiden Liniengruppen in den Fig. 186 und 187 sieht man, dass geringe Abweichungen in der vorgeschriebenen Länge $l=d$ bei den ersten Schlägen, d. h. bei geringen Stauchungsgraden sich weniger bemerkbar machen als bei stärkeren Stauchungen.

δ. Einfluss der Endflächen.

250. Da die Formänderung bei Stauchversuchen eine ganz ähnliche ist wie bei Druckversuchen, so ist einleuchtend, dass auch der Einfluss der Endflächen von ähnlicher Art sein muss wie bei den Druckversuchen. Um einigen Aufschluss über den Grad dieses Einflusses zu erlangen, habe ich Versuche mit Normalkörpern angestellt, bei denen die Endflächen rau gemacht, glatt bearbeitet oder eingölt waren. Der Einfluss der Reibung ging aus diesen Versuchen unverkennbar hervor, denn die Stauchung war bei den eingefetteten Körpern grösser als bei den Körpern mit rauher Endfläche.

Die Zahlenwerthe (*L* 155, S. 26) dieser wenigen Versuche gebe ich hier nicht an, weil sie des weiteren Ausbaues bedürfen.

ε. Messung der elastischen Stauchung.

251. Da es von Interesse ist, auch kennen zu lernen, wie gross die elastische Formänderung beim Stauchen ist, so wurde zunächst an Würfeln aus Gusseisen der Versuch gemacht, die bleibenden und elastischen Formänderungen festzustellen (*L* 155, S. 29). Auch diese Versuche bedürfen noch der Erweiterung. Ich will mich hier daher darauf beschränken, das Verfahren zu besprechen.

Wie früher schon angedeutet (246) zeigt sich Blei bei den Schlagversuchen als ausserordentlich wenig elastisch; ganz unelastisch ist es nicht, weil Bleikörper von geeigneter Form, z. B. Stimmgabeln, einen, wenn auch sehr gedämpften Ton geben.

Hat man an dem Körper, den man auf sein elastisches Verhalten prüfen will, einen Bleidraht befestigt, so dass seine Endflächen in gleicher Ebene mit den Endflächen des Körpers liegen, und führt nun den Versuch aus, so wird der elastische Körper beim Schlag eine grössere Stauchung erfahren, als man nach dem Versuch durch Ausmessen der Länge l_1 erkennen kann; er dehnte sich vermöge seiner Elasticität wieder aus, während der Bleidraht die unter dem Schläge angenommene Länge beibehält. Der Unterschied zwischen den Längen beider Körper giebt also die elastische Formänderung des Probekörpers an.

252. Ich will noch kurz hinzufügen, dass man auch ein angenähertes Maass für die elastische Formänderungsarbeit gewinnen kann, welche das Probestück und das Material des Schlagapparates bei jedem Schläge aufnehmen, also den Betrag, welcher jedesmal für die Erzielung der bleibenden

Formänderung am Probestück verloren geht. Diese Bestimmung kann geschehen, indem man die Höhe misst, um welche der Bär nach dem Schlage wieder aufgeworfen wird. Dass diese Arbeit nicht allein vom Probekörper geliefert wird, kann man leicht nachweisen, wenn man zwei gleiche Körper prüft, von denen man den einen jedesmal allen Schlägen des Bären aussetzt, die er beim Tanzen [Prellen] nach dem Schlage ausübt, während man den anderen sofort nach dem ersten Auftreffen des Bären mit Hülfe eines um den Körper geschlungenen Fadens herauszieht. Der erste Körper wird eine stärkere Stauchung erfahren als der zweite, ein Beweis dafür, dass die Arbeit des Bären, die er beim Zurückfallen aus der Aufwurfhöhe wiedergewinnt, immer noch ausreichend ist, um eine bleibende Formänderung zu erzielen. Dies könnte natürlich nicht der Fall sein, wenn der Bär nur durch die Elasticität des Probekörpers aufgeworfen würde.

ζ. Brucherscheinungen.

253. Die dehnbaren Metalle nehmen bei den Stauchversuchen mit Normalkörpern eine tonnenförmige Gestalt an, und wie beim Druckversuch erfolgt der Bruch in der Regel unter den folgenden Erscheinungen Fig. 188 [vergl. auch 125 und 127].

Bei manchen Materialien wird die Oberfläche nach den ersten Schlägen

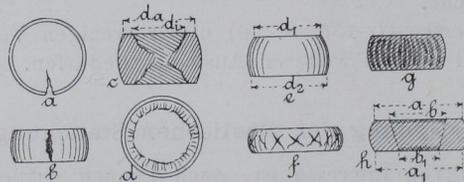


Fig. 188.

„krispelig“ (106, S. 67). In der matten Oberfläche lassen sich bei unhomogenem, gewalztem oder gezogenem Material wenn die Bearbeitungsrichtung parallel zur Probenaxe liegt, scharf begrenzte Streifen unterscheiden, welche den Längsnähten bei Zerreissversuchen (124, S. 81) entsprechen; sie verrathen, dass härtere und weichere, zuweilen auch porösere Stellen im Material vorhanden sind. Bei manchen Legierungen, z. B. unreinem Blei, bedeckt sich die Mantelfläche mit Runzeln von mehr oder minder Ausdehnung, so dass der Körper oft ein ganz unregelmässiges Aussehen erhält. Bei solchem Aussehen war meistens nachzuweisen, dass keine vollständige Legierung stattgefunden hatte.

Die Brucherscheinungen fallen, je nach den Materialeigenschaften, verschieden aus. Bei sehnigem Material pflegen sich eine oder mehrere Risse zu bilden, wie Fig. 188 *a* und *b* zeigen. Bei körnigem sprödem Material, z. B. Gusseisen, aber oft auch bei gewalztem Material, bilden sich an den Schlagflächen Materialkegel, welche den Ring herauschieben und vielfach zum Bruch bringen (vergl. Fig. 188 *c*). Bei vielen Körpern aus gleichmässig zähem Material zeigen sich auf der Mantelfläche diagonale Risse, die sich unter 45° zur Axe des Körpers kreuzen (Fig. 188 *f*). Die Andeutungen zu diesen Rissen erkennt man häufig schon ziemlich frühzeitig, indem sich auf der Mantelfläche lange vor dem Bruch eine ganz schwache diagonale

Furchung bildet. Diagonalrisse traten namentlich bei einem sehr zähen Geschützstahl auf. Von diesem Stahl wurde ein Körper, Fig. 188 *g*, der die Diagonalrisse noch nicht zeigte, mitten durchgesägt, polirt und geätzt; im reflektirten Licht erkannte man die in *g* angedeuteten, in Wirklichkeit allerdings schwer sichtbaren Streifungen, welche auf eine regelmässige zwiebelschalenförmige Lagerung im Material schliessen lassen.

254. Wenn man einen gestauchten Körper betrachtet, so fällt auf den Schlagflächen die Bildung einer Randzone auf, welche sich ziemlich scharf von der mittleren Kreiszone unterscheidet (Fig. 188 *d* und *c*). Die Kreiszone entspricht der ursprünglichen Endfläche (Durchmesser d_i) des Probekörpers; die radial gestreifte Randzone (äusserer Durchmesser d_a) dürfte hingegen Materialtheilchen enthalten, welche der ursprünglichen Mantelfläche angehört.

Die voraufgehend beschriebenen Erscheinungen treten, wie gesagt, fast alle auch bei Druckversuchen auf. Bei Druckversuchen kommt die in Fig. 188 *e* dargestellte Erscheinung jedenfalls nicht so deutlich ausgeprägt vor, dass die Endflächen einen deutlichen Unterschied ihrer Durchmesser d_1 und d_2 besitzen.

255. Die Art der Zerstörungserscheinungen ist auch von der Form der Probekörper abhängig.

So bei Versuchen mit Rohrenden aus ziemlich hartem Stahl, die senkrecht zur Rohraxe so abgeschnitten waren, dass ihre Höhe gleich dem äusseren Durchmesser bleibt. Der Verlauf der Formänderungen war für die verschiedenen Abmessungsverhältnisse ganz charakteristisch unterschieden, er trat in ganz gleicher Weise ein bei Stauchversuchen und bei Druckversuchen, so dass einer bestimmten Höhenänderung für gleiche Körper immer nahezu die gleiche Form entsprach. Trotz seiner verhältnissmässig grossen Festigkeit, welche zum Theil von geringer Dehnbarkeit begleitet war, vertrug das Material die in Fig. 189 abgebildeten Formänderungen fast ganz anstandslos; nur wenige Proben bekamen bei den letzten Formen Risse.

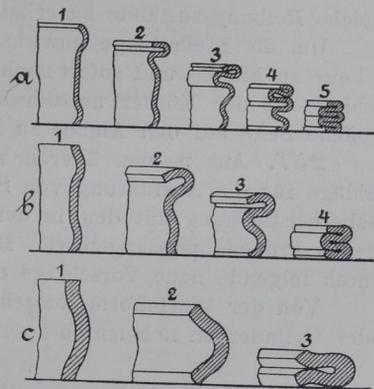


Fig. 189.

In Fig. 189 sind die drei beobachteten charakteristischen Formen für Rohrabchnitte verschiedener Wandstücke angegeben. Die zugehörigen Beobachtungsergebnisse findet man in übersichtlicher Weise in der Quelle (*L 155* S. 40 u. f.) zusammengestellt. Aus letzteren ergab sich, dass auch bei diesen Prüfungen, die an nahezu geometrisch ähnlichen Körpern angestellten Versuche die besondere Form des Gesetzes der Aehnlichkeiten bestätigten, nämlich:

Geometrisch ähnliche Körper gleichen Materiales erfahren durch die gleiche Summe gleicher spezifischer Schlagarbeiten für den Schlag, geometrisch ähnliche Formänderungen (Fig. 189 *a—c*) und gleiche Stauchungen δ_s .
Die Proben, bei denen die Forderungen des Gesetzes der Aehnlich-

keiten einigermaßen erfüllt waren, zeigten ganz gut zusammenfallende Schaulinien. Das Verhältniss l zu w [Länge des Rohrabchnittes zur Wandstärke] scheint den allgemeinen Verlauf der Schaulinie und der Formänderung¹⁾ nach der Fig. $a-c$ zu bedingen.

η. Versuchsausführung.

256. Vor Beginn der Versuche ist das Fallwerk zu prüfen und zwar zunächst auf den Reibungswiderstand der Bärführungen nach Satz 20 Absatz 226. Dann ist zu untersuchen, ob Bärmitte und Ambosmitte in der gleichen Senkrechten liegen und ob die beiden Schlagflächen parallel zu einander sind, ferner ob beide Schlagflächen eben sind. Diese drei Prüfungen kann man leicht gemeinsam ausführen, wenn man mit einem Schlag einen hinreichend grossen Bleikörper staucht, so dass beide Schlagflächen sich vollständig abdrücken. Man stellt an dem geschlagenen Körper aus den Abdrücken fest, ob die Mittelpunkte beider Flächen über einander liegen, und durch Ausmessung der Dicke an vier am Umfang gelegenen Stellen und in der Scheibenmitte, ob die Scheibe durch parallele, ebene Flächen begrenzt ist. Die Schlagflächen am Ambos und Bären müssen öfter nachgeschliffen werden, daher diese Körper so konstruiert sein, dass diese Arbeit leicht und genau ausgeführt werden kann.

Die Schlagflächen und die Bärführungen sind vor den Versuchen mit einem mit Graphit bestaubten Lappen abzureiben, um immer möglichst gleiche Reibungszustände zu erhalten.

Um die Prellschläge unwirksam zu machen, sind die Körper an eine Schnur zu binden und sofort nach dem Schläge herauszuziehen; nach jedem Schläge ist der Körper umzudrehen, so dass die vorher vom Bären getroffene Seite auf den Ambos zu liegen kommt.

257. Aus meinen älteren Versuchen (*L 155*) leitete ich einige Vorschläge für die Ausführung von Stauchversuchen ab, die ich aber hier in Uebereinstimmung mit den in der Charlottenburger Anstalt angenommenen Probenabmessungen für Druck- und Stauchversuche mit Metallen durch folgende neue Vorschläge ersetzen möchte.

Von der Würfelform ausgehend, schlage ich vor, entweder Würfel oder Cylinder zu nehmen, bei denen

$$n = l\sqrt{f} = 1$$

ist und für den Fall, dass man die Normalform der Cylinder, d. h.

$$d = l$$

beibehalten will, diesen Cylindern den gleichen Körperinhalt, wie den in der nachfolgenden Tabelle 22 aufgeführten Würfeln, zu geben. Alsdann lassen sich bei Ausführung vieler Versuche manche Vereinfachungen in Versuchsausführung und Rechnung anbringen.

258. Die Stauchversuche sollen zur Feststellung des Stauchfaktors (247) dienen. Dementsprechend sucht man durch eine Reihe von Versuchen mit schwachen Schlägen die Summe der spezifischen Schlagarbeit auf, die den Bruch oder $-\epsilon_s = 0,80$ erzeugt. Man geht dann zu schwereren Schlägen über und wird jetzt eine geringere Schlagarbeit aufzuwenden

¹⁾ Neuerdings macht man von den Faltungsvorgängen bei der Formänderung von Rohren für die Flanschenbildung Gebrauch, indem man den Flansch nach Fig. 189c₃ bildet.

Tabelle 22. Abmessungen der Probekörper für den Stauchversuch. (Abmessungen in cm.)

Körperinhalte in ccm	1,000	3,375	8,000	15,625	27,000	64,000	125,000
Würfelkante <i>l</i>	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
Proportional- cylinder	<i>l</i>	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00
	<i>d</i>	1,13	1,69	2,26	2,82	3,39	4,51
Normalcylinder <i>l=d</i>	1,08	1,62	2,17	2,71	3,25	4,34	5,42

haben, bis man endlich durch einen einzigen Schlag das Ziel erreicht. Zu einer vollständigen Prüfung ist also immer die Ausführung mehrerer Versuche nothwendig, die man nun so einrichten wird, dass man den Charakter des Materials ausgiebig kennen lernt und zugleich die Arbeit möglichst abkürzt.

Nach meinem älteren Vorschlage sollten die Schläge so bemessen werden, dass von fünf zu prüfenden Körpern gleicher Form der erste mit 1*a*, der zweite mit 2*a*, der dritte mit 4*a* cmkg/ccm für jeden Schlag beansprucht wird. Als zweckmässige Wahl für die Zahlenwerthe von *a* wurde angegeben für:

1. Stahl zwischen 5000 und 8000 at Festigkeit *a* = 1000 cmkg/ccm,
2. schmiedbares Eisen, Gusseisen, Kupfer und Legirungen mittlerer Härte *a* = 250 "
3. Weichmetalle *a* = 25 "

Die beiden übrigen Körper sollten dann auf Grund der bei den drei vorausgehenden Versuchsreihen gewonnenen Erfahrungen mit je einem Schläge geprüft werden, so dass der Stauchfaktor gerade erreicht wird.

259. Die Versuchsausführung nach diesem Plane erfordert aber eine grosse Zahl von Schlägen. Zur Abkürzung des Verfahrens schlug deswegen Kirsch eine andere Auswahl für die jedesmal aufzuwendenden Schlagarbeiten vor, und zwar sollte, unter Zugrundelegung der oben angegebenen Werthe von *a* und wenn *Z*₁, *Z*₂ und *Z*₃ die Nummer des Schlages in den Reihen 1, 2 und 3 bedeutet,

Körper 1 mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag geprüft werden, so dass die specifische Schlagarbeit für den Schlag sich ergibt aus *Z*₁*a* cmkg/ccm.

Körper 2, ausgehend von der specifischen Schlagarbeit *Z*₁*a* für den letzten Schlag der Reihe 1, mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag nach der Vorschrift:

$$Z_1 a + (Z_2 - 1) a.$$

Körper 3, ausgehend von der specifischen Schlagarbeit für den letzten Schlag der Reihe 2, mit wachsender Schlagarbeit für jeden Schlag nach der Vorschrift:

$$(Z_1 a + [Z_2 - 1] a) + (Z_3 - 1) a$$

geprüft werden u. s. w.,

bis Bruch oder $\epsilon_s = 0,80$ durch einen Schlag erzielt wird.

Bei diesem Verfahren wird zwar eine Verminderung der Gesamt-schlagzahl erzielt, aber man kommt nicht mehr mit fünf Körpern aus,

wenn man sich streng an die Vorschriften hält. Deswegen suchte ich beide Verfahren zu kombinieren und schlug für die Verhandlungen der Züricher Konferenz zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren folgende andere Maassnahmen vor, nämlich zu prüfen:

Vorschrift a.	Vorschrift b.
Körper 1 nach $Z_1 a$	oder $Z_1 a$.
Körper 2 nach $Z_2 2a$	oder $0,5 \sum Z_1 a + (Z_2 - 1) a$ ($0,5 \sum Z_1 a$ aus der ersten Reihe).
Körper 3 nach $Z_3 4a$	oder 1 Schlag zur Erzeugung von Bruch oder $-\epsilon_s = 0,8$ (nach Schätzung von $Z_3 a$ aus Reihe 2).
Körper 4 und 5	1 Schlag zur Erzeugung von Bruch oder $-\epsilon_s = 0,8$, nach Schätzung aus den voraufgehenden Reihen.

Um die genannten vier Vorschläge zu erproben, liess ich nach allen eine Anzahl von Versuchen an Körpern gleicher Abmessung aus verschie-

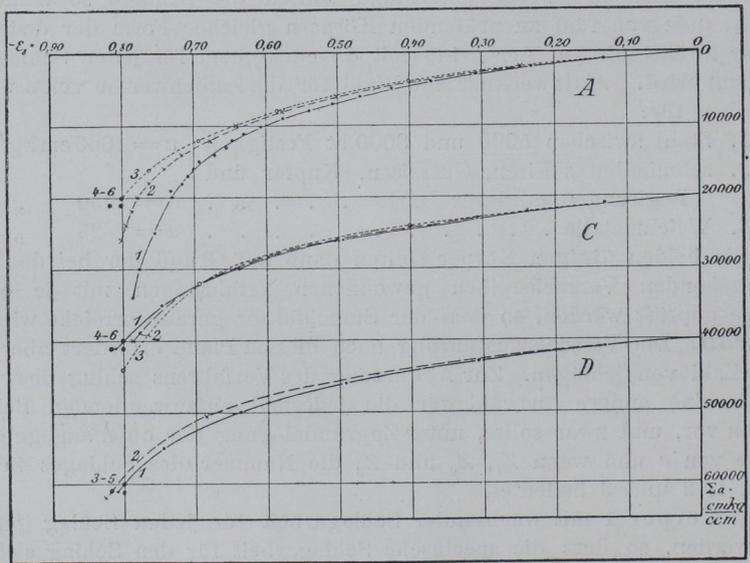


Fig. 190.

denen Materialien durchführen und fand hierbei unter Anderem die in Fig. 190 und Tab. 23 dargestellten Ergebnisse.

Hiernach empfehle ich für die Stauchversuche in Zukunft das Verfahren unter C oder D anzuwenden und ergänze meine alten Vorschläge über die Wahl von a :

1. für Weichmetalle (Blei u. s. w.) $a = 25$ cm kg/cm.
 2. für Gusseisen $a = 250$ „
 3. für Kupfer, Bronzen, weiche Legierungen $a = 500$ „
 4. für Eisen und festere Metalle $a = 1000$ „
- Muss in besonderen Fällen a grösser als 1000 cm kg/cm gewählt

Tabelle 23.

Vergleichung von 4 Vorschlägen für die Ausführung von Stauchversuchen.

Es bedeutet: Z die Nummer des Schläges; Σa die Summe der spezifischen Schlagleistungen aller Schläge in cmkg/cem .

Körper No.	Nach dem Vorschlage von NN wird $a =$			
	Martens (ursprünglich) A	Kirsch B	Martens-Kirsch, vereinigt	
			C	D
1	$1a$	$Z_1 a$	$Z_1 a$	$Z_1 a$
2	$2a$	$Z_1 a + (Z_2 - 1)a$	$Z_2 2a$	$0,5 \Sigma Z_1 a + (Z_2 - 1)a$
3	$4a$	$(Z_1 a + (Z_2 - 1)a) + (Z_3 - 1)a$	$Z_3 4a$	1 Schlag
4	1 Schlag	u. s. f.	1 Schlag	1 Schlag
5	1 Schlag		1 Schlag	1 Schlag

Die Versuchsreihen werden durchgeführt bis Bruch (Rissbildung oder andere Zerstörungserscheinungen) eintritt, oder bis $-\varepsilon_s = 0,80$.

Vergleichende Versuche ergaben:

a) allgemein:	Die Schlagzahl für die ganze Prüfung ist reichlich gross	Bei strenger Durchführung wird die Zahl der erforderlichen Probekörper gross	Beide Verfahren kürzen ganz wesentlich ab und können mit 5 Probekörpern sicher durchgeführt werden.	
b) Prüfungen von Flusseisen: $\sigma_B = 5400$ at an $l = d = 1,30$ cm u. $a = 1000 \frac{\text{cmkg}}{\text{cem}}$ ergaben:	Erforderliche Schlagzahl für die ganze Prüfung 55 Schläge	Wurde nicht festgestellt	Erforderliche Schlagzahl für die ganze Prüfung 15 Schläge 11 Schläge	

werden, so empfiehlt es sich, ein Vielfaches von $500 \text{ cm kg}/\text{cem}$ anzuwenden.¹⁾

Stauchversuche mit anderen Materialien als Metallen sind bisher wenig ausgeführt, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass sie zu werthvollen Aufschlüssen führen würden, z. B. bei Gesteinen (*L 156*, S. 50), Bindemitteln, Mörteln u. s. w. Für diese Art von Versuchen lassen sich daher bestimmte Ausführungsvorschläge noch nicht machen.

¹⁾ Man hat in Zürich (Konferenz 1895) bemängelt, dass keine bestimmten Vorschriften für die Faktoren \S und G gemacht worden sind. Damit wäre die Sache unnötig erschwert worden. Diese Vorschriften erscheinen auch unnötig, weil man die Stauchversuche mit so kleinen Körpern, wie sie hier vorausgesetzt sind, schwerlich auf einem grossen Fallwerk ausführen würde, weil ausserdem die Fallhöhe \S wegen der Gebäudehöhen fast immer ein engbegrenzter Werth ist.

4. ZerreiBversuch.

260. ZerreiBversuche mit dem Fallwerke sind meines Wissens zuerst von dem österreichischen General Uchatius zur Erprobung von Materialien angewendet. Sie sind im Allgemeinen sehr wenig üblich und werden in der Praxis bisher wohl nur zum Probiren von Schraubenbolzen zur Befestigung der Panzerplatten am Schiffskörper regelmässig benutzt. Dass die Wissenschaft sich ihrer besonders warm annehmen wird, ist auch nicht recht zu erwarten, weil es ausserordentlich schwer sein wird, ein Fallwerk für ZerreiBversuche so zu konstruiren, dass der Theil der Arbeitsleistung, der wirklich an das Probestück abgegeben wird, sich einigermaßen klar übersehen lässt. Man kann den Schlag nicht unmittelbar auf das Probestück wirken lassen, braucht vielmehr Zwischenkonstruktionen, die einerseits das Probestück mit dem Ambos fest verbinden und die andererseits den Schlag des Bären aufnehmen und auf das Probestück übertragen. Ich will daher an dieser Stelle nochmals kurz auf den Abs. 230 und 232 verweisen und auf die Arbeiten der Versuchsanstalt zu Charlottenburg über Schlagversuche mit Drahtseilen und Drahtseilverbindungen aufmerksam machen, die in den „Mitth. Berlin“ (*L 153*) veröffentlicht sind.

261. Die Charlottenburger Anstalt hat mehrfach Gelegenheit

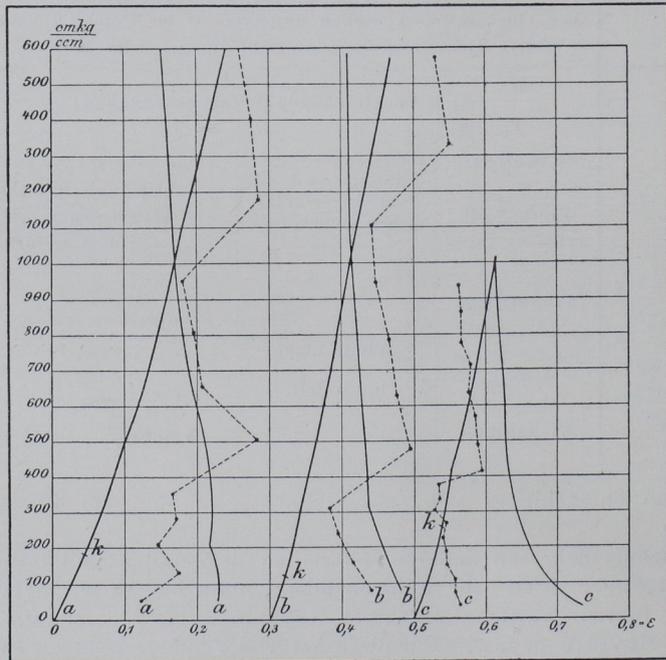


Fig. 191.

gehabt, FallzerreiBversuche mit Normalrundstäben (2,0 cm Durchmesser $l = 11,3 \sqrt{f}$) aus Flusseisen und Bronzen auszuführen. Einzelne Versuchsreihen wurden benutzt, um in Fig. 191 und 192 zu zeigen, wie man etwa die Schaulinien für einen FallzerreiBversuch nach den früher (252) entwickelten Grundsätzen aufzutragen hat.

In Fig. 191 sind drei Versuchsreihen *a*, *b* und *c* aufgetragen, die mit Aluminiumbronzen von verschiedener Zusammensetzung gewonnen wurden, während Fig. 192 die Schaubilder für Flusseisen [Linien *d*] und die Linien *a* bis *c* für die Bronzen in anderem Maassstabe enthält. Die Auftragungen geschahen derart, dass in den stark ausgezogenen Linien die Summe der specifischen Schlagarbeiten *a* in cmkg/ccm^1 , die das Material aufgenommen hat, als Ordinaten und die hierdurch erzielten Dehnungen ϵ der Längeneinheit als Abscissen aufgetragen wurden [also nach den Richtungen *X* bez. *Y*, Fig. 180, S. 173]. Die feinen gestrichelten, mit gleichen Buchstaben versehenen Linien stellen die für jeden Schlag erzielten ϵ in zehnfachem Maassstabe dar. Aus ihnen geht hervor, dass die Prüfung der Bronzen in drei bez. zwei Stufen mit verschiedenen specifischen Schlagarbeiten für den Schlag erfolgte; man erkennt leicht, dass innerhalb der Gruppen die Wirkung der folgenden Schläge abnimmt; die $\Delta\epsilon$ werden kleiner, gerade so wie bei den Stauchversuchen.

Die charakteristischen Unterschiede im Material können, ähnlich wie früher (34, S. 18) bei den ZerreiBversuchen durch die Dehnungszahl α , so auch hier durch die Dehnung α_s gekennzeichnet werden, die durch die Arbeitseinheit erzielt wird; nur muss man hierbei immer im Auge behalten, dass diese Werthe [wie ja aus den Linien für $\Delta\epsilon$ einleuchten muss] von den Umständen, unter denen der Versuch ausgeführt wurde, abhängig sind. In Fig. 191 und 192 sind die betreffenden Werthe als fein ausgezogene Linien eingetragen. Die aus den Figuren für diese Werthe entnommenen Ablesungen sind mit 10^{-3} zu multipliciren, d. h. der Werth 0,1 bedeutet $\alpha_s = \epsilon/\alpha = 0,0001$.

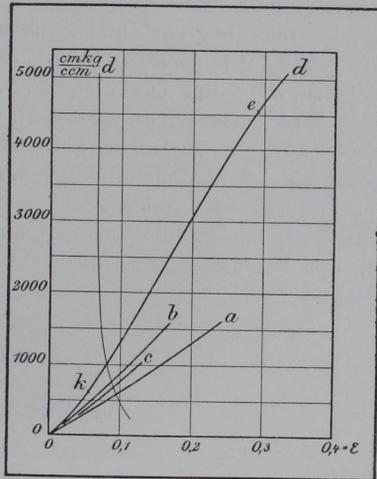


Fig. 192.

262. In Absatz 261 wurde bereits angedeutet, dass bei den FallzerreiBversuchen in verstärktem Maassstabe die Nebenumstände, unter denen der Versuch ausgeführt wird, zur Wirkung kommen. Will man daher vergleichbare Versuchsergebnisse erzielen, so wird es immer am zweckmässigsten sein, mit ganz gleichen Apparaten, mit gleichen Stabformen und Abmessungen sowie unter den gleichen Versuchsbedingungen zu arbeiten, denn es würde sehr umständlich und theuer werden, wenn man die Gesetze für die einzelnen Einfüsse in gleicher Weise studiren wollte, wie es für den Stauchversuch geschehen ist. Man wird aber aus dem hier Gesagten den Schluss ziehen müssen, dass es beispielsweise nicht genügt, in den Vorschriften für die Prüfung von Panzerbolzen lediglich Bestimmungen über Probenform und Versuchsausführung zu treffen, man muss vielmehr auch Vorschriften über alle Theile des Fallwerkes machen,

¹⁾ Der Inhalt des Probestabes ist hier nur für den cylindrischen Stabtheil berechnet worden; in Wirklichkeit nimmt aber auch ein Theil der kegelförmigen Uebergänge an der Formänderung theil.

wenn man die verschiedenen Lieferanten gleich behandeln will, und die Lieferanten werden gut thun, bei etwaigen Kontrollversuchen an anderen Orten sich davon zu überzeugen, dass sie bei diesen Versuchen nicht benachtheiligt sind.

263. Nach den bisher in der Charlottenburger Anstalt ausgeführten Fallzerreissversuchen habe ich die Ueberzeugung gewonnen, dass die Formänderungen beim Fallzerreissversuch genau so verlaufen, wie beim Zerreibversuch unter ruhiger Last. Ja, scheinbar ist die Formänderungsfähigkeit gewisser Materialien, z. B. des Flusseisens, auch beim Zerreiben durch einen einzigen Stoss nicht beeinflusst; beim Zerreiben durch mehrere Stösse fand man die Dehnung oft grösser als beim Zugversuch. Diese Beobachtung lässt sich aber nicht auf alle Materialien übertragen. In den Fig. 191 und 192 bedeutet das Zeichen *k*: „der Stab wird krispelig“ und *e*: „der Stab beginnt einzuschnüren“.

264. Die Brucherscheinungen beim Fallzerreissversuch sind die gleichen wie beim Zugversuch unter ruhiger wirkender Belastung.

265. Als Gütemaassstab beim Schlagzerreissversuch kann entweder die Summe der Schlagarbeiten einer Anzahl Schläge von bestimmter spezifischer Schlagleistung genommen werden, die den Bruch der Probe herbeiführt, oder man sucht noch zweckmässiger den Bruchfaktor für Zerreiben unter Schlagwirkung auf, d. h. diejenige spezifische Schlagarbeit, die den Probestab mit einem einzigen Schläge gerade noch zum Bruch bringt.

5. Biegeversuch.

a. Versuchsausführung.

Allgemein.

266. Der Biegeversuch unter dem Fallwerk ist eins der ältesten Versuchsverfahren. Er wird meistens so ausgeführt, dass man den Probekörper über zwei Stützen legt und den Bären in der Mitte zwischen beiden Stützpunkten auftreffen lässt. Die zur Erzeugung des Bruches oder einer bestimmten Durchbiegung erforderliche Schlagzahl *z* oder die hierzu erforderliche Schlagarbeit $zA = z h G$ in cm kg wird gemessen.

Die Art der Formänderungsmessung richtet sich nach der Art und Form der Probe. An balkenförmigen Körpern stellt man die Durchbiegung δ in der Mitte fest. Hierbei werden in der Praxis mehrere Messverfahren befolgt, die von einander abweichende Ergebnisse liefern.

267. In der Charlottenburger Versuchsanstalt wird in Uebereinstimmung mit dem in vielen öffentlichen Anstalten benutzten Bauschingersehen Messverfahren für Biegeversuche (180 S. 131) die Messung an drei Punkten *a a₁ a* Fig. 193 ausgeführt, von denen *aa* vor dem Versuch in einer Entfernung gleich der Stützweite und *a₁* in der Mitte dazwischen, in die Linie der Staboberfläche eingeschlagen werden, die der neutralen Faserschicht des Stabes entspricht. Man misst mit einem stangenzirkelartigen Dreispitzzirkel die Länge *l₁* der Sehne *aa* und die Entfernung δ_1 des Punktes *a₁* von der Sehne *aa*.

268. Den theoretischen Entwicklungen der Festigkeitslehre würde es mehr entsprechen, wollte man das zweite Messverfahren benutzen und

die gleiche Messung von den Punkten cc über den Auflagern aus vornehmen, so dass also die Sehnenlänge stets $cc=l$ bliebe und die Entfernung δ des Punktes a_1 von der Sehne cc gemessen würde.

Da in der That aber die Auflagern nicht mit scharfen Kanten ausgeführt werden dürfen, weil sie sonst sehr schnell zerstört werden oder das Probestück beschädigen würden, so wird bei Biegung der Probe die Stützweite thatsächlich immer verkleinert und zwar um so stärker, je grösser die Abrundung des Auflagers ist, wie aus Fig. 194 hervorgeht. Also auch dieses zweite Messverfahren würde keine der theoretischen Anschauungsweise streng entsprechenden Ergebnisse liefern. Ausserdem verliert die Messung der Durchbiegung für den Konstrukteur praktisch an Werth, je mehr die bleibende Formänderung Geltung bekommt.

Für die Materialbeurtheilung, die immer nur eine vergleichende

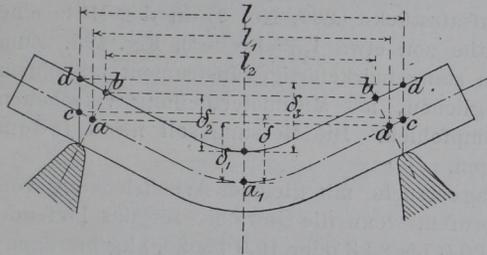


Fig. 193.

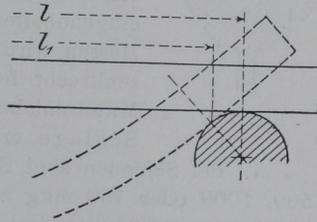


Fig. 194.

sein wird, ist der gemachte Fehler von minderer Bedeutung; es kommt nur darauf an, dass stets das gleiche Verfahren benutzt wird.

In der Praxis pflegt man daher die beiden folgenden einfacheren Verfahren anzuwenden.

269. Beim ersten Verfahren legt man ein Richtscheit von der Länge l auf die obere Fläche der Probe, so dass seine Ecken in die Punkte dd , Fig. 193, fallen, und misst den Abstand δ_3 der Oberfläche von der Mitte der stets gleich langen Sehne dd . Zuweilen wird auch in einer Schnur durch zwei Knoten der Abstand l bezeichnet und δ_3 von der über dd gespannten Schnur ausgemessen. Die Eisenbahnverwaltungen schreiben ein Richtscheit von der Länge l vor, in dessen Mitte ein Schieber die Grösse δ_3 anzeigt.

270. Beim zweiten Verfahren bezeichnet man an der oberen Körperfläche die Punkte bb so, dass sie am geraden Stücke den Abstand $bb=l$ haben, und misst nachher den Abstand δ_2 an einer über bb ausgespannten Schnur.

Wenn nichts Besonderes gesagt ist, soll in diesem Buche bei Mittheilung der Biegemessungen von Fallversuchen immer das unter Absatz 269 mitgetheilte Messverfahren vorausgesetzt werden.

Prüfung von Eisenbahnmaterialien.

271. Seitdem die Eisenbahnen sich den Fallversuchen wieder zugewendet haben, haben diese Versuche eine erhöhte Bedeutung gewonnen, und deshalb seien hier in einem besonderen Abschnitt diejenigen Vorschriften

mitgeteilt, welche die deutschen Eisenbahnverwaltungen für die Ausführung von Fallversuchen zur Erprobung von Eisenbahnbau- und Betriebsmaterialien aufgestellt haben.

Der wesentliche Inhalt ist etwa folgender:

1. Der Ursprung, das Material, die Hauptabmessungen und die Querschnittsform des Körpers sind genau anzugeben.

2. Für Schienen ist die Stützweite $l=1^m$ und die ganze Länge $L=1,3^m$ [die Probe soll keine Laschenlöcher enthalten], für Axen ist $l=1,5^m$ zu nehmen.

3. Die Durchbiegung von Axen und Schienen soll an der oberen Fläche gemessen werden, und zwar immer in Bezug auf die ursprüngliche Entfernung der Auflagerpunkte [das ist also das in Abs. 268 besprochene Messverfahren]. Damit an der betreffenden Stelle das Probestück nicht gestaucht werde, erhalten die Aufsatzstücke (226, No. 9) in der Mitte eine eingehobelte Nuthe von etwa $1,3^m$ Breite¹⁾, Fig. 195. Zum Messen wird ein stangen-zirkelartiges Instrument mit einem senkrecht beweglichen, mit Millimetertheilung versehenen Mittelschieber empfohlen. Die Messung soll nach jedem Schlage erfolgen.

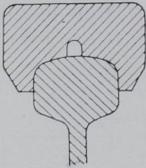


Fig. 195.

4. Bei Schienen sind Schlagversuche mit gleicher Arbeitsleistung von 1500, 1000 oder 750 mkg zu prüfen, wenn die Gewichte für das laufende Meter mehr als 23,8, zwischen 20,0 bis 23,8 oder 16,0 bis 20,0 kg betragen; bei Axen mit Arbeitsleistungen von 3000 mkg auszuführen, und zwar sollen die Schläge in beiden Fällen auf dieselbe Seite des Probestückes erfolgen. [Es war früher auch gebräuchlich, das Stück nach jedem Schlage um 180^0 zu drehen.]

Lokomotivaxen sind mit 5600 mkg [$7^m \times 800$ kg], Tenderaxen mit 4200 mkg [$7^m \times 600$ kg] zu prüfen.²⁾

5. Bei Radreifen [die aufrechtstehend unter das Fallwerk gebracht werden] soll die anzuwendende Arbeitsleistung 3000 mkg betragen [Aufsatzstücke, Abs. 226, No. 9]; nach jedem Schlage ist sowohl die Verminderung des senkrechten als auch die Vergrößerung des wagerechten lichten Durchmessers mittelst Schiebertaster, da mit Millimetertheilung versehen ist, zu messen.

6. Bei etwa einem Drittel der Probestücke ist die Schlagprobe bis zum Bruch fortzusetzen; nöthigenfalls ist der Bruch bei den Schienen, Axwellen und Radreifen durch Einkerbung derselben herbeizuführen.

7. Ungewöhnliche Erscheinungen in der Formänderung des Probestückes und am Bruche sind eingehend zu untersuchen und aufzuschreiben, ebenso ist der Wärmezustand der Probe während des Versuches niederzuschreiben.

8. Endlich wird noch vorgeschrieben, dass neben den Fallversuchen auch Zerreißversuche anzustellen sind, zu denen die Proben aus den bei

¹⁾ Die Bedingungen für Schienenlieferungen von 1896 erwähnen diese Nuthe nicht mehr.

²⁾ Hier sind, abweichend von dem sonst angenommenen Grundsatz, nicht die mkg, sondern die Einzelfaktoren G und H vorgeschrieben, und zwar so, dass eine Auswechslung des Bären stattfinden muss, wenn von der Prüfung der Lokomotivaxen auf Tenderaxen übergegangen werden soll.

den Schlagversuchen am wenigsten verbogenen Stellen zu entnehmen sind. Die aus den Radreifen entnommenen Proben dürfen aus den bei möglichst schwacher Erwärmung gerade gerichteten Stücken der am wenigsten verbogenen Stellen kalt herausgearbeitet werden.

9. Um einen Ueberblick über die Anstrengungen und namentlich über die Formänderungsfähigkeit des Materiales zu gewinnen, sollen an den Stellen stärkster Biegung die Dehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit des Materiales an Theilungen festgestellt werden, die vor dem Versuch an diesen Stellen angebracht wurden. Bei den Schienen soll also in der Mitte des Kopfes mit einem Stahlbandmaass eine Centimetertheilung aufgetragen werden, Fig. 196. Nach dem Versuch ist dann an dieser Theilung die Dehnungs- oder Stauchungsgrösse durch Ausmessen der Längen a , b , c u. s. w. zu bestimmen. Die Aussparung von 1,3 cm Breite in dem Aufsatzstück [Satz 3, S. 190, Fig. 195] hat zugleich den Zweck, diese Theilung vor der Vernichtung zu schützen.¹⁾

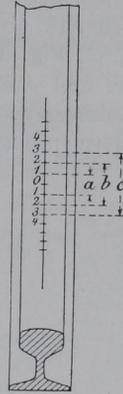


Fig. 196.

β. Fließ- und Brucherscheinungen.

272. Wie beim Zerreißversuch (106—112, S. 67 u. 73) machen sich auch beim Biegeversuch und beim Schlagbiegeversuch bei Ueberschreitung der Streckgrenze des Materiales an der Staboberfläche Fließerscheinungen bemerkbar. Da beim Biegeversuch die Streck- oder die Quetschgrenze immer nur örtlich beschränkt an den Stellen grösster Inanspruchnahme überschritten wird, so kann man aus der genauen Verfolgung der Erscheinungen beim Fließen oft einen Anhalt über die wirklichen Spannungsvertheilungen gewinnen und kann namentlich über die Inanspruchnahmen von Bruchstücken eines Konstruktionstheiles zuweilen Aufschluss über die Bruchursachen bekommen. Wenn auch die Studien über die Fließerscheinungen noch lange nicht zum Abschluss geführt sind, so erscheint es doch zweckmässig, auf diese Vorgänge aufmerksam zu machen, um zur weiteren Verfolgung anzuregen (L 120, 122).

273. Wenn ein blank bearbeiteter Stab aus weichem Flusseisen bleibende Durchbiegung erfährt, so bedeckt er sich in der Mitte mit flammenförmigen geästelten Figuren, Fig. 197, die zwei halbmondförmige Höfe bilden. Diese Höfe nähern sich einander in der neutralen Faserschicht, wo meistens ein mehrere Millimeter breiter Raum unverändert bleibt, ein Zeichen dafür, dass in der Nähe der neutralen Faser auch bei starken Verbiegungen die Streckgrenze nicht erreicht wird (Tab. 2, Fig. 41).

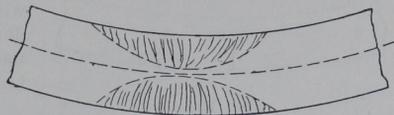


Fig. 197.

274. Bei Schienen und anderen noch mit der Walzhaut behafteten Stäben wird die Walzhaut, ebenso wie bei den Zerreißversuchen, an den Stellen abgeworfen, wo Strecken eintritt. An solchen Stücken kann man

¹⁾ In den 1896 für die Lieferung von Schienen für die preussischen Staatsbahnen ausgegebenen Lieferungsbedingungen fehlen diese Vorschriften.

die Flusserscheinungen zuweilen sehr deutlich sehen, Fig. 198. Es bilden sich wiederum die beiden halbmondförmigen Höfe aus, aber zugleich treten aus den Zwickeln zwischen ihnen strahlenförmig angeordnete gebogene Linien auf, die von anderen Liniengruppen senkrecht durchschnitten werden (Taf. 2, Fig. 42). Diese Linien geben einen Hinweis auf die Entstehungsweise und Ausbildung der Höfe und bekunden, wie es sich schon bei den Zerreißversuchen (107, S. 68) ergab, dass das Strecken nicht lückenlos, sondern sprungweise in einzelnen Flächen des Körpers stattfinden muss, indem

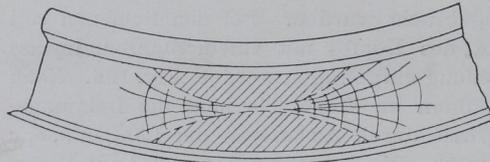


Fig. 198.

gewisse in regelmässiger Folge geordnete Körpertheile eine Verschiebung gegeneinander erfahren. Hierdurch kommen jene regelmässig angeordneten und sich unter rechten Winkeln kreuzenden Linien zustande. Die beiden halbmondförmigen Höfe entstanden in gleicher Weise, nur liegen in ihnen die Linien bereits so eng aneinander, dass fast aller Zunder [Walzhaut] abgesprungen ist, wenn die letzten Strahlen in den Zwickeln sich bilden. Auch über den Auflagern bilden sich ähnliche Linienschaaren, die in jene Strahlen zwischen den Zwickeln übergehen (L 120).

Das genauere Studium dieser ausserordentlich gesetzmässigen Erscheinungen dürfte sich empfehlen, wobei namentlich darauf zu achten sein wird, wie sich die Flusseisensorten verhalten, bei denen die Streckgrenze durch einen plötzlichen Uebergang ausgezeichnet ist, wie Fig. 4 Absatz 38 S. 21 zeigt, gegenüber denjenigen Sorten, bei denen dieser plötzliche Uebergang nicht vorhanden ist. Diese Materialien müssen wohl in ihren Flusserscheinungen charakteristische Unterschiede geben. Ich will hier nur wiederholt andeuten, dass man ja vielfach die Vermuthung aussprach, dass diese Flussvorgänge auch mit Aenderungen des chemischen und physikalischen Zustandes des Eisens verknüpft sind (L 158 und 120). Es ist auffallend, wie leicht solche geflossenen Stellen rosten, so dass zuweilen die Flussfiguren erst durch das nachträgliche Rosten klar erkennbar werden (L 159).

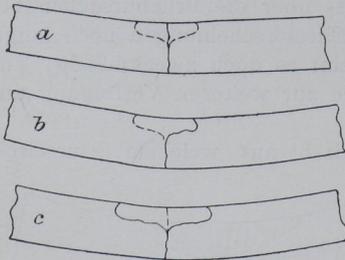


Fig. 199.

275. Auch die Brucherscheinungen und die Bruchformen bei Schlagbiegeversuchen stimmen genau mit denen überein, die man bei Biegeversuchen unter ruhender Last bekommt. Bei prismatischen Stäben von Flusseisen tritt z. B. der Bruch je nach der Gefügeart des Materiales verschieden auf. Am meisten findet man die in Fig. 199¹⁾ dargestellten Fälle

- a) gerader ebener Bruch,
- b) zackiger Bruch,
- c) dreitheiliger Bruch.

¹⁾ Vergleiche auch die von Bach gegebenen Abbildungen (L 138, 1888, S. 1092 Fig. 1—3) von Gusseisen.

Die ersten beiden Bruchformen kann man als aus der dritten entstanden ansehen, vergl. die punktirten Linien in Fig. *a* bis *c* und (Taf. 2, Fig. 27 und 28).

Das in diesen Bruchformen steckende Gesetz wird noch klarer, wenn man die Bruchformen zusammenstellt, die bei Schlagbiegeversuchen mit Eisenbahnschienen sich ergeben (*L 122*).

In Fig. 200 *A* sind alle regelmässig vorkommenden Bruchformen enthalten; die Hauptformen sind in Fig. *B* bis *E* besonders dargestellt. Man sieht, dass der Bruch ziemlich genau den Grenzen jener halbmondförmigen Zonen zu folgen scheint. Der ideale Bruch, wie er in Fig. *A* gezeichnet ist, müsste vier Bruchstücke liefern. Zuweilen kommen wirklich alle Bruchstücke zu Stande, in der Regel jedoch bleibt der eine oder der andere Zwickel an den Hauptbruchstücken *a* und *b* sitzen, und dann entstehen die in Fig. *B* bis *E* gegebenen Bruchformen. Bilden sich einmal die Stücke *c* und *d* vollkommen aus, so erkennt man an ihnen fast immer das Bestreben, sich nach den punktirten Linien nochmals zu trennen. Findet der Bruch rein nach der geraden punktirten Linie statt, so dass $c/2$ und $d/2$ an *a* und *b* haften bleiben, so hat man einen und *b* haften bleiben, so hat man einen und glatten (ebenen) Bruch, der in der Charlottenburger Anstalt auch als Bruch senkrecht zur Axe bezeichnet wird. Bleibt das Kopf- und Fussstück *c* oder *d* an *a* oder an *b* hängen, so hat man zackigen Bruch oder Bruch schief zur Axe. Eine besondere Form hiervon bildet Fig. *D*, bei welcher $c/2$ fehlt und $d/2$ vorhanden ist. Unter Umständen werden aus dem Fuss der Schiene noch zwei Zwickel *e* herausgebrochen, die ebenfalls nach den punktirten Linien Anbrüche zu haben pflegen (Taf. 2, Fig. 31—41 und 43).

276. Auch die Bruchlinien, wie sie bei den Zerreißversuchen vorkommen (*121*, S. 79), finden sich an allen Brüchen, die von Biegeversuchen und Schlagbiegeversuchen herrühren. Man erkennt sie am deutlichsten bei feinkörnigen Materialien. Tafel 2, Fig. 27, 28 und 31 zeigen solche bei Biegeversuchen entstandenen Bruchflächen. Man erkennt, dass auch hier, ebenso wie in Fig. 80, S. 79, die Bruchlinien von einem Punkte in der gezogenen Fläche ausstrahlen und über die ganze Bruchfläche verlaufen, indem sie sich schliesslich nahezu senkrecht zu den Staboberflächen stellen. Die Bruchflächen bilden dann mehr oder minder deutliche gebogene concentrische Wellen; in den Thälern werden die Bruchlinien schärfer und deutlicher ausgeprägt; auf den Wellenbergen pflegen sie sich zu spalten. Die Einzelheiten dieser Erscheinungen treten aber noch deutlicher bei den Bruchflächen auf, die bei Ausführung von Dauerversuchen gewonnen werden. Deshalb soll hierauf erst in dem Abschnitt *i*, der von den Dauerversuchen handelt, eingegangen werden.

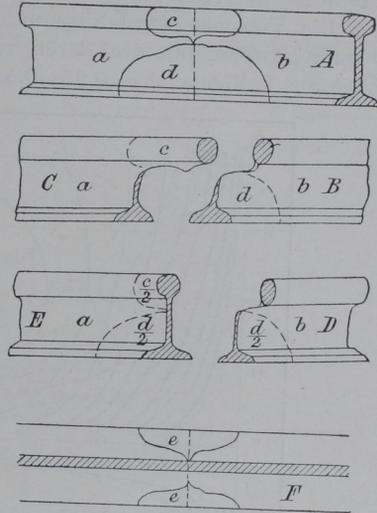


Fig. 200.

γ. Einfluss der Geschwindigkeit.

277. Wie bei den Stauchversuchen (242, S. 170) hervorgehoben wurde, hat Kiek (*L 100*) Versuche mitgeteilt, aus denen er ableitete, dass die Fallgeschwindigkeit nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Grösse der Formänderung habe.

Rotter hat mehrere Reihen von Schlagbiegeversuchen an kleinen Körpern ausgeführt, die benutzt werden können, um zu erforschen, ob etwa auch für Biegeversuche die Kicksche Wahrnehmung zutrifft. Die Ergebnisse der Rotterschen Versuche sind in Fig. 201 dargestellt.

Die Versuche wurden an unter sich ganz gleichen Probekörpern, bei 20 cm Stützweite, mit drei Bären von 10, 20 und 40 kg Gewicht ausgeführt, wobei die Fallhöhen $h = 0,25; 0,5$ und $1,0$ m zur Anwendung kamen und

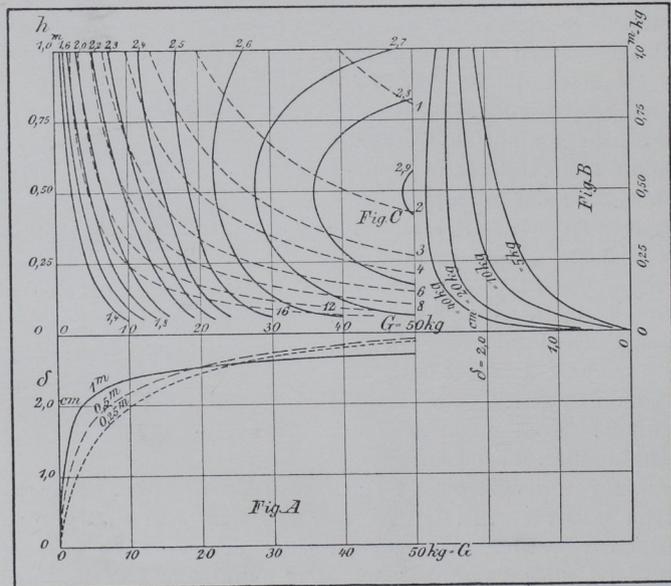


Fig. 201.

Versuche von Rotter über den Einfluss der Geschwindigkeit beim Fallbiegeversuch.

immer soviel Schläge ausgeübt wurden, dass die Gesamtarbeit des Bären $ZA = 40$ mkg wurde, worin Z die Zahl der angewendeten Schläge. In Fig. A sind nach den Beobachtungswerten diejenigen Durchbiegungen δ eingetragen, die bei $h = 0,25; 0,5$ und $1,0$ m durch eine Gesamtschlagarbeit von 40 mkg erzielt wurden. Hiernach sind die mit den Zahlen für h bezeichneten Ausgleichlinien gezogen. Die Linien müssen von Null ausgehen, da mit dem Bärsgewicht Null keine Durchbiegung erzielt werden kann. In gleicher Weise sind nach den Versuchsergebnissen die Linien in Fig. B entworfen, indem nach den Fallhöhen h und den erzielten Durchbiegungen δ geordnet wurde. Die Linien gaben also die mit verschiedenen Bärsgewichten durch die Gesamtleistung von $A = 40$ mkg erzielten Durchbiegungen an; auch diese Linien müssen von Null auslaufen. In Fig. C ist aus diesen beiden Darstellungen der Grundriss für die Darstellung der

Raumfläche entworfen, welche das aus den Rotterschen Versuchen ableitbare Gesetz für die Abhängigkeit der durch eine Gesamtarbeit von 40 mkg an den von Rotter verwendeten, unter einander völlig gleichen Probekörpern erzielten Durchbiegung δ von den Einzelfaktoren h und G vorstellt.

278. Man sieht aus Fig. 201, dass die Wirkung der gleichen Arbeitsleistung unter den verschiedenen möglichen Versuchsbedingungen keineswegs die gleiche ist. Sie wechselt mit dem Bärge wicht und der Fallhöhe. Aber auch bei gleicher Arbeitsleistung für jeden Schlag ist die Wirkung nicht gleich. Die feinen gestrichelten hyperbolischen Linien stellen die Linien gleichen Produktes hG , d. i. gleicher Schlagarbeit für jeden Schlag dar; sie geben zugleich die zur Erzeugung von 40 mkg Gesamtarbeit erforderliche Schlagzahl an, und mit diesen Zahlen sind sie am rechten Ende auch bezeichnet worden. Sie schneiden die stark ausgezogenen und am oberen [bez. unteren] Ende bezeichneten Linien [Niveaulinien] gleicher Durchbiegung. Das dürfte nicht der Fall sein, wenn die Formänderung nur von der Grösse $A = hG$ abhängig wäre.

279. Aus den Schaubildern lassen sich nun die folgenden Gesetze ableiten:

- a) Wuchtige Schläge haben eine grössere Durchbiegung zur Folge, als eine grössere Anzahl schwacher Schläge von gleicher Gesamtarbeitsleistung [vergl. Abs. 245].
- b) Bei gleicher Arbeitsleistung hG für den Schlag erzielen die grösseren Bärge wichte eine grössere Durchbiegung.

Rotter hat Versuchsreihen mit härterem Flusseisen ausgeführt, das mit Z Schlägen gleicher Arbeitsleistung zu Bruche gebracht wurde. Um den Bruch herbeizuführen, war bei wuchtigen Schlägen eine geringere Gesamtarbeit erforderlich, als bei schwachen Schlägen. Auch hier war, bei gleicher Arbeitsleistung für den Schlag, die zur Erzeugung des Bruches erforderliche Gesamtarbeit bei den grösseren Bärge wichten geringer als bei den leichteren Bären.

Man findet also wieder die früher bei den Stauchversuchen gewonnenen Erfahrungen bestätigt.

δ. Einfluss der Probenform und das Aehnlichkeitsgesetz.

280. Ueber den Einfluss der Probenform und darüber, in welchem Maasse das Aehnlichkeitsgesetz bei Schlagbiegeversuchen zutreffend ist, sind bislang noch keine ausreichenden Versuche gemacht worden. Soviel ist aber ohne weiteres klar, dass die Probenformen nach Grundsätzen gewählt werden müssen, die dem hier in der gleichen Form, wie bei den Biegeversuchen, auftretenden Aehnlichkeitsgesetz gerecht werden. Denn wenn Abweichungen von diesem Gesetz gefunden werden, so wird dies immer seine Ursache darin haben, dass nur die Bruttoarbeit des Bären gemessen werden kann und dass von dieser ein je nach den Umständen verschiedener Antheil verloren geht. Dieser Antheil dürfte bei gleicher Schlagarbeit für jeden Schlag verschieden ausfallen, je nach dem Antheil, den das Bärge wicht G in der Gleichung $A = hG$ hat. Für die Forderungen des Aehnlichkeitsgesetzes kommt die Nettoarbeit, d. h. diejenige Arbeit in erster Linie in Betracht, die wirklich zur Formänderung aufgewendet wird.

281. Ein Umstand, der die Durchbiegung beeinflussen muss, ist durch

die überstehenden Enden des Probestückes an den Auflagern gegeben, Fig. 202, die wegen der Trägheit ihrer Masse beim Beginn der Formänderung gegen die theoretische Lage *a*, wie sie den Stabenden nach dem

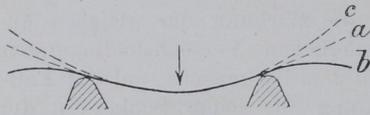


Fig. 202.

Schläge zukommen würde, zurückbleiben und dann über diese Lage hinaus nach *c* geschwungen werden. Die Grösse der Wirkungen ist abhängig von der Länge des überstehenden Endes. Der Erkenntniss dieses Umstandes veranlasste die Eisenbahnverwaltungen, für Schlagver-

suche mit Schienen die Gesamtlänge der Probe von 1,3 m vorzuschreiben (271, No. 2). Für Axen war eine solche Vorschrift nicht nothwendig, da sie ohnehin bestimmte Längen haben.

g. Einfluss der Geschwindigkeit bei Festigkeitsversuchen.

282. Wiederholt wurde bereits die Frage gestreift, ob die Geschwindigkeit, mit welcher die Formänderung vollzogen wird, von Einfluss auf das Ergebniss des Versuches ist, also auf die Grösse der Spannungen an der Proportionalitäts-, Streck- und Bruchgrenze, oder auf die Grösse der Dehnbarkeit und Querschnittsverminderung. Diese Frage ist natürlich von grösster praktischer Bedeutung für das Materialprüfungswesen.

283. Vergewenwärtigt man sich, was früher, z. B. über das Verhalten von Magnesium beim Zerreißversuch gesagt wurde (53, S. 28), so ergibt sich aus dem Umstande, dass bei den einzelnen Belastungsstufen sehr beträchtliche Nachstreckungen eintreten, die mit verschiedener, anfangs abnehmender, bei höheren Belastungen aber zunehmender Geschwindigkeit verlaufen, so muss man wohl schliessen, dass die Geschwindigkeit, mit welcher der Versuch ausgeführt wird, einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben muss.

284. Bei der Formänderung des Körpers müssen sich die Körperelemente gegen einander verschieben und neue Lagen einnehmen, wenn eine bleibende Formänderung zustande kommen soll. Nachdem man sich bereits an die Ausdrücke „Fliesen, Fließerscheinungen“ u. s. w. gewöhnt hat, kann es nicht mehr befremden, sich den festen Körper gewissermassen als eine sehr zähe Flüssigkeit vorzustellen. Man kann sich davon jeden Augenblick ein Bild machen, wenn man Körper, die den Uebergang zwischen dem flüssigen und festen Zustande bilden, auf ihr Verhalten prüft. Pech erscheint bei schneller Beanspruchung fest und spröde, es bricht wie Glas mit muscheligem Bruch. Wenn man Pechstücke in ein Gefäss wirft und sie lange Zeit sich selbst überlässt, so werden die Stücke ihre Form ändern bis sie zusammengelassen sind und eine Oberfläche bilden, genau wie eine Flüssigkeit. Stellt man nun das Gefäss geneigt auf, so wird das Pech in einigen Wochen ausfliessen, wie wenn es ausgegossen würde, und der ausfliessende Faden wird hierbei dennoch die Sprödigkeit eines festen Körpers zeigen, wenn man etwa schnell seine Form ändern wollte.

285. Die Zähigkeit oder innere Reibung der Flüssigkeit muss überwunden werden, wenn man ihre Theilchen in Bewegung setzen will. Hierzu ist Arbeit erforderlich. Sollen die Theilchen ihren Weg schneller

zurücklegen, so muss zur Beschleunigung der Bewegung der Druck vergrößert werden. Ganz ähnlich so kann man sich auch die Vorgänge im festen Körper vorstellen. Man braucht zur Ueberwindung der Kohäsion des festen Körpers eine gewisse Kraft, die den Bruch bei sehr langer Einwirkung schliesslich herbeiführen würde. Soll er in kürzerer Zeit erfolgen, so wird man den Fluss der Massentheilchen beschleunigen müssen, indem man noch einen Kraftzuschuss, den Beschleunigungsdruck, hinzufügt.

Man ist also nach dieser Betrachtung davon überzeugt, dass zur Erzielung der gleichen Formänderung in kürzerer Zeit ein grösserer Kraftaufwand nothwendig ist, und da $P/f = \sigma$, also auch eine grössere Spannung im Probestabe erzeugt werden muss.

286. Es fragt sich nun, ob diese Spannungsvermehrung von solcher Grösse ist, dass sie für die praktischen Zwecke der Materialerprobung ins Gewicht fällt. Zur Lösung dieser Frage sind viele Versuche ausgeführt worden, von denen ich hier nur die grösseren Reihen von Bauschinger (*L 160*) und von Fischer (*L 161*) nennen und einige eigene Versuche mittheilen will.

287. Die Schaulinien, die man bei Zerreißversuchen mit Streifen aus Zinkblech erhält, haben die in Fig. 203 abgebildete Form.

Werden die Versuche mit Streifen angestellt, die unmittelbar neben einander aus dem gleichen Blech entnommen sind, und vollführt man beim

Versuch die Längendehnung beispielsweise mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten v , v_1 und v_2 , so erhält man drei verschiedene Schaulinien, die alle ähnlichen Verlauf haben (*L 115*). Je schneller der Versuch ausgeführt wird, um so grösser werden die Spannungen. Bei Zink kann man bei ganz gleichem Material die Bruchfestigkeit σ_B durch Veränderung der Streckgeschwindigkeit auf den doppel-

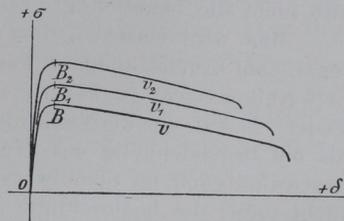


Fig. 203.

ten Betrag bringen. Für Zinn hat Fischer (*L 161*) Aehnliches erwiesen. Festigkeitsangaben für diese Metalle sind also so gut wie werthlos für die Beurtheilung des Materiales, wenn sie nicht bei gleicher Streckgeschwindigkeit gewonnen wurden und wenn nicht diese Geschwindigkeit gleichzeitig mitgetheilt wird.

288. Macht man den gleichen Versuch mit Eisen oder Stahl, so wird man mit den gewöhnlichen Festigkeitsprobirmaschinen keinen Einfluss der Geschwindigkeit nachweisen können, wenn nicht eine sehr grosse Zahl von Versuchen mit gleichem Material ausgeführt wird, denn die Unterschiede in den Festigkeiten sind bei Proben aus demselben Stück, unmittelbar neben einander entnommen, meistens so sehr verschieden, dass der Einfluss der Geschwindigkeit innerhalb der Fehlergrenzen liegt. Den Unterschied zwischen den Festigkeiten bei schnellem und langsamem Zerreißen kann man bei hierfür geeigneten Maschinen nur dann finden, wenn man an einem und demselben Körper feststellt, ob die schnellere Flussbewegung eine grössere Belastung der Waage erfordert¹⁾. Hierzu ist nicht jede Waage geeignet.

¹⁾ Vergl. Absatz 110c S. 71.

Um den Versuch im angedeuteten Sinne durch plötzlichen Uebergang von einer Geschwindigkeit zur andern während der Prüfung eines Stabes ohne wesentlichen Fehler durchführen zu können, darf die Messvorrichtung an sich keine grosse Masse besitzen, auch darf sie nicht so konstruiert sein, dass die Messvorrichtung während des Versuches die Rolle des Spannwerkes übernehmen, d. h. den Körper in unbeabsichtigtem Grade beanspruchen kann.

289. Hat die Kraftmessvorrichtung eine zu grosse Masse, so wird beim Uebergang von der einen Streckgeschwindigkeit zur andern die Trägheit der Massen der Messvorrichtung die Spannungsmessung trüben, und man wird die Ergebnisse auf diesen Umstand sorgfältig prüfen und korrigieren müssen. Sehr geringe Massen erhält man, wenn man die Kraftmessung durch eine Feder bewirkt (65e, S. 37).

290. Wollte man hierbei aber mit einer solchen Feder arbeiten, die wie die Spiralfeder einen sehr grossen Weg braucht, um sich selbst völlig zu entlasten, so würden ihre Kraftäusserungen etwaigem schnellem Wechsel in der Geschwindigkeit des Spannwerkes nicht folgen können. Der Probestab würde beispielsweise bei plötzlichem Stillstehen des Spannwerkes doch noch weiter gestreckt werden, weil der Stab sich noch so lange strecken muss, bis die Feder sich so weit entlastete, dass ihre Kraft nicht mehr ausreicht, um noch Streckbewegung im Stabe hervorzurufen; man hätte also nicht die beabsichtigte Streckgeschwindigkeit Null erzielt.

Man wird einsehen, dass bei ungünstiger Federkonstruktion der Stab sogar zum Bruche kommen kann, ohne die beabsichtigte Streckgeschwindigkeit Null erreicht zu haben; nämlich dann, wenn die zur Entlastung der Feder bis auf die Zerriesskraft P_z (39) erforderliche Wegstrecke grösser ist als die Bruchdehnung des Probestabes. Auch bei Erhöhung der Antriebsgeschwindigkeit im Spannwerk wird die Streckgeschwindigkeit des Stabes nicht sofort die beabsichtigte sein, vielmehr muss die Feder erst eine ganz bestimmte, der beabsichtigten Streckgeschwindigkeit entsprechende Spannung angenommen haben.

Wendet man eine Messvorrichtung an, die nur einen sehr geringen Weg erfordert, um sich selbst zu entlasten, so werden die eben geschilderten Verhältnisse offenbar am günstigsten. Diesen Forderungen entspricht beispielsweise ein auf Zug beanspruchter Stahlstab, wie ich ihn bei einer

kleinen Zerriessmaschine für die Charlottenburger Anstalt benutzte¹⁾ (L 115), und auch die Einrichtung an meiner für die gleiche Anstalt konstruirten Zerriessmaschine für 50 Tonnen Kraftleistung (L 162, Taf. 5).

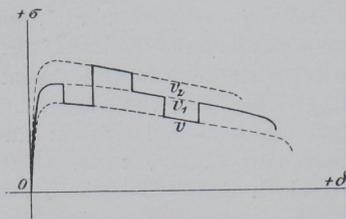


Fig. 204.

so nimmt die Schaulinie etwa die in Fig. 204 wiedergegebene Form an.

291. Wird mit einer Maschine mit Stangenfeder, wie oben beschrieben, ein Zinkstreifen abwechselnd schnell und langsam gestreckt, indem man den Antrieb der Maschine schnell oder langsam laufen lässt,

¹⁾ Dieser Stab hat für die grösste Kraftleistung der Maschine, für $P = 1000$ kg, nur eine Dehnung von 0,62 mm.

Beim Uebergang von der Streckgeschwindigkeit v_1 auf die geringere Geschwindigkeit sinkt sofort der Zeichenstift und beschreibt dann das der Geschwindigkeit v entsprechende Schaulinienstück, um sich beim Uebergange von v auf v_2 ebenso schnell auf die Linie v_2 zu erheben u. s. f. Die Unterschiede in den Ordinaten geben alsdann unmittelbar den Einfluss der Streckgeschwindigkeit auf das Prüfungsergebniss. Er ist bei Zink, Zinn und ähnlichen Metallen beträchtlich.

292. Macht man einen ähnlichen Versuch mit Eisen oder Stahl, so wird man in der Schaulinie die Zacken kaum erkennen. Der Einfluss der Geschwindigkeit wird nach meinen bisherigen Versuchen für Eisen 1 bis 1,5 % kaum erreichen. Bauschinger (*L 160*) hat den Einfluss der Geschwindigkeit für Zink und einige andere Metalle bestätigt und hat nachgewiesen, dass man ihn für die eigentlichen Konstruktionsmetalle vernachlässigen kann.

293. Das ist für das Materialprüfungswesen von ganz erheblicher Bedeutung, indem nun bei Prüfung der meisten Metalle in der Praxis kein grosser Werth auf die Innehaltung einer bestimmten Streckgeschwindigkeit gelegt zu werden braucht. In der That ist man bereits so weit gegangen, dass der ganze Zerreißversuch in wenigen Minuten zu Ende geführt wird. Für die öffentlichen Prüfungsanstalten ist es immerhin wünschenswerth, dass man an der bei mehreren Anstalten eingeführten Regel festhält, alle Versuche mit bestimmten Streckgeschwindigkeiten auszuführen. Bisher war 1 % Dehnung in der Minute üblich; man wird aber wohl zu 2 % übergehen müssen, weil die Versuche sonst zu lange Zeit erfordern und daher theurer werden.

294. Was hinsichtlich des Einflusses der Geschwindigkeit vom Zerreißversuch gilt, wird in ähnlichem Maasse auch von den übrigen Festigkeitsversuchen gelten. Auch hier besteht der Einfluss unzweifelhaft (218), aber er ist bisher noch sehr wenig studirt worden.

Obwohl zahlreiche Untersuchungen über den Einfluss der Streckgeschwindigkeit auf den Zerreißversuch vorliegen, so ist doch das Material nicht nur an sich lückenhaft, sondern auch aus den in den Absätzen 288 bis 290 entwickelten Gründen meistens nicht einwandfrei, und es ist sehr wünschenswerth, dass die Versuche noch erweitert werden. Auf Einzeluntersuchungen kann hier indessen nicht eingegangen werden; dies kann vielmehr erst bei Besprechung der Materialeigenschaften im Besonderen geschehen.

h. Festigkeitsversuche in der Kälte oder im erhitzten Zustande.

295. Unsere Konstruktionsmaterialien benutzen wir sehr häufig in Wärmegraden, die sich weit von der gewöhnlich herrschenden Luftwärme entfernen, auf welchen Zustand sich alle bisher besprochenen Versuche und Angaben stillschweigend bezogen haben. In den Eismaschinen, in den Apparaten zur Verflüssigung der Gase sind gewisse Maschinentheile aber sehr niedrigen Wärmegraden ausgesetzt; Brücken, Eisenbahnschienen, Radreifen und alles mögliche andere Material ist in unseren Breiten wechselnden Wärmegraden zwischen -25 bis $+35$ C.⁰ und mehr ausgesetzt. In unseren

Kesseln und Kochapparaten kann die Wärme leicht zwischen -25 bis $+200$ C.^o schwanken; in Dampfüberhitzern können 400 C.^o und mehr erreicht werden; bei Feuersbrünsten verlangt man, dass das Konstruktionsmaterial noch weit stärkerer Hitze Stand hält. In unseren Glüh- und Schmelzöfen müssen die Ofenmaterialien zuweilen im hellglühenden Zustande wesentlichen Beanspruchungen und Stößen Widerstand leisten. Die Kenntniss der Festigkeitsverhältnisse bei allen diesen Wärmegraden ist daher von grossem Werthe für den Konstrukteur. Aber auch für den Technologen ist sie von hoher Bedeutung, denn für die Verarbeitung des Materiales in der Hitze, beim Walzen, beim Schmieden u. s. w. kommt die Festigkeit und Dehnbarkeit des Arbeitsgutes ausserordentlich in Frage.

An dieser Stelle können nur flüchtig die allgemeinen Maassnahmen besprochen werden, die man für Versuche über die Festigkeitseigenschaften in aussergewöhnlichen Wärmegraden zu treffen pflegt. Die Veränderungen der Eigenschaften der wichtigsten Konstruktionsmaterialien mit der Wärmeänderung werden später bei Besprechung der Eigenschaften dieser Materialien zu behandeln sein.

296. Zur Erzeugung niedriger Wärmegrade wendet man in der Regel sogenannte Kältemischungen z. B. Salz und Schnee oder gestossenes Eis an, womit man -20 bis -21 C.^o erzielen kann. In neuester Zeit wird mit Vortheil Kohlensäureschnee benutzt, den man durch Ausströmlassen von flüssiger Kohlensäure in Sammetbeuteln erzeugt. Hiermit kann man auf bequeme Weise Kältegrade bis -80 C.^o erzeugen und zwar kann -80 C.^o leicht konstant erhalten werden, indem man den Beutel gleich um den Probekörper anbringt und den Schnee im Beutel leicht mit den Händen gleichmässig um den Körper vertheilt.

297. In der Regel werden aber die Versuche in Bädern ausgeführt, die den Körper lange Zeit auf gleichen Wärmegrad erhalten. Wenn der Versuch sehr schnell ausgeführt werden kann, z. B. bei Fallversuchen, pflegt man auch den Körper etwas unter oder über den gewünschten Wärmegrad zu bringen und dann womöglich die Körperwärme nach dem Versuch nochmals festzustellen, um auf diese Weise einen Anhalt über den Wärmezustand im Augenblick des Versuches zu gewinnen. Den ersten Fall pflegt man meistens bei Zerreißversuchen anzuwenden, namentlich wenn es sich zugleich auch um die Feststellung der elastischen Eigenschaften handelt; der zweite Fall wird in der Regel bei Fallversuchen und bei den noch zu besprechenden technologischen Proben (Abschnitt B) benutzt.

298. Versuche bis zu 300 C.^o lassen sich noch in Dämpfen hochsiedender Flüssigkeiten ausführen (*L 163*). Bei mehr als 300 C.^o kann man unter Umständen leichtschmelzige Metalllegirungen oder Salzgemische benutzen. Eine Mischung von Natron- und Kalisalpeter (*L 164*) eignet sich beispielsweise für Hitzegrade bis zu 500 C.^o; sie greift indessen auf die Dauer die Metalle etwas an. Höhere Wärmegrade wird man in der Regel in Gasöfen erzeugen, die den Probekörper während des Versuches umschliessen. Auch elektrisch geheizte Glühöfen hat man bereits angewendet.

299. Die zu benutzenden Vorrichtungen wird man in den meisten Fällen den besonderen Verhältnissen in den vorhandenen Prüfungsmaschinen anpassen müssen; wenn ich daher hier einige Einrichtungen bespreche, so können sie nur als Beispiele dienen, die ich durch Nennung einiger Quellen erweitern werde.

a) In der Charlottenburger Anstalt wurde für die Prüfung von Eisen im erhitzten Zustande (*L 165*) die in Fig. 205 gezeichnete Einrichtung benutzt, die an dem kegelförmigen Ansatz des Versuchsstabes befestigt wurde. Sie besteht aus einem doppelwandigen eisernen Ofen, dessen inneres Gefäß von etwa 10 cm Lichtweite mit einem Paraffinbad, für die Prüfungen bis zu 200 C.^o und mit einem Metallbad für die Prüfungen bis zu 600 C.^o gefüllt war. Dieses Gefäß war von einem eisernen Mantel umhüllt, in den durch seitliche Schlitzte die Stichflammen zweier Mundscheider Gasgebläse geführt werden konnten. Diese kleinen für viele Versuchszwecke sehr bequemen Gebläse mischten mittelst durchbrochener Flügel

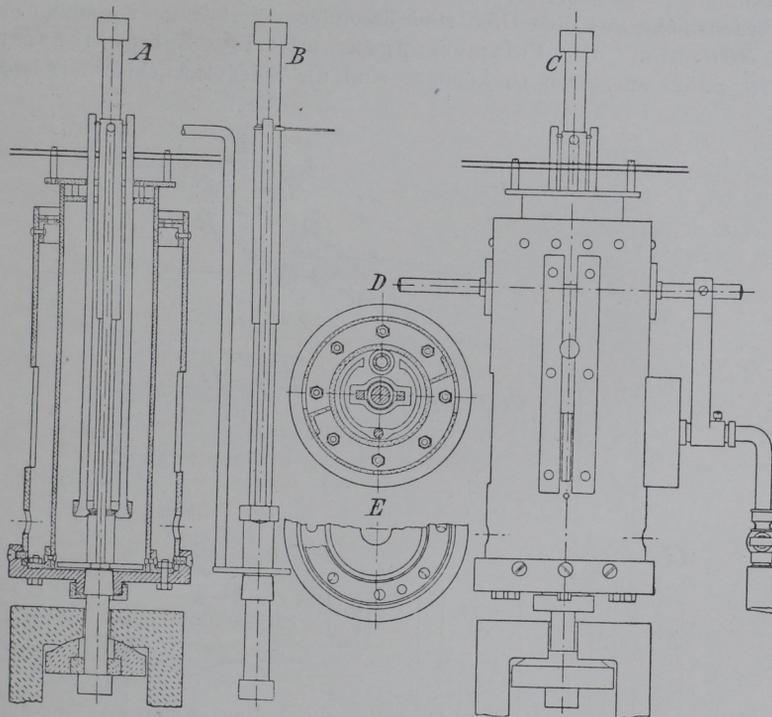


Fig. 205.

Luft und Leuchtgas, dieses Gemisch wurde durch Düsen von passender Form in die Ofen getrieben. Die Gebläse waren mit einer kleinen unmittelbar auf die Axe gesetzten Turbine betrieben. Durch Schieber konnte der Zufluss von Luft und durch den Gashahn der Gaszutritt geregelt werden; ebenso wurde der Austritt der Verbrennungsgase durch Schieber verändert. Die beiden Schlitzbrenner lieferten jeder eine Stichflamme von 11 cm Breite.

b) Da bei Benutzung dieses Ofens, der für eine besondere Versuchsreihe konstruirt war, nur aussergewöhnlich grosse Stäbe verwendet werden konnten und es sich später bei regelmässiger Ausführung von Versuchen mit Metallen im erhitzten Zustande doch wünschenswerth machte, kleinere Probestäbe zu benutzen, so erhielt der Ofen zuletzt die in Fig. 18, Taf. 5 wiedergegebene Einrichtung. Hierbei sind grosse Bunsenbrenner ver-

wendet, die zu dreien auf gemeinsamer Gaskammer sitzen und mit Regulirung für Gas- und Luftzufuhr versehen sind. Die Flammen schlagen in den Heizraum, umspülen das Bad [Paraffin- oder Salzgemisch] und entweichen dann durch den Ofenmäntel und den in jede beliebige Lage drehbaren, mit Drosselklappe versehenen Schornstein. Indirekt hängt auch hier der Ofen am Probestab, und zwar vermittelt zweier Verlängerungsköpfe, von denen der untere mit dem Ofen ein für alle mal fest verbunden ist. Die Probestäbe haben eine besondere Form und werden in allen ihren Abmessungen genau nach Lehren hergestellt; sie werden mit Gewinde in den Köpfen befestigt, die ihrerseits in die Kugelschalen der Einspannmäuler passen. Zur Einführung der Probe und zum Herausnehmen der Bruchstücke aus dem Ofen sind besondere Werkzeuge vorhanden.

300. Um die Feinmessungen mittelst Spiegelapparaten (87. 88, S. 52) ausführen zu können, sind die Spiegelschneiden mit langen

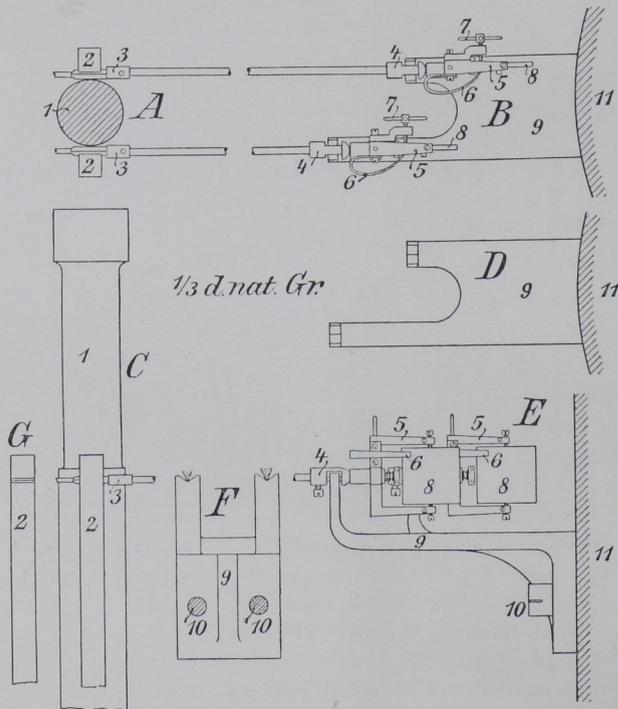


Fig. 206.

Axen versehen, so dass die Spiegel weit ab vom Ofen sitzen und die Ablesungen nicht durch die zitternden Bewegungen der am Ofen aufsteigenden erwärmten Luft leiden. Die Messfedern (2) in Fig. 206 [vergl. auch Fig. 205 A] haben hier etwas abweichende Form und Anordnung. Damit eine ganz sichere Befestigung ermöglicht wird, ist der Probestab mit eingedrehten Ringnuthen versehen, in die die Schneiden der Messfedern eingreifen, Fig. 205 A. Man hat den Grundsatz, die Messlänge l an der Gebrauchslänge (130) selbst abzugrenzen, aufgeben müssen

und musste die hierdurch entstehenden Fehler der Feinmessungen rechnerisch unschädlich machen. Die Einrichtung der Spiegelapparate und ihre Stützung an der Säule der Maschine geht aus Fig. 206 hervor. Die gleichen Theile in den Figuren sind mit gleichen Ziffern bezeichnet. Eine Beschreibung der Einzelheiten der Spiegel findet sich am Schluss des Buches in dem Abschnitt über Messinstrumente.

301. Um die Tragfähigkeit von Säulen aus verschiedenen Materialien und von verschiedener Konstruktionsart im Feuer zu erproben, sind von vielen Seiten Versuche gemacht. Ich will hier die Versuche von Bauschinger (*L 166*), Moeller (*L 167*) und von der Baudeputation der Stadt Hamburg (*L 168*) nennen, die wesentlich zur Beurtheilung der Standsicherheit von Eisenkonstruktionen im Feuer beigetragen haben. Für alle diese Versuche sind specielle Einrichtungen getroffen worden, deren eingehende Beschreibung in den Quellen nachgelesen werden muss, da sie ja die Allgemeinheit weniger interessiren. Bauschinger und Moeller prüften die Säulen liegend, indem sie Holzfeuer um die Probekörper entfachten. Bauschinger arbeitete mit der Werderschen Prüfungsmaschine, Moeller mit einer einfachen hydraulischen Presse zum Röhrenprobiren. Bei den Hamburger Versuchen wurden die Säulen stehend probirt; sie waren in der Mitte von einem Gasofen umgeben, in welchem sie auf die gewünschten Hitzegrade gebracht werden konnten. Bei allen diesen Versuchen wurde auch der Grad der schützenden Wirkung von schlechten Wärmeleitern untersucht; man prüfte Säulen aus Holz, Stein, Schmiedeeisen und Gusseisen.

302. Besondere Schwierigkeiten haben bei den Versuchen über die Festigkeit der Metalle bei ungewöhnlichen Wärmeverhältnissen fast immer die Wärmemessungen gemacht. Nachdem aber die Wärmemesskunst in den letzten Jahren erheblich verbesserte Hilfsmittel lieferte, ist diese Schwierigkeit bedeutend verringert. Früher hatte man mit dem schwerfälligen Wasserkalorimeter, mit Schmelzkörpern oder Luftthermometern zu arbeiten; die Ausdehnung von Körpern durch die Wärme, die Glüherscheinungen und manche andere Dinge nahm man zu Hülfe. Für rohe Versuche in der technischen Praxis, namentlich wenn es sich um vergleichende Untersuchungen handelt, sind manche dieser Verfahren bequem. Es sei deswegen ganz kurz auf Folgendes aufmerksam gemacht.

303. Die Schmelz- und Siedepunkte von gewissen Stoffen können Anhalt für die Beurtheilung des Wärmeszustandes eines Körpers geben. Die verdampfende feste Kohlensäure giebt beispielsweise -80 C.° [mit verflüssigter Luft und flüssigen Gasen kann man sogar Kältepunkte bis unter -200 C.° erzeugen], schmelzendes Quecksilber entspricht etwa -39 C.°

304. Weingeistthermometer messen die Kältegrade; Quecksilberthermometer messen heute von -30 bis $+500\text{ C.}^{\circ}$, nachdem es gelungen ist, besonders brauchbare Glasarten zu finden, die zugleich auch die Fehler der Instrumente wesentlich verringern. Die Quecksilberthermometer für hohe Wärmegrade werden mit Kohlensäure unter hohem Druck gefüllt. Man kann zu diesen Instrumenten besondere Fadenthermometer als Hilfsmittel benutzen, die eine schnelle und einfache Korrektur des Fehlers gestatten, der durch die Länge des herausragenden Fadens entsteht. Die Thermometerangaben bis zu 500 C.° sind dann nur noch mit geringen Unsicherheiten behaftet (*L 164 S. 79*). Ausserordentlich bequem und sehr zu

empfehlen ist es, alle Instrumente, die für genaue Arbeiten dienen sollen, von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg, Marchstr., mit dem Luftthermometer, womöglich wiederholt, vergleichen zu lassen. Auf die Fehlerquellen, ihre Ursache, ihre Grenzwerte, und die Verbesserungsrechnungen kann hier nicht eingegangen werden, vielmehr ist auf die Handbücher für die Arbeiten im physikalischen Laboratorium zu verweisen, von denen ich im Anhang einige anführe (*L 103, 104*).

305. Von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. wird eine Reihe von Edelmetalllegirungen, die mit bestimmten Schmelzpunkten bezeichnet sind, in Form von papierdünn ausgewalzten Blechen ausgegeben. Die Schmelzpunkte liegen angeblich von 315 bis 1775 C.^o, indessen wird man gut thun, diese Zahlen nur als Näherungswerte zu betrachten. Tab. 24 enthält die Angaben der Fabrik für die einzelnen Legirungen.

Tabelle 24. Metalllegirungen zur ungefähren Wärmebestimmung für keramische Zwecke.

(Prinsepsche Metall-Pyrometer, hergestellt von der deutschen Gold- und Silberscheide-Anstalt in Frankfurt a. M.)

Schmelzpunkte in C ^o nach Erhard & Schertel	Schmelzpunkte in C ^o nach Erhard & Schertel
Cadmium 315	600 Th. Gold, 400 Th. Platin . . . 1320
Zink 412	550 " " 450 " " . . . 1350
Aluminium 620	500 " " 500 " " . . . 1385
800 Th. Silber, 200 Th. Kupfer . . . 850	450 " " 550 " " . . . 1420
950 " " 50 " " . . . 900	400 " " 600 " " . . . 1460
Feinsilber 954	350 " " 650 " " . . . 1495
400 Th. Silber, 600 Th. Gold . . . 1020	300 " " 700 " " . . . 1535
Feingold 1075	250 " " 750 " " . . . 1570
950 Th. Gold, 50 Th. Platin . . . 1100	200 " " 800 " " . . . 1610
900 " " 100 " " . . . 1130	150 " " 850 " " . . . 1650
850 " " 150 " " . . . 1160	100 " " 900 " " . . . 1690
800 " " 200 " " . . . 1190	50 " " 950 " " . . . 1730
750 " " 250 " " . . . 1220	Platin, rein 1775
700 " " 300 " " . . . 1255	

Nach den neuesten Versuchen von Violle, Barus, Hollborn und Wien (Ann. Phys. u. Chem. 1895, S. 276) schwanken die Schmelzpunkte zwischen:

Silber von 954—986 C. ^o , Mittel 970 C. ^o ,	Nickel von 1476—1517 C. ^o , Mittel 1496 C. ^o ,
Gold " 1045—1093 " " 1069 "	Palladium " 1500—1643 " " 1572 "
Kupfer " 1054—1097 " " 1076 "	Platin " 1757—1855 " " 1806 "

Von den Blechen werden schmale Streifen abgeschnitten und in mit Sand oder Magnesia gefüllte feuerfeste Tiegelchen [Thonscherben] eingelegt oder in Thonklümpchen eingeklemmt. In diesem Zustande werden sie der zu messenden Hitze ausgesetzt. Man beobachtet, welche von den Legirungen zu einem Kügelchen zusammen schmilzt. Einfaches Umbiegen der Streifen tritt bei manchen Legirungen schon vor erreichtem Schmelzpunkt ein; dies darf nicht mit dem Schmelzen der Legirung zur Kugel verwechselt werden.

306. Von dem Chemischen Laboratorium für Thonindustrie, Berlin NW, Kruppstr. 6, werden die Seegerschen Schmelzkegel ausgegeben, die namentlich zur Bestimmung hoher Ofenhitze dienen und im Materialprüfungswesen besonders zur vergleichenden Feststellung der Feuer-

beständigkeit feuerfester Materialien benutzt werden. Die Kegel sind dreiseitige Pyramiden aus verschiedenen Mischungen von feuerfestem Material, die in der hohen Hitze Formänderungen erfahren, wie in Fig. 207 angegeben oder zusammenschmelzen. Die Kegel sind numerirt von No. 022 bis 36 und ihre Schmelzpunkte liegen angeblich zwischen 590 und 1850 C.⁰

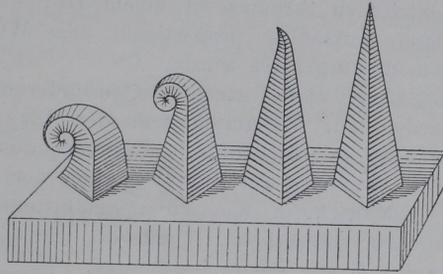


Fig. 207.

Nach den Mittheilungen von Dr. Hecht (*L 169*) schmilzt

Kegel 022	durchschnittlich bei	590 C. ⁰
„ 010	„	950 C. ⁰
„ 1	„	1075 C. ⁰
„ 10	„	1330 C. ⁰

Auf Grund dieser beobachteten Werthe schätzt Dr. Hecht die Schmelzpunkte der ganzen Kegelreihe wie sie in nachstehender Tabelle mitgetheilt sind:

Tabelle 25. Schmelzpunkte der Seegerschen Kegel nach Schätzung von Dr. Hecht. (Thon-Ind.-Ztg. 1896, S. 294.)

No. 022 . . . 590 C. ⁰	No. 02 . . . 1110 C. ⁰	No. 18 . . . 90 C. ⁰
„ 021 . . . 620 „	„ 01 . . . 30 „	„ 19 . . . 1510 „
„ 020 . . . 50 „	„ 1 . . . 50 „	„ 20 . . . 30 „
„ 019 . . . 80 „	„ 2 . . . 70 „	„ 21 . . . 50 „
„ 018 . . . 710 „	„ 3 . . . 90 „	„ 22 . . . 70 „
„ 017 . . . 40 „	„ 4 . . . 1210 „	„ 23 . . . 90 „
„ 016 . . . 70 „	„ 5 . . . 30 „	„ 24 . . . 1610 „
„ 015 . . . 800 „	„ 6 . . . 50 „	„ 25 . . . 30 „
„ 014 . . . 30 „	„ 7 . . . 70 „	„ 26 . . . 50 „
„ 013 . . . 60 „	„ 8 . . . 1290 „	„ 27 . . . 70 „
„ 012 . . . 90 „	„ 9 . . . 1310 „	„ 28 . . . 90 „
„ 011 . . . 920 „	„ 10 . . . 30 „	„ 29 . . . 1710 „
„ 010 . . . 50 „	„ 11 . . . 50 „	„ 30 . . . 30 „
„ 09 . . . 70 „	„ 12 . . . 70 „	„ 31 . . . 50 „
„ 08 . . . 990 „	„ 13 . . . 1490 „	„ 32 . . . 70 „
„ 07 . . . 1010 „	„ 14 . . . 10 „	„ 33 . . . 90 „
„ 06 . . . 30 „	„ 15 . . . 30 „	„ 34 . . . 1810 „
„ 05 . . . 50 „	„ 16 . . . 50 „	„ 35 . . . 30 „
„ 04 . . . 70 „	„ 17 . . . 70 „	„ 36 . . . 50 „
„ 03 . . . 90 „		

307. Von den neueren Pyrometern für die Messung hoher Hitzgrade will ich hier nur diejenigen von Siemens, Le Chatelier, Callendar Wiborgh (*L 170, 171*) nennen. Das Pyrometer von Le Chatelier hat sich unter diesen Instrumenten besonders gut bewährt und hat sich wegen seiner leichten Handhabung und wegen seiner Leistungsfähigkeit auch bereits vielfach Eingang in die Technik verschafft. Für Versuchszwecke, wie sie hier besprochen sind, ist es besonders werthvoll, weil das Thermoelement leicht in jeden Apparat und oft sogar unmittelbar in Berührung mit dem Körper gebracht werden kann, dessen Wärme man bestimmen will. Ein Thermoelement, durch Verbindung eines Platindrahtes mit einem Platinrhodiumdraht gebildet, misst den Hitzegrad mittelst des erzeugten

elektrischen Stromes an einem Deprez-d'Arsonval'schen Galvanometer, dessen Ausschlag proportional dem Wärmegrade ist, dem das Thermo-element ausgesetzt wurde.

Auch diese Instrumente, insonderheit die verwendeten Thermo-elemente, werden auf Verlangen von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt geprüft und beglaubigt; was man jedenfalls ausführen lassen sollte, wenn es auf Zuverlässigkeit der Ergebnisse ankommt.

Man kann nach den Erfahrungen der Reichsanstalt und anderer Forscher selbst hohe Hitzegrade, wie die Schmelzpunkte von Eisen, bis auf wenige Grade genau bestimmen.

In der von Keiser & Schmidt in Berlin gefertigten Bauart (*L 172*) ist das Instrument transportfähig und ausserordentlich bequem. Die Ablesungen geschehen an einer Skala, die auf Grund der Aichungen der Reichsanstalt ausser nach Volt, auch unmittelbar nach $C.^{\circ}$ getheilt ist. Die Messungen reichen von Zimmerwärme bis zu $1500 C.^{\circ}$; die Ablesungen können bis auf einzelne Grade geschätzt werden; auch diese Instrumente sollte man vor dem Gebrauch prüfen lassen.

308. Für wissenschaftliche Zwecke und für die Kontrolle der Fabrication ist es bequem, die Angaben vom Instrument selbst aufzeichnen zu lassen. Roberts-Austen theilt eine hübsche Einrichtung für photographische Aufzeichnung mit (*L 171*). Bei diesem Instrument wirft der in einer kleinen Dunkelkammer stehende, mit festem und losem Spiegel versehene Galvanometer durch einen schmalen Spalt Lichtpunkte auf das photographische Papier, das auf einen vom Uhrwerk bewegten Cylinder gespannt ist; es entsteht hierdurch eine gerade Grundlinie und eine Kurve, deren Abstand von der Grundlinie ein Maass für den Hitzegrad ist. Das Instrument ist so eingerichtet, dass abwechselnd von mehreren Punkten (Oefen) aus die dort herrschenden Hitzegrade aufgezeichnet werden können.

i. Dauerversuche.

1. Allgemeines.

309. Unter dem Namen „Dauerversuche“ pflegt man alle jene Festigkeitsversuche zusammenzufassen, bei denen die Körper nur mit verhältnissmässig geringen Spannungen aber unter oftmaliger Wiederholung beansprucht werden. Diese Versuche ahmen gewissermassen die Inanspruchnahme nach, welche das Material während seiner Thätigkeit als Konstruktions-theil erfährt. Ihre Ergebnisse bilden die Grundlage für die heutigen Anschauungen über das zulässige Maass der Materialbeanspruchung in allen unsern Konstruktionen, und deswegen ist es nothwendig, dass die Art und Ausführung der Dauerversuche, sowie die wesentlichen Ergebnisse der bisherigen Versuche hier ganz kurz berührt werden; das tiefere Eingehen ist Sache der Konstruktionslehre.

310. Wenn auch vor Wöhler Andere schon sich mit Versuchen befassten, die man zu den Dauerversuchen zählen muss, so pflegt man ihn doch immer als den eigentlichen Begründer (*L 174*) zu nennen, nach dem man diese Versuche auch wohl als Wöhler'sche Versuche zu bezeichnen pflegt. Selbst die Wöhler'schen Konstruktionen für Dauerversuchsmaschinen sind vielfach von anderen Forschern übernommen, und die alten von

Wöhler selbst benutzten Maschinen sind erhalten und dienen zur Fortführung der von ihm begonnenen Versuche in der Charlottenburger Versuchsanstalt.

Unter den Vorgängern Wöhlers will ich hier nennen Albert, der 1829 schon Dauerversuche mit Förderketten anstellte (*L 176*), und W. Fairbairn, der 1864 über Dauerversuche mit Brückenträgern berichtete (*L 177*). Neuerdings sind die Wöhlerschen Versuche vielfach erweitert worden, und namentlich in Amerika scheint man ihnen mehrere Stätten eröffnet zu haben. Besonders hat Bauschinger die Wöhlerschen Versuche wesentlich ergänzt; auf seine Arbeiten wird im folgenden Abschnitt näher einzugehen sein.

311. Je nach der Art der Beanspruchung unterscheidet man verschiedene Formen des Dauerversuches, nämlich Dauerversuche mit Beanspruchung auf Zug, Biegung in einer Ebene, Biegung nach allen Richtungen, Verdrehung, Zug und Biegung, Schlagwirkung unter Zug-, Druck-, Biegungs-, Verdrehungsbeanspruchung u. s. w.

312. Für alle diese Beanspruchungsformen ergibt sich, dass sie den Probekörper nur dann durch eine sehr grosse Zahl von Wiederholungen zu Bruche bringen, wenn die jedesmal erzeugte Spannung [im Folgenden die Anspannung σ_A genannt] über ein gewisses, dem Material eigenthümliches Maass hinausgeht. Diese Grenzspannung nannte Launhardt die Arbeitsfestigkeit σ_N des Materiales.

2. Die Veränderlichkeit der Proportionalitäts- und Streckgrenze.

313. Seitdem man begann, Festigkeitsversuche mit einiger Genauigkeit auszuführen, ist es eine bekannte Thatsache, dass die Beanspruchung eines Körpers über eine gewisse Grenze hinaus eine Veränderung der Eigenschaften des Materiales im Gefolge hat. Diese Veränderungen erstrecken sich ganz besonders auch auf die Lage der Proportionalitäts- und Streckgrenze. Schon bei der kurzen Besprechung der Nachwirkungserscheinungen, dass nämlich das Material nach Hervorbringung eines neuen Spannungszustandes keineswegs sofort zur Ruhe kommt und den dem neuen Spannungszustande zukommenden Gleichgewichtszustand durchaus nicht sofort annimmt (*53, S. 28*), wurde erwiesen, dass Minuten, Tage, Monate, Jahre darüber vergehen, bis das Material seine Länge nicht mehr verändert.

314. Die Erscheinungen, die ich jetzt zu besprechen habe, sind ähnlicher Natur. Für unsere Zwecke sind sie besonders anschaulich von Bauschinger (*L 111. 178*) bei seinen Versuchen an Schweisseisen, Flusseisen und anderen Metallen beobachtet und dargestellt. Andere Forscher haben früher und später ähnliche Erfahrungen gesammelt und darüber berichtet. Hier soll in erster Reihe auf die Bauschingerschen Versuche eingegangen werden, weil sie besonders geeignet sind, die an sich früher festgestellten Erfahrungen Wöhlers verständlich zu machen. Ich darf es aber nicht unterlassen, von vornherein hervorzuheben, dass die nachfolgend ausgesprochenen Bauschingerschen Sätze nicht verallgemeinert werden dürfen, sondern als Erfahrungssätze streng genommen nur auf die von ihm geprüften Materialgattungen angewendet werden sollten, wenn auch die Wahrscheinlichkeit vorliegt, dass andere Materialien ihnen folgen.

a) Wenn ein Körper mit Kräften auf Zug beansprucht wird,

die von Null anwachsend Spannungen erzeugen, welche grösser als die Proportionalitätsgrenze des Materiales sind, so wird diese Grenze geändert, sofern sich das Material nicht bereits in einem künstlich veränderten Zustande befand. Wenn das Material sofort nach der Entlastung wieder geprüft und die neue P -Grenze festgestellt wird, so findet man diese höher liegend als die ursprüngliche P -Grenze. Lässt man, den Versuch immer wiederholend, die Spannung, welche die Erhöhung erzeugte, allmählig anwachsen, so wird man eine weitere Erhöhung der P -Grenze finden, bis zu dem Augenblick, in welchem die Spannung die Streckgrenze des Materiales erreicht oder um ein Geringes überschreitet¹⁾.

Nennt man diejenige P -Grenze und diejenige S -Grenze, von der wir ausgingen, die ursprüngliche Proportionalitäts- oder Streckgrenze, σ_{Pu} und σ_{Su} , bezeichnet man ferner zur klareren Unterscheidung diejenige Spannung, welche diese Grenzen verändern soll, als die Anspannung σ_A und nimmt man bei allen folgenden Betrachtungen als Grundbedingung an, dass die ursprünglichen Grenzen dem Material in seinem gewöhnlichen Zustande eigen sind, dass sie also auf keine Weise bereits künstlich verändert waren, so kann man ein Schaubild von dem soeben entwickelten Gesetz entwerfen.

Die zeichnerische Darstellungsweise soll auch für die Versinnbildlichung der folgenden Gesetze angewendet und gleiche Vorgänge sollen immer in gleicher Weise gezeichnet werden. Dabei werden die Belastungsarten (Anspannungsarten) durch strichpunktirte Pfeile, die hierdurch erzeugten Veränderungen der P -Grenzen durch feingezeichnete und diejenigen der S -Grenzen durch stark gezeichnete Pfeile gekennzeichnet werden. Die durch Zugbeanspruchungen erzeugten Veränderungen der P - und S -Grenzen werden durch ausgezogene, die durch Druckbeanspruchungen erzeugten, durch punktirte Linien angedeutet. Die Spannungen werden, wie früher, die Zugspannungen nach oben, die Druckspannungen nach unten aufgetragen.

Unter diesen Voraussetzungen ist das oben unter a) ausgesprochene Gesetz durch Fig. 208 bis zur Grenze a dargestellt.

b) Bei wachsender Anspannung (Theil a , Fig. 208) wächst die P -Grenze bis zu einem Maximum, und in dem Augenblick, in welchem die Anspannung die ursprüngliche S -Grenze (S_u) erreicht, nimmt die P -Grenze ganz erheblich ab. Bei stärkerer Ueberschreitung der S -Grenze kann die P -Grenze bis auf Null herabsinken (Theil b , Fig. 208).

c) Ueberlässt man den Stab nach der Entlastung der Ruhe, so erhebt sich mit der Zeit, erst schnell, dann langsamer die P -Grenze; sie kann im Laufe der Jahre bis über die ursprüngliche S -Grenze und unter Umständen selbst bis über die Höhe der vorausgehenden Anspannung anwachsen (Theil c , Fig. 208).

d) Durch die Anspannung über die ursprüngliche S -Grenze hinaus wird auch diese gehoben und zwar schon unmittelbar

¹⁾ Man kann aus dem Satz a) den für das Materialprüfungswesen unter Umständen wichtigen Schluss ziehen, dass es schon unzulässig ist, innerhalb der P -Grenze Entlastungen vorzunehmen, wenn die Bestimmung der P -Grenze Aufgabe des Versuches ist. Es gibt aber auch andere Gründe, die die Entlastung während des Versuches unter Umständen misslich erscheinen lassen.

nach der Anspannung. In der Ruhe nach geschעהer Entlastung hebt sich die Streckgrenze im Laufe der Zeit bis über die Anspannung hinaus (Theil *d*, Fig. 208). Diese Hebung ist schon nach einem Tage sehr gut bemerkbar, dauert aber Wochen, Monate und Jahre fort.

e) Durch die Anspannung über die ursprüngliche S-Grenze hinaus wird auch der Elasticitätsmodul $1/a = E$ erniedrigt [d. h. die Dehnungszahl a vergrößert], Fig. 209. In der Ruhe nach geschעהer

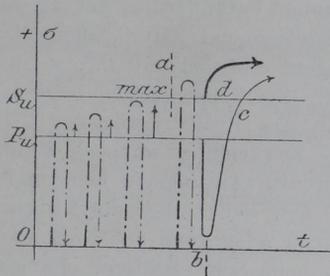


Fig. 208.

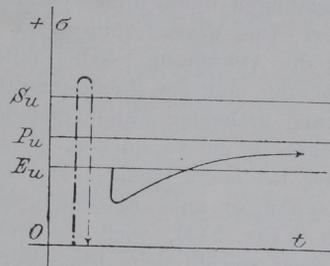


Fig. 209.

Entlastung hebt sich der Elasticitätsmodul, aber langsamer als die P-Grenze. Nach mehreren Jahren findet er sich beträchtlich über seine ursprüngliche Grösse erhoben. [NB. Bauschinger führt Ausnahmen hiervon an.]

f) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung, die P- und die S-Grenze gehoben sind, so werden durch heftige Erschütterung des Stabes, z. B. Hämmern im kalten Zustande, die P- und S-Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 210. Hierbei sinkt die S-Grenze nur wenig und bleibt höher als die ursprüngliche S-Grenze (*a* Fig. 210). Die P-Grenze geht ganz bis auf die ursprüngliche P-Grenze zurück, wenn beim Hämmern keine Verlängerung des Stabes erzeugt wurde (*b* Fig. 210). Wenn aber beim

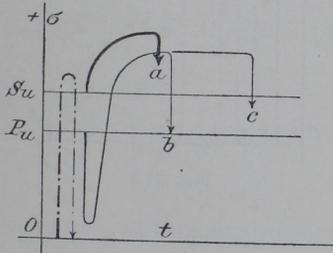


Fig. 210.

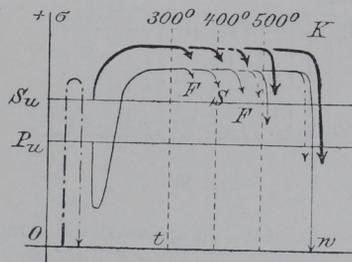


Fig. 211.

Hämmern eine Verlängerung eintritt, so wird die P-Grenze nur etwas, aber nicht bis zur ursprünglichen P-Grenze erniedrigt¹⁾ (*c* Fig. 210).

g) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze

¹⁾ Das ist schwer verständlich, wenn man bedenkt, dass die Verlängerung beim Hämmern ja die gleiche Wirkung haben musste, wie die Formänderung beim Zugversuch. Deswegen sollte nach Gesetz *b* erst recht eine erniedrigende Wirkung eintreten. Dieser Punkt scheint weiteren Studiums werth zu sein.

hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung die P - und S -Grenzen gehoben sind, so werden durch starke Erwärmung des Stabes die P - und S -Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 211. Die Art der Abkühlung spielt hierbei eine wesentliche Rolle, insofern als rasche Abkühlung des erwärmten Stabes viel energischer wirkt als langsames Abkühlen. Die Wirkung der Erwärmung auf Eisen [in Fig. 211 bedeutet F Flusseisen und S Schweisseisen] beginnt erst von 350 C.^0 ab. Selbst zehnmal wiederholte Erwärmungen unter dieser Grenze rufen keine Veränderung der P -Grenze hervor. Die Veränderung wird beim Flusseisen bei 350 C.^0 bemerkbar, wenn die Abkühlung rasch [Pfeile ausgezogen] und bei 450 C.^0 , wenn die Abkühlung langsam [Pfeile punktirt] erfolgt. Bei Schweisseisen beginnt die Wirkung in beiden Fällen erst bei 400 C.^0 . Die Erniedrigung der P - und S -Grenze ist um so stärker, je stärker die Erwärmung war; sie ist energischer bei der P -Grenze, als bei der S -Grenze [Ausnahmen hiervon führt Bauschinger an]. Erwärmungen auf 500 C.^0 , sicher aber die Kirschrothgluth (k Fig. 211), wirft die P -Grenze nahezu oder ganz auf Null herab¹⁾ und zwar sowohl beim Flusseisen als auch beim Schweisseisen. Langsame Abkühlung bewirkt selbst nach voraufgegangener Rothgluth keine so starke Erniedrigung der P Grenze.

Die Zeit der Ruhe nach dem Erwärmen und Erkalten hat keinen Einfluss mehr auf die durch Erwärmen erniedrigte P - und S -Grenze.

h) Wird die Anspannung zwischen den Grenzen 0 und $+\sigma$ oftmals wiederholt [Schwingungen der Anspannung zwischen 0 und $+\sigma$] und bleibt σ zwischen den ursprünglichen P - und S -Grenzen, so wird im Laufe der Zeit die P -Grenze selbst bis über, und zwar manchmal weit über die Höhe der Anspannung und über die ursprüngliche S -Grenze hinaus erhöht, Fig. 212. Diese Erhöhung ist

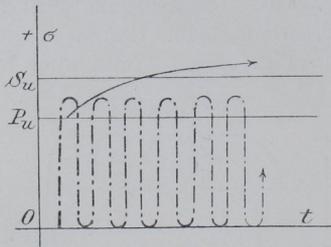


Fig. 212.

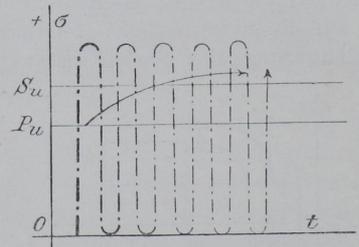


Fig. 213.

um so grösser, je grösser die Anzahl der Schwingungen ist, ohne aber eine gewisse Grösse überschreiten zu können. [Bauschinger giebt Ausnahmen hiervon an.]

i) Wird die obere Grenze der Schwingungen erhöht, so kann schliesslich die P -Grenze auch durch eine sehr grosse Zahl von Schwingungen nicht mehr bis an die obere Anspannungsgrenze gehoben werden, Fig. 213.

¹⁾ Von Interesse würde es sein, festzustellen, ob durch Erschütterung eine so tief herabgeworfene P -Grenze gehoben werden kann, denn sie hat offenbar nicht ihre natürliche Lage. Ebenso sollte versucht werden, ob durch starke magnetische oder elektrische Erregungen künstlich veränderte P - und S -Grenzen verändert werden können.

k) Wenn die erhobene P -Grenze die obere Anspannungsgrenze noch übersteigen kann, so führt selbst eine sehr grosse Zahl von Schwingungen [mehrere Millionen] nicht den Bruch herbei. Ueberschreitet aber die obere Anspannungsgrenze die noch erreichbare Höchstlage der P -Grenze, so muss der Bruch nach einer beschränkten Anzahl von Schwingungen erfolgen.

l) Die Bruchgrenze σ_B zeigt sich durch millionenmal wiederholte Anspannungen nicht vermindert, eher erhöht, wenn die Stäbe nachher mit ruhender Belastung zerrissen werden.

Leider kann man aus den Bauschingerschen Versuchen nicht mit hinreichender Sicherheit Erfahrungen über die Veränderungen der Formänderungsfähigkeit δ u. q ableiten. Man darf aber wohl aus den allgemeinen Erfahrungen der Technik schliessen, dass die Formänderungsfähigkeit mit der oft wiederholten Anspannung allmählig erschöpft wird, wenn die Anspannung das durch das Gesetz k angedeutete Maass überschreitet. Es würde von grossem Interesse sein, wenn fernere Untersuchungen sich dieser Frage zuwendeten, wenn insbesondere festgestellt würde, in welchem Maasse δ und q sich unter den in Satz h) und i) angegebenen Bedingungen ändern.

Bisher wurden die Wirkungen betrachtet, die die Anspannungen auf Zug auf die P -, S - und B -Grenze für Zugspannung ausüben. Diese Anspannungen auf Zug beeinflussen aber auch die $-P$ - und $-S$ -Grenze für Druckbeanspruchung. Umgekehrt beeinflusst die Anspannung auf Druck die $+P$ - und $+S$ -Grenze für Zug. Die Gesetze, nach denen diese Beeinflussungen verlaufen, sind die folgenden.

m) Durch eine Anspannung über die ursprüngliche $+P$ -Grenze hinaus wird die ursprüngliche $-P$ -Grenze des Stabes erniedrigt, und zwar um so mehr, je grösser die Anspannung war, Fig. 214.

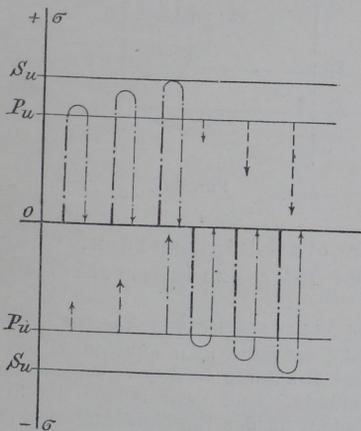


Fig. 214.

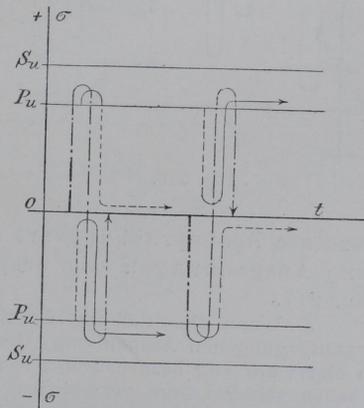


Fig. 215.

Schon verhältnissmässig geringe Ueberschreitung der $+P$ -Grenze wirft die $-P$ -Grenze bis auf Null herab.

Durch eine Anspannung über die ursprüngliche $-P$ -Grenze hinaus wird in gleicher Weise die $+P$ -Grenze bis auf Null herabgeworfen.

n) Wenn durch Anspannung im entgegengesetzten Sinne die $-P$ - oder

die $+$ P -Grenze durch Anspannung auf Druck, beziehentlich Zug [entsprechend dem früher besprochenen Gesetze a)] wieder gehoben und dann überschritten wird, so fällt sofort die P -Grenze für die entgegengesetzte Anspannungsart auf Null herab, Fig. 215.

Die Zeit der Ruhe nach der Entlastung ist bei diesen Vorgängen ohne, oder doch nur von geringem Einfluss, d. h. die durch entgegengesetzte Anspannung erniedrigte P -Grenze für Druck oder Zug hebt sich wenigstens im Verlauf der nächsten 3 bis 4 Tage nicht wieder, und im Laufe der nächsten Wochen, wenn überhaupt, so doch nur wenig, Fig. 221.

o) Eine durch entgegengesetzte Anspannung, die grösser ist als die ursprüngliche P -Grenze, herabgeworfene P -Grenze, kann durch allmählig anwachsende zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung wieder gehoben werden, aber nur bis zu einer Grösse, die beträchtlich unter der betreffenden ursprünglichen P -Grenze liegt, Fig. 216.¹⁾

p) Durch allmählig anwachsende, zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung kann die P -Grenze für die entgegen-

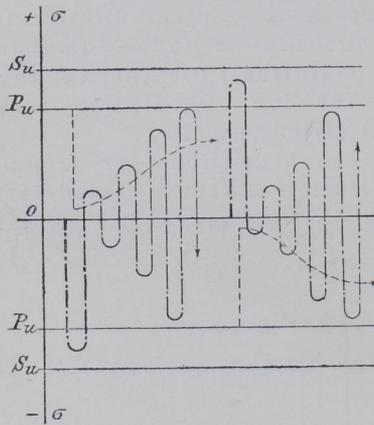


Fig. 216.

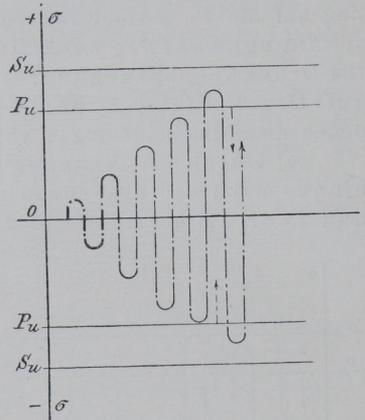


Fig. 217.

gesetzte Beanspruchungsart erst dann erniedrigt werden, wenn jene Anspannungen die ursprüngliche P -Grenze überschreiten, Fig. 217.

q) Wenn die Erhöhung der Streckgrenze abhängig ist von der Höhe der vorausgegangenen Anspannung (Gesetz a und b), so sollte man annehmen, dass in einem auf Zug beanspruchten Stabe sich diese Erhöhung in den verschiedenen Theilen seiner Länge verschieden gestalten müsste. Und zwar müsste die Erhöhung in der Stabmitte stärker als an den Enden, in der Einschnürung stärker als in den nicht eingeschnürten Theilen stattfinden, d. h. die Form der Dehnungsschaulinien (133, S. 84) müsste eine Aenderung erfahren, wenn der Stab mit Ruhepausen durch wiederholte Anspannungen zerrissen wird.

r) Um das Zutreffen dieser Ueberlegung zu prüfen, liess ich aus der gleichen Stange Flusseisen fünf Rundstäbe von 2,0 cm Durchmesser, $lq = 12,5 \sqrt{f}$ anfertigen

¹⁾ Man darf vermuthen, dass Erschütterungen und Ausglühen in gleichem Sinne wirken, was durch den Versuch festgestellt werden sollte.

und so prüfen, dass die Stäbe zunächst bis zur Höchstspannung σ_B angespannt wurden. Dann wurde die Dehnung in den einzelnen Theilungen ($l = 0,565 \sqrt{l}$) gemessen, und hierauf wurden die Stäbe nach verschieden langer Ruhepause wieder bis zum eintretenden Strecken angespannt, ausgemessen und wieder wie früher behandelt; die Versuche wurden unter Benutzung des Selbstzeichners der Maschine ausgeführt. Wenn auch die so erhaltenen Schaulinien nicht die reine Dehnung der Messlänge des Stabes darstellen [die Bewegungen der Trommel wurden von

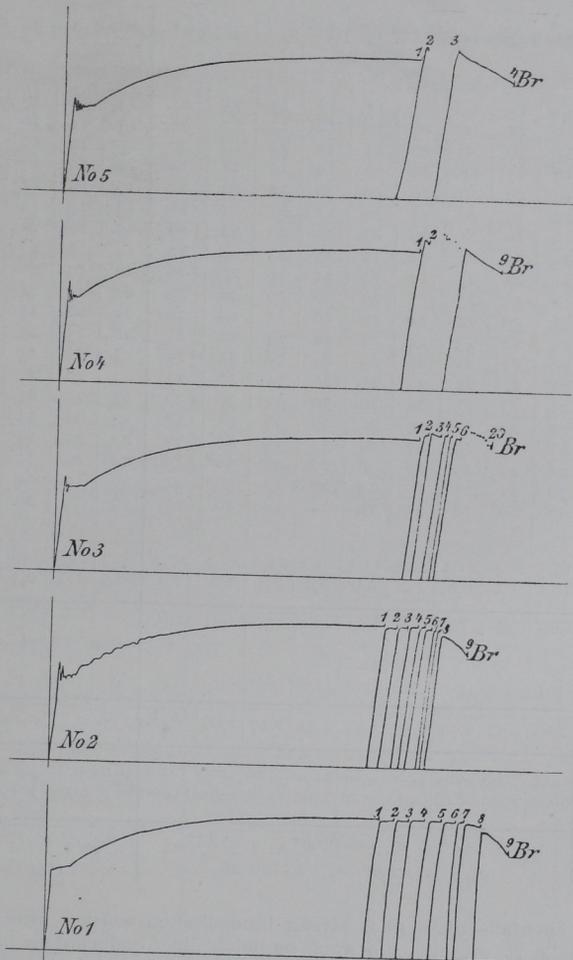


Fig. 218.

den Maschinentheilen abgeleitet], so geben die Schaubilder doch eine schnellere und verständlichere Uebersicht als Tabellen dies vermöchten; sie sind daher in Fig. 218 zusammengestellt. An die erste Schaulinie von jedem Stabe, die also das Verhalten des Materiales im ursprünglichen Zustande darstellt, sind lose die Schaubilder von den einzelnen Streckungen angereiht. Die Ruhepausen nach der Entlastung waren beim Stabe 1 so kurz wie möglich; beim Stabe 2 betragen sie etwa 1 Tag, und beim Stabe 3 anfangs eine Woche; leider ist dann aber infolge von Personalwechsel und Arbeitsüberhäufung eine längere Unterbrechung eingetreten, die sich störend bemerkbar machte. Für Stab 4 war die Dauer der Ruhepausen von je 1 Monat und für Stab 5 von je $\frac{1}{2}$ Jahr vorgesehen; diese Anordnungen

Tabelle 25. Einfluss wiederholten Streckens und der Ruhezeit

Theilung No.	Verlängerungen der einzelnen Theilung																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8
	Stab No. 1. $f = 3,15$ qem; $\sigma_s = 3270$ at									Stab No. 2. $f = 3,17$ qem; $\sigma_s = 3860$							
0-1	14	15	15	15	15	16	15	15	15	15	16	18	18	18	18	18	18
1-2	16	15	15	16	16	16	17	17	18	19	19	18	18	19	19	19	19
2-3	17	20	20	20	21	21	21	22	20	19	20	20	20	20	20	20	20
3-4	17	17	18	19	20	19	19	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19
4-5	19	20	19	20	20	20	22	22	22	17	16	17	17	18	18	18	18
5-6	19	19	20	21	20	21	21	21	21	17	17	18	18	17	17	17	17
6-7	19	20	21	20	23	22	22	22	22	17	18	19	19	18	18	18	18
7-8	21	22	22	24	23	25	23	23	23	18	18	17	18	19	19	19	19
8-9	21	22	23	24	24	24	26	26	26	19	19	20	19	20	20	21	21
9-10	20	23	23	25	26	26	26	26	26	22	23	24	24	22	22	21	21
10-11	21	23	24	24	25	26	25	26	26	23	22	25	25	28	30	30	30
11-12	22	22	23	24	24	24	24	25	25	25	25	25	27	29	28	29	29
12-13	20	22	21	23	25	24	26	25	25	22	24	25	27	27	29	28	28
13-14	21	22	24	27	25	26	24	27	27	23	26	25	27	26	26	27	27
14-15	21	23	25	24	29	30	31	30	30	23	25	25	25	26	25	24	26
15-16	22	22	24	27	30	33	38	45	58	22	24	25	26	27	30	31	31
16-17	21	23	26	27	29	35	35	44	77	23	25	16	28	30	32	34	43
17-18	21	22	25	26	28	27	33	30	30	24	24	25	28	28	30	33	36
18-19	20	21	21	21	23	26	22	30	24	20	19	24	24	24	26	24	26
19-20	17	19	18	20	20	20	19	20	20	19	19	20	20	21	20	21	21
Mittel	19,5	20,6	21,4	22,4	23,3	24,1	24,5	25,7	27,7	20,3	21,4	21,8	22,4	22,8	23,3	23,6	24,4
Unterschiede	19,5	1,1	0,8	1,0	0,9	0,8	0,4	1,2	2,0	20,3	1,1	0,4	0,6	0,4	0,5	0,3	0,8
Zeit Minuten	0	30	70	90	100	110	130	160	165	—	—	—	—	—	—	—	—
Tage	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	3	4	5	7	8
Ruhepause (Minuten) Tage	(0)	(30)	(40)	(20)	(10)	(10)	(20)	(30)	(5)	0	1	1	1	1	1	2	1
Kleinste f_1 qem	2,61	2,57	2,54	2,50	2,43	2,35	2,27	2,06	1,47	2,60	2,57	2,54	2,51	2,49	2,45	2,40	2,32
$\sigma = P/f$ at	5490	5500	5505	5510	5500	5490	5420	5400	5120	5610	5650	5620	5640	5610	5520	5560	5500
$\sigma_1 = P/f_1$ at	6630	6750	6820	6940	7120	7360	7550	8260	11000	6830	6980	7010	7110	7120	7150	7320	7520
	$\delta_{5,6} = 34,0\%$; $\delta_{11,3} = 29,5\%$; $q = 54\%$; $\sigma_B = 5510$ at; $\sigma_2 = 5120$ at									$\delta_{3,6} = 33,6\%$; $\delta_{10,3} = 29,0\%$; $q = 43$; $\sigma_B = 5650$ at; $\sigma_2 = 5340$ at							

sind indessen ebenfalls nicht ganz streng innegehalten worden, wie sich aus der folgenden Tabelle 25 ergibt, die auch zugleich die Aenderungen in den Streckgrenzen enthält, bezogen auf den ursprünglichen und den kleinsten Querschnitt im Stabe vor der jedesmaligen Anspannung.

s) Man sieht aus den Schaulinien Fig. 218, dass die Wirkung der Ruhe auf die Erhöhung der S -Grenze ganz deutlich sichtbar, bereits bei Stab 3 [1 Woche Ruhepause] hervortritt und sich bei den Stäben 4 und 5 in verstärktem Maasse zeigt. Ganz besonders tritt aber diese Erhöhung bei den letzten nach längerer Ruhepause ausgeführten Versuchen in Reihe 3, 4 und 5 hervor¹⁾; eine Bestätigung des Gesetzes $d)$ (314) von Bauschinger. Der erste Satz dieses Gesetzes, dass nämlich die Streckgrenze sofort fast auf die Grösse der vorausgehenden An-

¹⁾ Die Ergebnisse konnten nur als Punkte in die Schaubilder eingetragen werden, weil jedesmal nur die neue Streckgrenze und die bleibende Dehnung nach dem Versuch bestimmt wurden.

e Dehnungs-Schaulinie von Normalrundstäben aus Flusseisen.

$\epsilon \cdot 10^{-2}$ nach Versuch No.

2	3	4	5	6	10	15	20	1	2	3	4	5	6	8	1	2	3	
Stab No. 3. $f = 3,16$ qcm; $\sigma_s = 3750$ at								Stab No. 4. $f = 3,17$ qcm; $\sigma_s = 3680$ at								Stab No. 5. $f = 3,17$ qcm; $\sigma_s = 3650$ at		
16	16	16	16	16	16	17	17	16	17	17	17	17	18	18	17	17	17	
19	19	19	19	19	19	19	19	21	20	20	20	20	20	20	20	19	18	
20	20	20	20	20	20	19	19	22	23	22	22	23	22	22	21	23	23	
22	23	23	23	23	23	23	22	22	24	23	23	23	22	23	27	26	26	
25	25	25	25	24	25	26	25	21	20	20	20	21	20	21	31	31	33	
26	33	33	35	39	40	44	46	20	21	20	20	20	21	20	31	32	31	
26	34	37	38	41	44	50	58	19	19	20	20	20	21	20	25	25	25	
26	28	27	28	29	28	29	28	20	19	20	20	20	20	20	21	22	22	
23	24	25	23	24	24	24	24	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
24	23	22	23	23	22	22	23	24	21	22	22	21	22	22	20	20	20	
21	22	21	23	22	23	23	23	21	24	22	23	22	22	22	19	18	19	
22	20	22	21	21	22	21	21	22	22	22	23	22	22	22	20	19	18	
21	23	21	21	21	21	21	21	27	27	27	26	24	25	25	18	18	19	
21	21	21	21	21	21	21	21	26	30	30	30	32	31	33	20	20	20	
20	20	21	20	20	20	20	20	27	30	31	31	30	32	40	19	18	19	
21	19	22	21	20	21	20	21	24	26	26	27	27	28	33	17	17	18	
21	20	20	20	20	21	20	20	22	22	23	22	23	23	24	16	18	18	
19	20	20	20	21	21	22	21	20	21	20	21	21	20	19	17	18	16	
20	20	20	20	19	20	19	19	18	17	18	18	17	16	17	17	15	17	
21,7 0,4	22,5 0,8	22,8 0,3	22,9 0,1	23,2 0,3	23,6 0,6	24,1 0,5	24,5 0,4	21,7 21,7	22,2 0,5	22,3 0,1	22,4 0,1	22,4 0,0	22,4 0,0	23,2 0,8	20,8 20,8	20,8 0,0	20,9 0,1	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	14	21	28	35	368 ¹⁾	403	438	0	30	342	372	403	433	493	0	244	344	
7	7	7	7	7	333	5×7	5×7	0	30	312	30	31	30	60	0	244	100	
2,53	2,43	2,41	2,41	2,41	2,06	1,87	1,69	2,53	2,51	2,49	2,46	2,37	2,37	2,17	2,48	2,49	2,45	
5630 7020	5880 7610	5730 7510	5610 7360	5620 7380	5710 8800	5350 9100	5200 9700	5450 6820	5960 7510	6130 7820	6070 7840	6060 8140	6060 8140	5630 8300	5450 6950	5970 7600	6000 7780	
$\delta_{5,6} = 29,0\%$; $\delta_{11,3} = 24,6\%$; $l = 46\%$; $\sigma_B = 5880$ at; $\sigma_2 = 5200$ at								$\delta_{5,6} = -0\%$; $\delta_{11,3} = -0\%$; $q = -0\%$								$\delta_{5,6} = -0\%$; $q = -0\%$; $\delta_{11,3} = -0\%$		

spannung gehoben wird, entspricht ja der alltäglichen Erfahrung bei den meisten Materialien; er ist ohne weiteres aus den Schaubildern für Stab 1 und 2 abzulesen. Namentlich bei Stab 1 haben die an einander gereihten Schaubilder kaum einen anderen Verlauf, als man ihn erhalten haben würde, wenn man den Stab sofort ohne Entlastung zu Bruche gebracht hätte. Stab 3 bis 5 zeigen dagegen charakteristische Erhebungen über die voraufgehende Anspannung hinaus. Um bei den Schaubildern zu bleiben, sei noch auf den kurzen Verlauf der Linien in den einzelnen Wiederholungen verwiesen. Während sich diese kurzen Linien [im Gegensatz zu dem längeren Theil bis zur neuen Streckgrenze verstanden] bei Stab 1 und 2 bis zum Bruch ganz gut an den allgemeinen Verlauf der Schaulinie anschließen, wie sie ohne Entlastung gewonnen worden wäre, zeigen die Wiederholungen namentlich bei Stab 4 und 5 einen sofortigen Abfall der Linie nach Erreichung der neuen Streckgrenze. Das kann entweder durch

¹⁾ Zwischen Versuch 6 und 7 liegt ein Zwischenraum von 321 Tagen.

die Art der Versuchsausführung [die Versuche wurden auf der 50-ton-Pohlmeier-Maschine gemacht] bedingt sein, oder das Material wiederholt den Charakter der ersten Streckgrenze, der bei den Linien 2 bis 5 sehr klar hervortritt. Bei sehr langsamem Vorgehen, so dass die Trägheit der Massen im Kraftmessapparat möglichst wenig hervortritt, fällt häufig die Linie ganz plötzlich, wie in Fig. 219 in grösserem Maassstabe für verschiedene Fälle gezeichnet ist, um dann meistens nach einigen Schwingungen des Hebels den für viele Eisenarten charakteristischen Ansatz zu bilden, bis wieder regelrechtes Ansteigen der Linie erfolgt. Die Schwingungen, wie sie bei *a* angegeben sind, sind Schwingungen des Pendels um seine Ruhelage, die es annehmen würde, wenn der Abfall nicht so plötzlich eingetreten wäre. In *b* ist die Form der Schaulinie für diesen Fall verzeichnet.

Fig. 219.

der Schaulinie für diesen Fall verzeichnet.

Nachdem man in letzter Zeit diesen Vorgängen an der Streckgrenze erhöhte Aufmerksamkeit schenkte,¹⁾ ist es wohl wichtig, die Frage aufzuwerfen, ob der

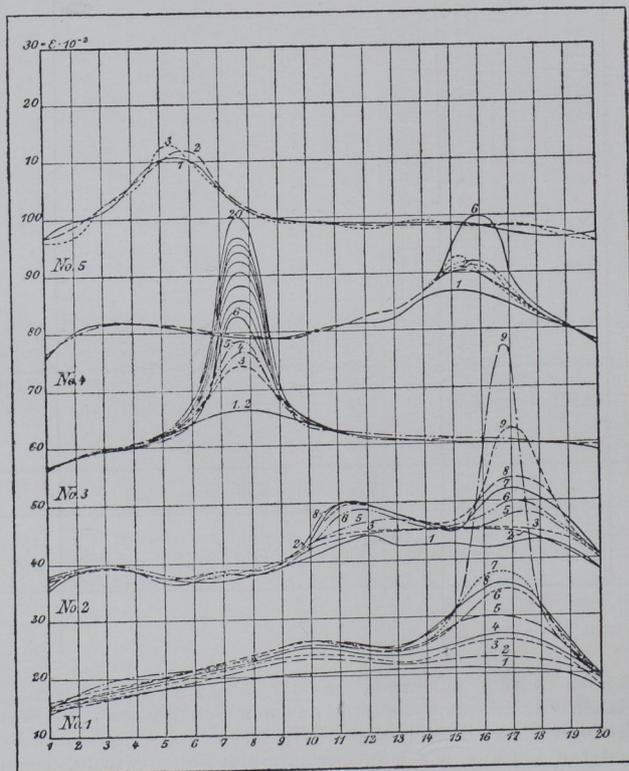


Fig. 220.

schnelle Abfall an der erhöhten Streckgrenze Aehnlichkeit mit diesen Vorgängen an der Streckgrenze im ursprünglichen Zustande des Materiales hat. Ich werde hierauf noch zurückkommen.

u) Um die oben unter *q*) gestellte Frage zu prüfen, trug ich nach den Beobachtungswerten, die ich a. a. O. ausführlicher besprechen will, die Dehnungs-

¹⁾ Man knüpfte hieran Betrachtungen über verschiedene allotrope Zustände des Eisens (Osmond u. a.).

schaubilder für jeden Versuch einzeln auf und zeichnete für jedes die Ausgleichsline unter möglichst getreuer Anschmiegung an die Einzelwerthe. Die Dehnungsschaulinien habe ich dann in Fig. 220 zusammengetragen.¹⁾ Diese Schaubilder deuten an, was selbstverständlich noch durch eine grosse Zahl von Versuchen mit anderem Material bestätigt werden muss, dass

beim Material im ursprünglichen Zustande, d. h. bei Wiederholung ohne nennenswerthe Ruhepause (Stab 1), der ganze Stab bei der wiederholten Anspannung an der Vergrösserung der Dehnung theilnimmt, dass aber der Hauptantheil auf die bei der ersten Anspannung am meisten gedehnten Stabtheile entfällt.

Man sieht an dem Linienverlauf deutlich, in welcher Weise die Einschnürung sich bildet. Bei Stab 2 liegen die Linien am Anfang links schon näher bei einander, aber es hat sich bei den Versuchen 6—9 links von der Haupteinschnürung noch eine zweite gebildet, und zwar an einer Stelle, die sich auch anfangs bereits stark dehnte. Die Linien für die Stäbe 3 bis 5 fallen der Hauptsache nach nahezu in einander, nur an der zuerst am stärksten gedehnten Stelle findet wesentliche Dehnung infolge der wiederholten Anspannung statt. Bei diesen Versuchen ist aber die für jede Anspannung erzeugte Theildehnung wesentlich geringer genommen als bei den vorausgehenden, so dass weitere Schlussfolgerungen aus der in die Augen springenden Abweichung nicht gezogen werden dürfen. Ich hoffe, dass diese unbeantworteten Fragen auch von anderer Seite verfolgt werden.

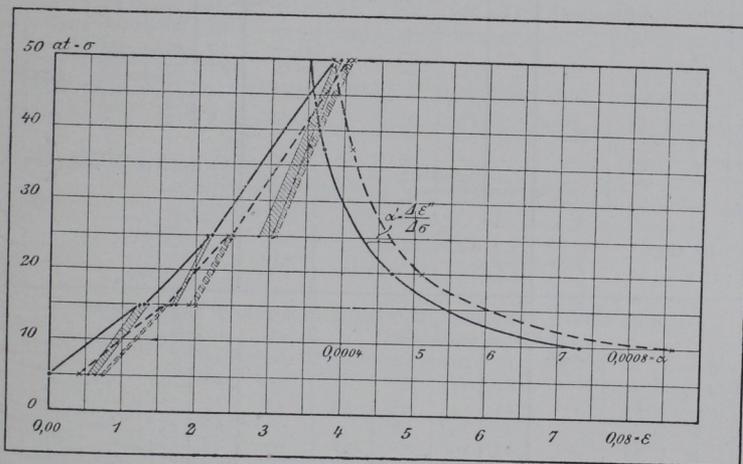


Fig. 221.

v) Durch die neueren Versuche über die Bestimmung des elastischen Verhaltens der Materialien, z. B. durch diejenigen von Bach (L 112. 136. 137), Hartig (L 179. 180), Martens (L 107. 109. 157) u. A. dürfte nunmehr wohl feststehen, dass in den meisten Stoffen durch hinreichend feine Messwerkzeuge in der Regel Änderungen des Materialzustandes mit jeder Beanspruchung einhergehen. Wenn man eine Anzahl von Belastungen und Entlastungen hinter einander vornimmt, so ändern sich fast stets die Ablesungen bei jedem Wechsel zwischen zwei Spannungsgrenzen. Sie nehmen nach einer gewissen Zahl von Wiederholungen gleichbleibende Werthe an, indem die bleibende Formänderung mit jeder folgenden Entlastung kleiner wird, bis zuletzt nur noch eine elastische Formänderung stattfindet. Die Formänderungen für die Spannungseinheit $\left(\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma}\right)$, die Dehnungs-, Biegungszahlen u. s. w., berechnet aus den Formänderungen im Zustande der schliesslich erreichten vollkommenen Elasticität, pflegen keine gleichbleibenden Werthe zu sein. Sie verändern sich vielmehr in sehr vielen Fällen mit der Höhe- lage der zu ihrer Ermittlung angewendeten Anspannungsgrenzen.

¹⁾ Aehnliche Bilder gab vor kurzem Pralon (L 102, Tome III S. 77—101).

Da man diesen Thatsachen in Zukunft mehr Beachtung wird zuwenden müssen, so möchte ich hier unter gleichzeitigem Hinweis auf die oben bereits genannten Quellen einen Versuch mit Lederriemen anführen, wie ihn meine Schüler in den Uebungen auszuführen pflegen. Ich gebe das Protokoll Tab. 26 und das

Tabelle 26. Prüfung eines Lederriemens auf seine elastischen Eigenschaften.

σ at	ε · 10 ⁻⁴	Unterschiede für		a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$	σ at	ε · 10 ⁻⁴	Unterschiede für		a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$	σ at	ε · 10 ⁻⁴	Unterschiede für		a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$
		Belastg. $\Delta \varepsilon''$	Entlastg. $\Delta \varepsilon'$				Belastg. $\Delta \varepsilon''$	Entlastg. $\Delta \varepsilon'$				Belastg. $\Delta \varepsilon''$	Entlastg. $\Delta \varepsilon'$	
5	0	—	—	—	15	132	—	—	—	25	221	—	—	—
15	122	122	—	—	25	215	83	—	—	50	383	162	—	—
5	53	—	69	—	15	169	—	46	—	25	287	—	96	—
15	129	76	—	—	25	218	49	—	—	50	387	100	—	—
5	58	—	71	—	15	172	—	46	—	25	292	—	95	—
15	136	78	—	—	25	220	48	—	—	50	389	97	—	—
5	58	—	78	—	15	173	—	47	—	25	295	—	94	—
15	135	77	—	—	25	221	48	—	—	50	392	97	—	—
5	62	—	73	—	—	—	—	—	—	25	300	—	92	—
15	134	72	—	—	—	—	—	—	—	50	393	93	—	—
5	60	—	74	—	—	—	—	—	—	25	303	—	90	—
15	136	76	—	—	—	—	—	—	—	5	142	161	—	—
5	63	—	73	—	—	—	—	—	—	5 ¹⁾	142	6	—	—
15	136	73	—	—	—	—	—	—	—	1) Nach 1 Minute abgelesen.				
5	66	—	70	—	—	—	—	—	—					
15	137	71	—	—	—	—	—	—	—					
5	64	—	73	—	—	—	—	—	—					
$\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 73$; $\varepsilon' = 64$				730	$\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 47$; $\varepsilon = 41$				470	$\Delta \sigma = 25$ at; $\Delta \varepsilon'' = 93$; $\varepsilon' = 82$				372

Geprüft am 12. December 1896 (nach nochmals 7 Tagen Ruhe).

5	41	—	—	—	15	161	—	—	—	25	251	—	—	—
15	158	117	—	—	25	243	82	—	—	50	403	152	—	—
5	73	—	85	—	15	191	—	52	—	25	303	—	100	—
15	159	86	—	—	25	247	56	—	—	50	407	104	—	—
5	74	—	85	—	15	196	—	51	—	25	309	—	98	—
15	161	87	—	—	25	249	53	—	—	50	412	103	—	—
5	74	—	87	—	15	200	—	49	—	25	309	—	103	—
—	—	—	—	—	25	250	0	—	—	50	411	102	—	—
—	—	—	—	—	15	200	—	50	—	5	134	—	277	—
$\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 86$; $\varepsilon' = 33$				860	$\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 51$; $\varepsilon' = 39$				510	$\Delta \sigma = 25$ at; $\Delta \varepsilon'' = 103$; $\varepsilon' = 58$				412

Schaubild Fig. 221, indem ich wegen der Bedeutung des Versuchs für die Fragen des Riemenbetriebes auf Bach (*L 137. 181*) verweise.

Die Versuche sind mit einem Riemenstück ausgeführt worden, das vor 560 Tagen bereits einmal bis zum Zerreißen geprüft worden war. Das Stück Kernleder von $0,8 \times 10,0 = 8,00$ qm Querschnittsfläche und $0,75$ kg/m Gewicht [Raumgewicht $r = 0,94$ gr/ccm] wurde, mit Marken im Abstände $l = 100$ cm versehen, am 5. und 12. December 1896 geprüft. Es ergab dann die in Tab. 26 niedergelegten Werthe.

In Fig. 221 beziehen sich die ausgezogenen Linien auf den ersten, die punktierten auf den zweiten nach 7 Tagen Ruhepause ausgeführten Versuch. Die zwischen den feinen Linien liegenden schraffirten Flächen geben das Feld an, innerhalb dessen die Formänderungen bei wiederholten Belastungen verlaufen.

Aus der Veränderung der Neigungen dieser Felder mit wachsender Spannung und aus dem Verlauf der beiden Linien für a'' erkennt man den Gang der Aenderungen der Dehnungszahl a für den rein elastischen Zustand; sie wird kleiner mit wachsender Spannung und verändert sich bei Wiederholung des Versuches nach voraufgegangerer Ruhe.

Auch die längst bekannten und vielfach gut beobachteten Veränderungen, die viele Metalle beim kalten Bearbeiten, z. B. beim Drahtziehen, Kaltwalzen, Hämmern u. s. w. erfahren, kann man schliesslich mit zu den in diesem Abschnitt besprochenen Eigenschaftsänderungen zählen, denn die Eigenschaftsänderungen erstrecken sich in den genannten Fällen ganz besonders auf die Elasticitäts- und auf die Streckgrenze.

3. Arten und Ausführung des Wöhlerschen Dauerversuches.

315. Wenn auch die Beschreibung der Dauerversuchsmaschinen für später vorbehalten bleiben soll, so wird es doch zweckmässig sein, die Konstruktionsgrundsätze, besonders der Wöhlerschen Maschinen, schon an dieser Stelle kurz anzugeben, um das Verständniss zu erleichtern; man wird dann spätere Beschreibungen kürzen können.

Bei den Dauerversuchen kann man die gleichen Hauptbestandtheile unterscheiden, wie bei den Festigkeitsprobirmaschinen (62); es werden hier die gleichen Bezeichnungsweisen benutzt.

316. Für Zugbeanspruchung konstruirte Wöhler seine Maschine nach dem in Fig. 222 schematisch gegebenen Grundsatz. Die Kraftmessung

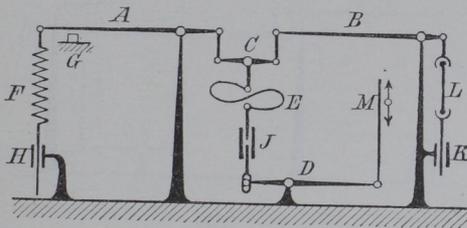


Fig. 222.

erfolgt durch die Feder F , die auf den Hebel A wirkend, diesen auf den Anschlag G niederzieht. Durch die Schraube H kann man der Feder eine bestimmte Spannung ertheilen. Der Hebel A steht durch den Zwischenhebel C mit dem Hebel B durch Gehänge in Verbindung. Der Hebel B trägt die Einspannvorrichtung für den Probestab L , der in der Verschraubung K sein Widerlager am Maschinengestell findet. Der Antrieb geschieht von der Wellenleitung des Arbeitsraumes aus vermittelt eine excentrische Scheibe, die die Zugstange M auf und nieder bewegt. Der Hebel D überträgt diese Bewegung durch die Verschraubung J und Feder E auf das Zwischenstück C .

Wenn nun die Feder E durch den Hebel D gespannt wird, so wird sie in den Gehängen von C Kräfte erzeugen, die gleich der halben Anspannung der Feder E sind. Durch Regelung der Verschraubung J wird die Spannung in E allmählig gesteigert, bis die auf den Hebel A wirkende Theilkraft im Stande ist, den Hebel gerade von dem Anschlag G abzuheben. In diesem Augenblick hat diese Theilkraft genau den Betrag, der ihr durch die Messfeder F zugewiesen werden soll. Die am anderen Ende von C

wirkende Theilkraft hat gleiche Grösse, weil beide Arme von C gleich lang sind. Diese Kraft wird nun durch den Hebel B zehnmal vergrössert auf den Probestab übertragen, dessen grösste Spannung somit von der Regelung der Feder F abhängig ist.

Der Hebel D gewährt im Angriffspunkte des Gestänges zur Feder E einen Spielraum, derart, dass nach der völligen Entlastung der Feder E der Hebel D immer noch einen kleinen Weg durchlaufen kann, ohne eine Kraft nach oben abzugeben. E nimmt in diesem Falle also gewissermassen die Rolle eines starren Zwischengliedes an; der Probestab erfährt bei jedem Auf- und Niedergang von D einen Spannungswechsel zwischen Null und dem von F vorgeschriebenen grössten Betrage.

Wird aber durch Regelung der Verschraubung J die Feder E bei der Anfangslage des Hebels D in Spannung versetzt, so wird auch in dieser Anfangslage im Probestabe L noch die entsprechende Spannung verbleiben und der Spannungswechsel erfolgt nunmehr zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze. Auch die untere Grenze wird, wie man sah, vermittelt der Messfeder F geregelt.

317. Seine Maschine für Biegungsbeanspruchung konstruirte Wöhler nach dem gleichen Grundsatz, wie folgt. Die Kraftmessvorrichtung und die Art ihrer Wirkung bleibt die gleiche; der Probestab L (Fig. 223)

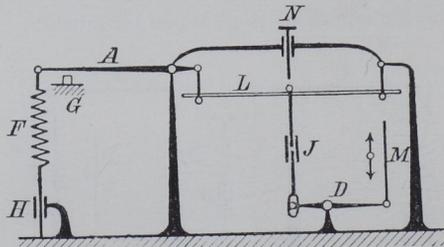


Fig. 223.

tritt an die Stelle des Hebels C . Die Verschraubung J wird so lange nachgestellt, bis der Hebel A durch den von M ausgeübten Zug gerade zum Abheben gebracht wird. Die Feder F regelt in diesem Falle also den Widerlagerdruck von L und damit die Höchstspannung im Stabe. Soll die Spannung zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze schwanken, so stellt man mittelst F zunächst den der unteren Spannungsgrenze entsprechenden Auflagerdruck an L her und schraubt dann, nach Erzeugung der betreffenden Spannung und Durchbiegung im Stabe, die Schraube N so tief nieder, dass der Stab die erzeugte Durchbiegung nicht wieder aufgeben kann, auch wenn der Hebel D ganz entlastet wird. Hierauf wird durch Verlängerung von F der der Höchstspannung entsprechende Widerlagerdruck eingestellt und dann durch Nachspannen von J dafür Sorge getragen, dass bei jedem Hub der Hebel A gerade von G abgehoben wird.

318. Bei den Maschinen für Biegung in allen durch die Stabaxe gelegten Ebenen traf Wöhler die Einrichtungen so, dass der Stab L (Fig. 224) ganz fest in die mittelst Schnurscheibe S in ihren Lagern AB gedrehte Welle W eingefügt wird. Der Probestab L wird durch die am Stabende

angreifende Feder F in eine bestimmte Biegungsspannung versetzt. Alle ausserhalb der neutralen Mittelfaser gelegenen Fasern erfahren bei jeder vollen Umdrehung wechselnde Zug- und Druckspannungen. Bei dieser Art

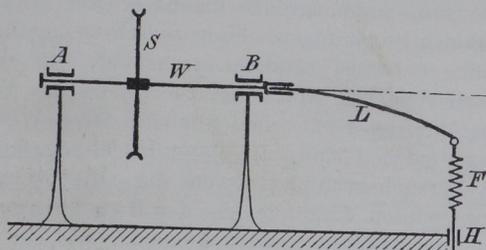


Fig. 224.

der Inanspruchnahme herrschen die grössten Spannungen nur im gefährlichen Querschnitt, also am Uebergang zur Einspannung.

319. Die Wöhlersche Maschine zur Ausführung der Dauerversuche auf Verdrehung hat folgenden Konstruktionsgrundsatz, Fig. 225. Sie ist sowohl für rechts, als auch für links drehende Momente eingerichtet, und man kann auch beide abwechselnd wirken lassen. Die Kraftmessung geschieht, wie früher, durch die Federn F und F_1 . Der Probestab ist in L senkrecht zur Ebene der Zeichnung angebracht und an dem einen Ende mit dem Doppelarme BB_1 , an dem andern mit dem Antriebshebel D fest verbunden. Bei der Bewegung von D legt sich die Nachstellschraube N oder N_1 auf das Ende des Hebels A oder A_1 und bringt ihn zum Abheben

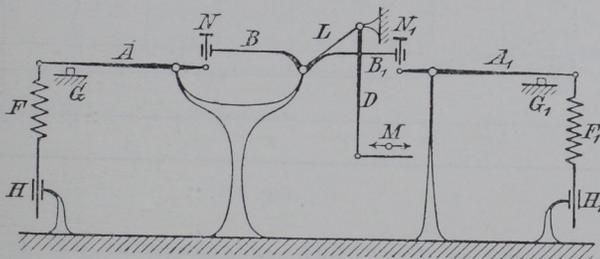


Fig. 225.

von G oder G_1 . Hierdurch wird ein bestimmt bemessenes Drehmoment erzeugt. Sollen abwechselnd rechts und links drehende Momente benutzt werden, so stellt man beide Schrauben N und N_1 so ein, dass bei jedem Doppelhube von D die beiden Hebel A und A_1 gerade von G und G_1 abgehoben werden.

4. Ergebnisse der Wöhlerschen Versuche.

320. Wenn die Bauschingerschen Gesetze auch noch des weiteren Ausbaues und der Bestätigung ihrer allgemeinen Gültigkeit bedürfen, so haben sie doch den Weg zum Verständniss der Vorgänge bei den Dauerversuchen bereits eröffnet.

Nach dem Gesetz k (314) kann man erwarten, dass ein Körper un-

zählige Anstrengungen zwischen Null und einer oberen Grenze vertragen wird, wenn diese obere Grenze so bemessen wurde, dass sich infolge der wiederholten Anspannungen die P -Grenze von ihrer ursprünglichen Lage bis über die obere Anspannungsgrenze hinaus erheben kann.

Für den Fall des Spannungswechsels zwischen Zug und Druck lassen die Gesetze n und o (314) es rätlich erscheinen, die obere Spannungsgrenze allmählich zu steigern, weil sonst zu Anfang des Versuches Ueberanstrengungen des Materiales entstehen können, deren Wirkungen nachher nicht wieder gut zu machen sind. In dieser Beziehung fehlt es aber noch an ausreichenden Versuchsgrundlagen, da die unter den ebengenannten Umständen zu erwartenden Vorgänge aus den Bauschingerschen Gesetzen noch nicht erschöpfend erkannt werden können.

321. Die Aufgabe der Dauerversuche ist es, für verschiedene Arten der Inanspruchnahme und für alle wichtigen Konstruktions-

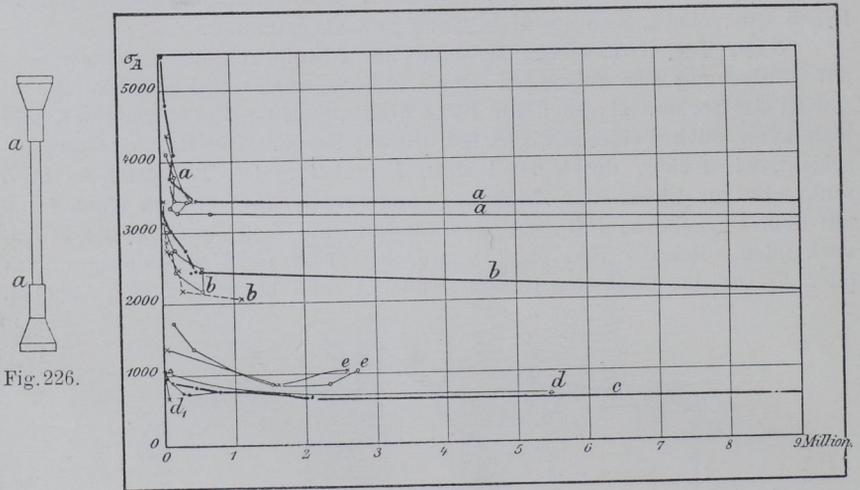


Fig. 227.

materialien diejenige Spannung aufzusuchen, die letztere ertragen können, ohne dass durch eine sehr grosse Zahl von Anspannungen der Bruch herbeigeführt wird. Diese Spannung wurde (312) die Arbeitsfestigkeit σ_N des Materiales für die betreffende Beanspruchungsart genannt.

Wöhler hat versucht, diese Spannungsgrenzen unmittelbar durch den Dauerversuch festzustellen. Zu dem Zweck hat er Stäbe aus gleichem Material und von gleicher Form mit verschiedenen Anspannungsgrenzen geprüft und die Zahl n der Anspannungen festgestellt, die von seinen Stäben bis zum Bruch vertragen wurden. Aus den Ergebnissen dieser Versuche lassen sich Schaulinien ableiten, deren Verlauf gesetzmässig ist, und aus denen man dann leicht die Grenzspannungen, d. h. die Arbeitsfestigkeiten erkennen kann. Es wird aus den in Abs. 310 angegebenen Gründen genügen, hier den allgemeinen Charakter und die grossen Züge der Ergebnisse mitzutheilen; ich benutze hierbei im Wesentlichen die Versuchsreihen von Wöhler und Spangenberg (L. 174, 175).

322. Für die Zugversuche (316, Fig. 222) wandten Wöhler und Spangenberg Stäbe von der in Fig. 226 dargestellten Form an, bei denen die Uebergänge an den Ecken a entweder durch eine Hohlkehle oder unvermittelt, scharf unter rechtem Winkel stattfanden. In Fig. 227 giebt Gruppe a die Zahl n der Anspannungen an, die angewendet werden mussten, um einen auf Zug zwischen den Grenzen Null und $+\sigma_A$ beanspruchten Stab obiger Form zum Bruch zu bringen. Die Zahl n der Anspannungen σ_A nimmt mit fallendem σ_A zu; die durch die beobachteten Werthe gelegte Ausgleichlinie fällt also und berührt die Gerade σ_N , Fig. 228, asymptotisch. Diese Gerade entspricht derjenigen Spannung σ_N , durch welche kein Bruch mehr erzeugt wird, d. h. der Arbeitsfestigkeit des Materiales bei oft wiederholter Zugbeanspruchung zwischen 0 und $+\sigma_N$.

Die Arbeitsfestigkeit für Zugbeanspruchung unter den genannten Umständen kann man für die untersuchten Materialien wie folgt annehmen:

- A) Zugbeanspruchung; Stäbe mit Hohlkehle
- | | | |
|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| a) Gussstahl | $\sigma_N = 3000$ at | } siehe Fig. 227. |
| b) Eisen | " = 2000 at | |
| c) Gusseisen und d) Bronze | " = 600 at | |
| e) Phosphorbronze | " = 700 at ¹⁾ | |

323. Einen ganz ähnlichen Verlauf würden die Linien zeigen, welche die Zahl der Anspannungen darstellen, die auf Biegung (317, Fig. 223) zwischen Null und σ_A beanspruchte Stäbe bei abnehmenden Werthen für σ_A bis zum Bruch ertragen. Auch hier findet sich aus den Versuchen die Assymptote σ_N in gleicher Weise, wie in Fig. 228 dargestellt.

Die Arbeitsfestigkeit für Biegungsbeanspruchung

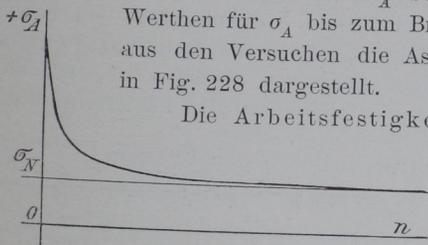


Fig. 228.



Fig. 229.

unter den genannten Umständen kann man nach den Versuchsergebnissen für die untersuchten Materialien etwa wie folgt annehmen:

- B) Biegungsbeanspruchung
- | | |
|--------------|----------------------|
| a) Gussstahl | $\sigma_N = 3300$ at |
| b) Eisen | " = 2300 at |
| c) Bronze | " = 800 at |

Auch für den Fall, dass die Stäbe auf Durchbiegung unter gleichzeitiger Drehung des Stabes, also zwischen $+\sigma_A$ und $-\sigma_A$, wechselnd, geprüft werden (318 Fig. 224) haben die Schaulinien einen ähnlichen Verlauf wie in Fig. 228. Unter diesen Umständen und bei der in Fig. 229 gezeichneten Stabform [bei a Hohlkehle oder scharfer Uebergang], beträgt die Arbeitsfestigkeit der untersuchten Materialien etwa:

¹⁾ Diese Werthe können selbstverständlich nicht verallgemeinert werden, zumal der Materialcharakter im Laufe der Jahrzehnte ein ganz anderer geworden ist, als er den von Wöhler und Spangenberg benutzten Stäben entsprach.

C) Biegung nach allen Seiten, Stäbe mit Hohlkehle

- a) Gussstahl $\sigma_N = 1800$ at
 b) Eisen „ = 1300 at
 c) Kupfer „ = 800 at.

324. Eine wesentlich höhere Anspannung σ_A kann das gleiche Material vertragen, wenn man die Spannung nicht auf Null zurückgehen, sondern die Anspannung σ_A zwischen einem Minimum und Maximum schwingen lässt. Die Ergebnisse solcher Versuche lassen sich für Biegungsbeanspruchung (317, Fig. 233) in der

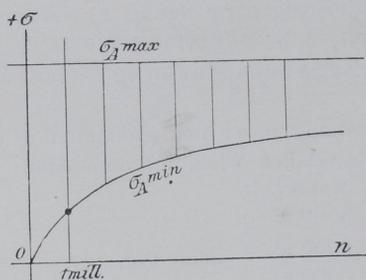


Fig. 230.

in Fig. 230 dargestellten Weise veranschaulichen. Die Linienzüge geben die Anzahl der Anspannungen n bis zum Bruch an, die das Material verträgt, wenn man es zwischen der durch die Ordinaten des Linienzuges $\sigma_{A \max}$ gegebenen oberen Grenze und einer durch die Ordinaten des Linienzuges $\sigma_{A \min}$ angegebenen unteren Grenze schwingen lässt; die Abscisse giebt die Zahl n der Anspannungen an, die den Bruch herbeiführen.

Entnimmt man unter Zuhilfenahme einer solchen Darstellung aus den Wöhler-Spangenberg'schen Versuchen nach ungefährender Schätzung diejenigen Spannungsgrenzen, die nach 1 Million Anspannungen den Bruch bei ungehärtetem Federstahl herbeiführten, sowie die Spannungsgrenzen, bei denen ein Bruch überhaupt nicht mehr zu erwarten ist, für die also $n = \infty$ wird, so kann man folgende kleine Tabelle niederschreiben:

E) Biegungsbeanspruchung zwischen den Grenzen.

a) obere	} σ_A	max at	4000	4790	5470	6150	6840
untere		min at	0	1300	2200	3300	4100
für Bruch nach $n = 1$ Million							
Unterschied $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ at			4000	3490	3270	2850	2740
b) untere σ_A		min at	0	1500	2500	3800	4500
für Bruch nach $n = \infty$							
Unterschied $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ at			3700 ¹⁾	3290	2970	2350	2340

Aus diesen Zahlen geht hervor, dass nicht allein die Höhe der Maximalanspannung für die Widerstandsfähigkeit des Materiales gegen oft wiederholte Anspannung maassgebend ist, sondern dass hierbei ganz besonders auch die Grösse der Schwingung, die Amplitude, in Frage kommt. Je höher die obere Grenze der

1) Obere Grenze für $\sigma_{\min} = 0$ war $\sigma_{\max} = 3700$ at.

Anspannung heraufrückt, desto kleiner muss der Schwingungsausschlag werden, wenn nicht durch oft wiederholte Beanspruchung der Bruch erzeugt werden soll. Die Grenze für σ_{\min} muss schneller wachsen als diejenige für σ_{\max} .

Wöhler hat bei seinen Dauerversuchen ganz besonders auch die Verderblichkeit der scharfen Uebergänge von einem Querschnitt eines Konstruktionstheils zum anderen erwiesen und so eine alte Erfahrung des Maschinenbaues zahlenmässig bestätigt.

Die Wöhlerschen Erfahrungen über die Wirkung der scharfen Ansätze kommen in folgenden Zahlen zum Ausdruck.

Bei den Versuchen auf Biegung unter Umdrehung der Stäbe um ihre Axe (323) ergaben die aus einer Eisenbahnaxe geschnittenen gleichen Stäbe, von denen ein Theil scharf abgesetzt, der andere mit Hohlkehle versehen war:

a) Eisen, Stäbe mit Hohlkehle $\sigma_N = 1300$ at,

b) „ Stäbe scharf abgesetzt „ = 1000 at,

die Arbeitsfestigkeiten in den Fällen a und b verhalten sich also wie 100:77.

Auch für Zugfestigkeit hat Wöhler die Schädlichkeit der scharfen Uebergänge erwiesen. Er fand die Anzahl n der zum Bruch führenden Anspannungen für

a) Stahl, bei $\sigma_A = 3130$ at $n = 13,6$ Mill. Hohlkehle

„ = 2050 at $n = \infty$ „ scharf abgesetzt

b) Eisen, bei $\sigma_A = 2460$ at $n = 0,41$ „ Hohlkehle

„ = 2460 at $n = 0,04$ „ scharf abgesetzt

also, wenn man die in Vergleich gestellten Zahlen als nahezu unter gleichen Umständen gefunden gelten lässt, eine erhebliche Verminderung des Sicherheitsgrades durch den scharfen Ansatz.

Hier ist es nothwendig, nochmals auf den Gegensatz zu den früher besprochenen Erfahrungen zu verweisen. Aus Absatz 99 bis 104. S. 59—65 ergab sich, dass wegen ihrer Wirkung als Stabköpfe, die scharfen Ansätze eine Erhöhung der Festigkeit zur Folge haben und zwar konnte bei den Zugversuchen mit Schraubenbolzen (S. 64) eine Erhöhung von fast 20% nachgewiesen werden. Wie sich hier aus den Wöhlerschen Versuchen ergibt und aus der Erfahrung von Alters her bekannt ist, bedeutet aber diese Erhöhung der Festigkeit noch keineswegs eine Erhöhung des Sicherheitsgrades des Konstruktionstheiles, an dem der scharfe Ansatz vorhanden; vielmehr erscheint der Sicherheitsgrad an dieser Absatzstelle ganz erheblich verringert; in welchem Maasse dies geschieht, darüber geben die Zahlen des vorigen Absatzes genügend Auskunft. Der Grund der Sicherheitsverminderung scheint mir aber der gleiche zu sein, den man früher (100 bis 103) für die Festigkeitserhöhung in Anspruch nahm. Die Festigkeitserhöhung tritt ein, weil die Formänderungsfähigkeit im gefährlichen Querschnitt durch die scharfen Uebergänge vermindert wird. Aus gleichem Grunde ist aber in den scharfen Uebergängen die Arbeitsfähigkeit vermindert. Die Formänderungen [Längen- und Querschnittsänderungen] erstrecken sich bei allmählichem Uebergang auf eine verhältnissmässig grössere Materialmenge, als bei scharfem Uebergang; das Arbeitsvermögen der Raumeinheit wird also im gefährlichen Querschnitt in geringerem Maasse in Anspruch genommen, wenn allmähliche Uebergänge vorhanden sind.

5. Neuere Dauerversuche.

325. Bei der in Absatz 318 Fig. 224 beschriebenen Wöhlerschen Dauerversuchsmaschine für wechselnde Biegung in verschiedenen Ebenen [Biegung unter Umdrehung des Stabes] wird der Stab nur in

dem gefährlichen Querschnitt neben der Einspannstelle voll beansprucht. Die nach den Bauschingerschen Gesetzen (314) zu erwartenden Aenderungen der Materialeigenschaften und die etwaigen von der Arbeitsleistung des Materiales abhängigen Aenderungen seines Gefüges und seiner physikalischen Eigenschaften gehen also vorwiegend nur in einer kleinen Stabstrecke vor sich.

Um die grösste Spannung über eine grössere Länge gleichmässig zu vertheilen und hierdurch die Möglichkeit zu gewinnen, die während des Dauerversuches im Material vorgegangenen Veränderungen besser feststellen zu können, konstruirte ich im Jahre 1885 für die Charlottenburger Versuchsanstalt eine Maschine nach dem Schema Fig. 231 derart, dass der Stab L die ganze Länge aa_1 hat und in den Lagern A und A_1 drehbar, aber derart beweglich gelagert ist, dass die Lager den Biegungen des mittleren Stabtheiles folgen können. Beanspruchen ihn unter diesen Umständen an den beiden gleich langen Hebeln Aa und A_1a_1 gleiche Kräfte F und F_1 , so erfährt der Stab in der ganzen Länge bei gleichbleibendem Querschnitt eine gleichmässige Beanspruchung.

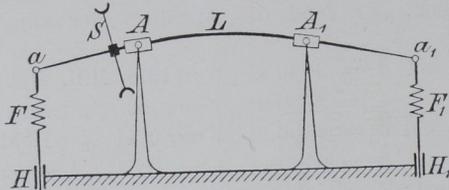


Fig. 231.

Alle im Material wegen der oft wiederholten Anspannungen durch wechselnde Zug- und Druckspannung auftretenden Aenderungen müssen sich nun auf den ganzen prismatischen Stabtheil zwischen A und A_1 gleichmässig erstrecken. Sie werden sich also durch eine nachträgliche sorgfältige Festigkeitsprüfung in der Zerreiissmaschine besser bemerkbar machen müssen, als es bei der vorher beschriebenen Anordnung möglich war.

Um den Zerreiissversuch schnell und bequem durchführen zu können, ist der Theil des Stabes zwischen AA_1 so geformt, dass der Stab nach dem Abschneiden der Enden Aa und A_1a_1 einen Normalrundstab von 2,0 cm Durchmesser liefert.

Der Versuch selbst wird so angeordnet, dass aus einem grossen gewalzten Block neben einander eine Reihe von Probestäben entnommen wird. Einer dieser Stäbe wird mit einer Spannung, die über die Arbeitsfestigkeit des Materiales sehr wahrscheinlich hinausgeht, in die Maschine gebracht und so lange gedreht, bis der Bruch erfolgt.

Da die Arbeitsfestigkeit sich durch den Versuch nur auf sehr langwierigem Wege feststellen lässt, so mussten die anzuwendenden Arbeitsfestigkeiten in Wirklichkeit bei den Versuchen geschätzt werden. Bei dem sehr verschiedenen Charakter des zur Verfügung stehenden Materiales waren diese Schätzungen mit vielfachen Missgriffen verbunden, so dass die noch immer nicht abgeschlossenen Versuche einen sehr viel grösseren Zeitraum in Anspruch nehmen werden, als ursprünglich vorgesehen wurde. Ein Beweis, wie mir scheint, dass die Dauerversuche noch erheblich ausgedehnt werden sollten, da die Ergebnisse in so hohem Maasse vom Charakter des Materiales abhängen (*L 110*, S. 136).

Nach erfolgtem Bruch des ersten Stabes werden die Schwesterstücke

in die Maschine gelegt und bei gleicher Anspannung mit $\frac{1}{5}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{4}{5}$ der zum Bruch erforderlichen Umdrehungen beansprucht. Hierauf werden die Enden der Stäbe abgeschnitten und die Stäbe auf der Festigkeitsprobiermaschine geprüft. Die so gewonnenen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen von Normalrundstäben aus unbeeinflusstem Material des gleichen Blockes verglichen. Ausser diesen Prüfungen werden noch mikroskopische Untersuchungen über etwaige Gefügeänderungen infolge der oft wiederholten Anstrengung unternommen.

326. Dauerversuche wurden, wie schon angedeutet, auch in England und Amerika mehrfach ausgeführt, so z. B. von Kennedy, Howard u. A. Im Massachusetts Institute of Technology in Boston, Mass., ist beispielsweise eine Maschine ganz ähnlicher Art im Betriebe, wie sie vorhin beschrieben wurde; sie ist nach dem Schema Fig. 232 konstruiert. Gleiche Theile tragen die gleichen Bezeichnungen wie in Fig. 231. Der Stab L wird durch die Feder F mittelst des Hebels B gespannt und mittelst einer eigenartigen federnden Kuppelung durch eine biegsame Wellenleitung in

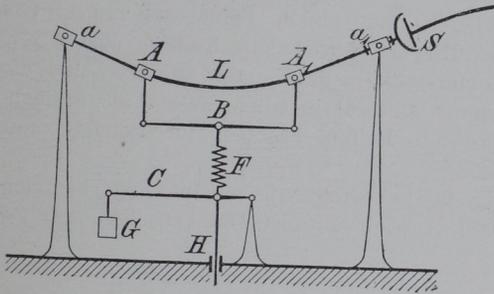


Fig. 232.

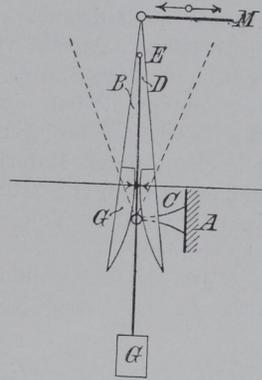


Fig. 233.

der Minute 500 mal umgedreht. Die Spannung der Feder geschieht mittelst des Kontrollgewichtes G am Hebel C . Die Feststellung durch die Klemme in H . Der Antrieb erfolgt durch einen Tag und Nacht laufenden Elektromotor. Von Zeit zu Zeit werden die elastischen Durchbiegungen im Ruhezustande und in verschiedenen Stablagen gemessen.

327. Eine Maschine, um Körper gleichzeitig auf Zug- und Biegebungsbeanspruchung zu prüfen, konstruirte ich für die Charlottenburger Versuchsanstalt; ihr Schema ist in Fig. 233 dargestellt. Diese Maschine ist hauptsächlich für die Prüfung von Drähten, Litzen und dünnen Seilen benutzt worden, um Beziehungen zwischen dem Rollendurchmesser und der Seilkonstruktion von Seiltrieben u. s. w. aufzusuchen. Der zu prüfende Draht wird in E an einem Hebel B befestigt, der von der Schubstange M um den Festpunkt A in schwingende Bewegung versetzt wird. Der mit dem Gewicht G belastete Draht legt sich bei jeder Schwingung des Hebels gegen die Backen CC , die nach einem Kreisbogen von bestimmtem Halbmesser geformt sind. Der Draht erfährt also bei jeder Schwingung des Hebels neben seiner Zugbeanspruchung noch Biegebungsbeanspruchungen. Die Lage des Schwingungspunktes A gegenüber den Kurvenstücken C wird so gewählt, dass die Seitenbewegungen der Probe möglichst klein ausfallen. Aufgabe des Versuches ist es, die Zahl der Biegungen festzustellen,

die ein Draht, die Litze eines Seiles oder das Seil selbst, bei verschiedener Konstruktion der Proben, um Rollen von bestimmtem Halbmesser bei gleichzeitigen Zugbeanspruchungen vertragen kann. Die Seilscheibendurchmesser müssen so bemessen werden, dass neben grösster Leistungsfähigkeit des Triebwerkes der Seilverbrauch möglichst gering wird.

328. Die Beschreibung eines von mir für die Charlottenburger Anstalt konstruirten Fallwerkes, mit welchem Seile und Seilverbindungen auf oft wiederholte Schlagbeanspruchung unter gleichzeitiger Belastung auf Zug geprüft wurden, gab ich bereits in Abschnitt 232 (*L 153*).

329. Wöhler hat auch Schlagdauerversuche angestellt, um die Wirkung der Radstösse auf das Material an den Fugen der Schienenköpfe zu studiren. Er liess hierbei auf die Schienenköpfe einen mechanisch angetriebenen Hammer schlagen (*L 157*).

330. Eine ähnliche, von H. Meyer konstruirte Maschine hatte die französische Westbahn 1878 in Paris ausgestellt; sie diente dazu um fertig aufgezoogene Radreifen auf dem Radgestell vor der Inbetriebnahme durch eine bestimmte Anzahl von Schlägen mit einem 8 kg schweren Hammer zu probiren (*L 183*, S. 39). Die Bahnverwaltung hatte seit dem Jahre 1875 über 56000 Reifen durch Schlägen mit einem Schmiedehammer von 8 kg Gewicht¹⁾ probiren lassen. Hierbei waren 243 Reifen, also 2,3% gebrochen, deren Material (Bessemerstahl — das heutige Material und die jetzigen Befestigungsarten sind ganz andere) in allen Fällen als schlecht erkannt wurde. Von den erprobten Reifen brachen im Betriebe nur sehr wenige.

Die Maschine [Schema Fig. 233] besteht aus einem Federhammerwerk *F*, das durch mechanischen Antrieb mittelst Daumenscheibe *D* ge-

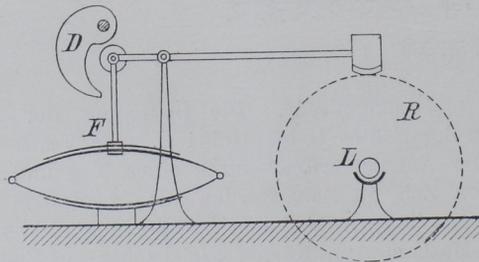


Fig. 234.

spannt wird und 50 bis 60 Schläge in der Minute auf die Reifen des in seinen Lagern *L* unterstützten und langsam gedrehten Radgestelles *R* abgibt. Die Konstruktionszeichnungen sind in der Quelle auf Taf. VII gegeben.

331. Dauerversuche, die den Zweck hatten, die Güte verschiedener

¹⁾ Das zweckmässige Hammergewicht wurde besonders an Versuchsreihen ermittelt, die in der Quelle mitgetheilt sind, indem man mit verschiedenen Schmiedehämmern Stahlkegel in einen Bleiblock eintreiben liess, die bei jedem Schläge erreichte Eindringungstiefe mass, und nun durch fallende Gewichte die gleichen Kegel in das Blei eintreiben liess. Die Fallhöhe wurde so lange geändert, bis man gleiche Eindringetiefen erhielt wie bei den Schlägen aus freier Hand; man gewann aus den hierfür ermittelten Fallarbeiten ein Maass für die von Menschen mit verschiedenen schweren Hämmern geleistete Schlagarbeit.

Radreifenbefestigungen durch den Versuch zu erproben, wurden von Büte (*L 184*) ausgeführt. Bei diesen Versuchen lagerte das fertige Radgestell in seinen Achsbüchsen und wurde unter Druck gegen Scheiben angepresst, welche die Schienen vorstellend, so in Umdrehung versetzt wurden, dass die Geschwindigkeiten des Eisenbahnbetriebes erzielt werden konnten. Die Kränze der Scheiben waren unrund und mit Absätzen versehen, so dass die im Betriebe vorkommenden Stösse, namentlich auch die Seitenstösse, nachgeahmt wurden. Die Konstruktionszeichnung ist in der Quelle angegeben.

332. Kürzlich sind in der Versuchsansalt zu Charlottenburg Dauerversuche eingeleitet worden, welche bezwecken, die Arbeitsfestigkeit von Gefässen [Kohlensäureflaschen] mittelst Wasserdruck festzustellen. Bei diesen Versuchen werden Flaschen gleicher Fertigung aus ganz dem gleichen Material unter verschiedenen hohen Anspannungen dem oft wiederholten Wasserdruck ausgesetzt, um diejenige Anspannung aufzufinden, die bei sehr grosser Zahl von Wiederholungen den Bruch nicht mehr herbeiführt. Die Versuche sollen zugleich auch Aufklärung darüber bringen, ob die jetzt vorgeschriebene Wiederholung der amtlichen Druckprobe Gefahr oder Nutzen bringt (*L 185*).

Ganz ähnliche Versuche in noch grösserem Umfange mit Rohrleitungen unter den den hohen Dampfdrucken entsprechenden Hitzegraden sind geplant.

6. Brucherscheinungen beim Dauerversuch.

333. Wie schon im Absatz *324* erwiesen, tritt der Bruch bei den Dauerversuchen bei einer viel geringeren Anspannung ein, wenn der Stab scharfe Ansätze hat, als wenn er mit Hohlkehlen versehen ist. Es ist aber eine bei den Dauerversuchen allgemein gemachte Erfahrung, dass die Stäbe für Dauerversuche ausserordentlich sauber bearbeitet, ja womöglich polirt sein müssen, wenn nicht irgend eine ganz geringfügig erscheinende Ursache den frühzeitigen Bruch herbeiführen soll. Während beim gewöhnlichen Zugversuch selbst Marken, die rings um den Stab eingerissen sind, sehr selten Anlass zum Bruch an diesen Stellen sind, muss man die Marken zum Ausmessen der Längendehnungen bei Zug-Dauerversuchen sehr vorsichtig anbringen, wenn der Bruch nicht durch sie beschleunigt werden soll. Deswegen werden diese Marken in der Charlottenburger Anstalt meistens als sehr feine Kreuze ausgeführt, deren Schenkel unter 45° gegen die Stabaxe geneigt sind.

Findet der Bruch im Querschnitt statt, der die Marken trägt, so wird man immer finden, dass die Bruchlinien von diesen winzigen Fehlstellen ausstrahlen, ein Zeichen, dass diese Stellen in der That den Anlass zum Bruch gaben.

Die Bruchformen und Brucherscheinungen bei Dauerversuchen sind ausserordentlich charakteristisch, so dass man in den allermeisten Fällen mit Sicherheit sagen kann, ob ein vorgelegter Bruch durch plötzliche grosse Ueberanstrengung des Materiales entstanden ist, oder ob viele oft wiederholte kleine Ueberanstrengungen den Bruch herbeiführten. Verschiedene durch den Dauerversuch erzielte Bruchformen sind auf Tafel 2, Fig. 20—23 und 25 abgebildet. Die charakteristischen Eigenschaften sind in Folgendem zu besprechen.

334. Man bemerkt an den meisten Abbildungen und weit deutlicher noch an den Probestücken selbst; die früher (122. 210. 276) schon besprochenen Bruchlinien, von einem Punkte ausstrahlend. Der Ausstrahlungspunkt liegt meistens im Umfang des Stabquerschnittes, was erklärlich wird, wenn man bedenkt, dass in den meisten Fällen hier die am stärksten gespannten Fasern liegen [beim Zugversuch (122) ist der Bruchpunkt Ausgang der Strahlung; beim Biegungsversuch (276) und beim Dauerbiegeversuch unter gleichzeitiger Drehung (318. 323) ist das noch ausgesprochenere der Fall; beim Verdrehungsversuch ist die Lage der stärkst gespannten Faser noch abhängig von der Querschnittsform (L 137, § 34)].

Der Ausstrahlungspunkt bildet meistens [die nachfolgende Beschreibung bezieht sich immer auf Flusseisen, wenn nichts anderes gesagt ist] den Mittelpunkt einer elliptisch begrenzten Fläche von sehr feinkörnigem Gefüge, wie in Fig. 235 schematisch angedeutet, an das sich oft mit ganz scharfer

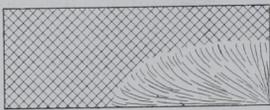


Fig. 235.

Abgrenzung das gröber krystallinische Gefüge anschliesst. Diese elliptische Grenzlinie geht, je nach der Querschnittsform, je nach dem Ort des Strahlungspunktes am Querschnittsumfang und je nach dem Antheil der elliptischen Fläche an der Gesamtquerschnittsfläche, mehr oder minder in die Kreislinie oder die Gerade über.

Die elliptische Fläche bildet sich bei Zugversuchen so gut wie bei Biegungs- und Verdrehungsversuchen aus, nur nimmt bei letzteren die Bruchfläche die schon in der Taf. 2, Fig. 25 und 30 dargestellte charakteristische Form nach Schraubenlinie und Meridianfläche an.

In der elliptischen Fläche bemerkt man häufig concentrisch verlaufende elliptische Ringflächen, deren Begrenzungen dann alle nahezu senkrecht zu den Bruchlinien stehen. Diese Erscheinungen führen ohne weiteres auf diejenigen des muscheligen Bruches über, den sehr viele Körper zeigen, und den man besonders leicht an glasartigen Körpern studiren kann.

335. Der muschelige Bruch ist charakterisirt durch wellenförmige, elliptische Ringe, die concentrisch zu einander verlaufend, oft in Gruppen angeordnet sind, Fig. 236. Senkrecht zu den Wellen, oft über Berg und Thal fortlaufend, bemerkt man fast immer mehr oder weniger feine Strahlen. Diese Strahlen werden um so feiner und zahlreicher, je flacher die Wellen werden. Glas zeigt alle diese Erscheinungen ganz besonders charakteristisch, und zufällig gefundene Glassplitter waren es, die zu folgenden Beobachtungen führten.

Mit blossem Auge bemerkt man an den muscheligen Flächen eines solchen Glassplitters leicht die Thatsache, dass, vom Strahlungspunkte ausgehend, die Strahlen (Bruchlinien) sich jedesmal in zwei Aeste zu spalten pflegen, sobald sie über den Rücken einer elliptischen Welle fortschreiten. Diese Spaltungen wiederholen sich fast bei jedem Uebergange, und die Strahlen werden hierbei zuletzt so fein, dass starke mikroskopische Vergrößerung sie erst wieder sichtbar macht. Die Wellen haben in der Nähe des Strahlungspunktes [Ausgangspunkt des Bruches] ihre grösste Tiefe; sie werden immer flacher, je mehr sie sich von ihm entfernen, so dass sie zuletzt ebenfalls nur mit dem Mikroskop an den Formen der Strahlen erkannt werden können. In den tiefen Wellen [in der Nähe des Strahlungs-

punktes] sind die Strahlen nur auf die Wellenthäler beschränkt; sie gehen erst ein wenig später über die Rücken der Berge fort. Fig. 236 [beide untere Bilder] giebt ein Bild von dem Aufbau der Strahlen.

Man bemerkt aus Fig. 236 [unten], dass die Strahlen aus einer steil

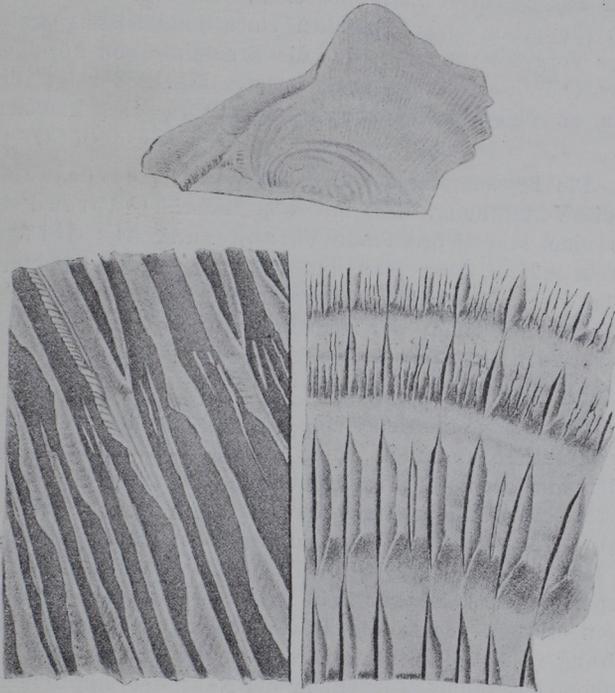


Fig. 236.

und aus einer schwach abfallenden, fast ebenen Fläche gebildet werden; diese Eigenthümlichkeit behalten sie bei, auch wenn sie mikroskopisch klein werden. Die Neigungswinkel beider Flächen scheinen ziemlich gleichbleibend



Fig. 237.

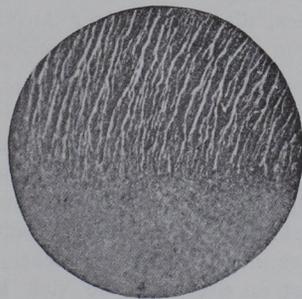


Fig. 238.

zu sein; man sieht daher in den Wellenthälern beide Flächen breiter werden und gegen die Berge sich zuspitzen.

Die Erscheinungen dieser muscheligen Brüche von Glas sind von ganz

ausserordentlicher Regelmässigkeit und erinnern an die Regelmässigkeit der Krystallformen. Man wird sehr leicht die Aehnlichkeiten dieser Erscheinungen mit den früher in den Absätzen 122, 210 und 276 beschriebenen Bruchformen, namentlich mit den bei den Biegungsversuchen (276, Taf. 2, Fig. 27 und 28) beschriebenen entdecken. In Fig. 237 theile ich noch einen durch Einkerbten und Abbrechen eines Stahlmeissels erzielten Bruch in dreifacher Vergrösserung mit, der die Bruchlinie von körnigem Material in besonders charakteristischer Form zeigt. Fig. 238 zeigt die Gabelung der Strahlen an einer Bruchfläche körnigen Materiales in vierfacher Vergrösserung.

336. Die Betrachtung der Brüche von Dauerversuchen erweckt gar leicht die Vermuthung, dass mit dem Material während des Dauerversuches eine sehr tiefgreifende Veränderung des Gefüges vor sich gegangen sein müsste, denn man findet das feine, oft sammetartig erscheinende Gefüge der Ellipsenflächen in schroffem Gegensatz zu dem groben, oft krystallinischen Gefüge der sonstigen Bruchfläche. — Und doch ist es unwahrscheinlich, dass wesentliche Gefügeänderungen im Material stattgefunden haben (*L 186*).

337. Wenn man ein solches eine möglichst ebene Bruchfläche tragendes Bruchstück [Stahl] so abschleift, dass gerade nur die Brucherscheinungen verschwinden und dann die Bruchflächen polirt und ätzt, so findet man bei mikroskopischer Untersuchung der geätzten Fläche die elliptische Begrenzungslinie nicht wieder, die doch in der Bruchfläche so ausserordentlich scharf erschien (*L 186*). Das Gefüge hat in Folge der wiederholten Anspannungen keine zur Zeit mit dem Mikroskop wahrnehmbaren Aenderungen erlitten. Auch die Härte scheint nach den Versuchen von Spangenberg (*L 175*) [die allerdings nach der in Abs. 348 beschriebenen Einhiemethode ausgeführt wurden] in der Nähe der elliptischen Zone keine andere zu sein, als in der Nähe der krystallinischen. Bauschinger (*L 2*, H. 13, S. 43) zieht aus seinen Versuchen und Beobachtungen ebenfalls den Schluss, dass durch Dauerversuche das Gefüge nicht verändert wird, weil bei Zugversuchen auch solche Stäbe, die eine sehr grosse Zahl von Anspannungen bereits ertragen haben, doch mit allen gewöhnlichen Brucherscheinungen des Zugversuches reissen, während Stäbe ganz gleichen Materiales, die viel weniger Anspannungen aushielten, mit allen Brucherscheinungen des Zug-Dauerversuches reissen.

338. Ausser den vorbesprochenen Erfahrungen mahnt aber auch das zum Studium des muscheligen Bruches weiter oben benutzte Vorbild zur Vorsicht bei Rückschlüssen aus dem Bruchaussehen auf das Gefüge des Materiales. Dass im Glase jene überaus regelmässige und gesetzmässige Gefügeanordnung, wie sie in Fig. 236 dargestellt ist, nicht im Material ursprünglich vorhanden ist, kann durch Betrachtung des noch unzerbrochenen Glases im polarisirten Licht mit grosser Schärfe nachgewiesen werden. Selbst an Stücken, die sich hierbei als vollkommen gleichartig und spannungsfrei erweisen, können durch einen einzigen Schlag in kürzester Zeit alle Erscheinungen des muscheligen Bruches erzeugt werden, und man sieht daher klar, dass diese so ausserordentlich regelmässige Anordnung des Bruchgefüges erst im Augenblick des Bruches entsteht, dass sie nur eine Eigenthümlichkeit der Bruchfläche ist und dass ein allein aus dem Bruch-

aussehen abgeleiteter Rückschluss auf Gefügeänderung im Stabe als Folge der oft wiederholten Anstrengungen nicht zulässig ist.

339. Die Frage, ob und in welchem Maasse eine sonstige Aenderung der Materialeigenschaften als Folge des Dauerversuches eintritt, kann nur in der früher besprochenen Weise (325) durch wiederholte Untersuchung nach geschehener Anstrengung entschieden werden. Auch Bauschinger hat diesen Weg betreten und sowohl die von ihm aufgestellten, früher (Abschnitt i 2) besprochenen Gesetze als auch seine neueren Versuchsergebnisse lassen eine Veränderung der *P*-Grenze, der Dehnungszahl *a* und der *S*- und *B*-Grenze vermuthen. Leider kann man aus seinen Dauerversuchen (*L* 2, *H*. 13), bei denen die Stäbe mitten im Dauerversuch zur Feststellung der Veränderungen mehrfachen Streckungen ausgesetzt wurden, den Einfluss der Zeit nach dem Strecken auf die Veränderungen (Gesetz *c*, S. 208) der Materialeigenschaften nicht ausscheiden. Diese Aenderungen spielen sich im Stabe, wengleich in anderem Maasse, sicher auch dann ab, wenn der Stab nicht in Ruhe bleibt (Abs. 53), sondern weiter dem Dauerversuch unterworfen wird.

340. Auch die Brucherscheinungen bei Dauerversuchen mit nicht gleichmässig gefügten Körpern, z. B. von Schweisseisen u. s. w., sind meistens charakteristisch, indessen würde ihre Aufzählung mehr in eine Sonderabhandlung über die Dauerversuche überhaupt oder über die Eigenschaften bestimmter Materialien gehören. Auf die oben beschriebenen Erscheinungen bin ich hier nur so ausführlich eingegangen, um den inneren gesetzmässigen Zusammenhang aller unter den Absätzen 117—128, 210, 211, 272—276 beschriebenen Brucherscheinungen noch einmal hell zu beleuchten.

k. Härteprüfung.

341. Die Härte eines Materiales ist eine Eigenschaft, die der Maschinenbauer häufig in Anspruch nimmt, die er zuweilen hoch schätzt, wenn er auch nur selten versucht, sie zu messen. Die Technologen haben sich von jeher lebhaft mit dieser Eigenschaft beschäftigt und haben häufig versucht, die Härte der Materialien durch das Maass festzustellen. Die Mineralogen bestimmen regelmässig die Härte ihrer Stoffe. Man sollte also glauben, dass der Begriff der Härte, auch für unsere praktischen Zwecke ausreichend, so vollkommen klar festgestellt sei, wie es z. B. bei der Festigkeit, Elasticität u. s. w. der Fall ist. Aber für keine Eigenschaft der Materialien trifft diese Voraussetzung weniger zu, als auch heute noch für die Härte und die Zähigkeit.

Man hat die Härte zu allen möglichen Eigenschaften in Beziehung gebracht und daher versucht, ihr Maass durch das Maass dieser Eigenschaften auszudrücken. Man findet auf diesem Gebiete in der Literatur sehr viel Unklarheit und sehr stark widerstrebende Anschauungen. Manche Vorstellungsweisen haben sich aber so sehr eingebürgert, dass man sie häufig durcheinander benutzt und für das gleiche Material, je nach den Umständen, einmal den einen, das andere mal den anderen Maassstab anzulegen pflegt, was natürlich zuweilen Verwirrung schafft. Dieser Zustand ist eben nur deshalb möglich, weil es zur Zeit in der Technik noch keine ausreichende und allgemein anerkannte Begriffsfestlegung für die Eigenschaft

der Härte giebt. Auch ich vermag sie nicht zu bieten und werde mich daher darauf beschränken, die verschiedenen Vorstellungen und darauf gegründeten Messverfahren kurz zu besprechen.

342. Am meisten verbreitet ist die Begriffsfestlegung:

Härte¹⁾ ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen [härteren] Körpers entgegensetzt.

Diese Auslegung wird in der einen oder der anderen Auffassung den meisten in Vorschlag gebrachten Härtemessverfahren zu Grunde gelegt.

343. Die grösste Verbreitung hat das Verfahren der Mineralogen, welche die Härte des zu untersuchenden Körpers relativ zu der als bekannt angenommenen Härte bestimmter Mineralien feststellen, indem sie das Probestück mit scharfen Ecken dieser Körper zu ritzen suchen oder diese Körper mit den Ecken des Probestückes ritzen. Hierbei findet natürlich nur ein Vergleich, eine Einordnung des fremden Körpers nach seiner Härte zwischen zwei bekannte Körper verschiedener Härte statt. Um diese Einordnung in einheitlicher Weise ausführen zu können, hat man sogenannte Härteskalen gebildet, z. B. die sehr viel benutzte Härteskala von Mohs, indem man bekannte Mineralien, die leicht in nahezu gleichem Zustande zu bekommen sind, durch gegenseitiges Ritzen ihrer Härte nach ordnete und die einzelnen Stufen mit Nummern bezeichnete. Die Mohssche Skala lautet:

1. Talk	}	mit dem Fingernagel ritzbar.
2. Steinsalz [oder Gips]		
3. Kalkspath —	}	Härte einer Kupfermünze.
4. Flussspath		
5. Apatit	}	ein biegsamer eiserner Nagel hat Härte 4,5.
6. Orthoklas [Feldspath]		
7. Quarz [Feuerstein]	}	gewöhnliches Fensterglas hat Härte 5,5. eine Feile hat Härte 6,5.
8. Topas		
9. Korund	}	ritzen Glas. schneiden Glas.
10. Diamant		

Ein untersuchter Körper gehört beispielsweise zur Härtestufe 5, wenn er von Feldspath geritzt wird, aber alle vorhergehenden Körper der Skala ritzt. In feiner Schrift gab ich nach Leunis andere Körper an.

344. Für Metalle hat Dumas eine ähnliche Skala aufgestellt. Aber man darf es wohl aussprechen, dass uns Techniker das mineralogische Verfahren bei der Härtebestimmung von Metallen im Stich lässt, weil es sehr schwer ist, hierfür eine Skala festzustellen, die einen unveränderlichen Maassstab gewährt. Denn ist es schon sicher, dass die gleichen Mineralien der Mohsschen Skala in Stücken von verschiedener Herkunft nicht ganz gleiche Härte haben, so ist von den Metallen bekannt, dass sie nur sehr schwer rein zu bekommen sind, und dass ihre Härte selbst in reinem Zustande durch Art und Umfang der voraufgehenden mechanischen Behandlung verändert werden kann. Die geringfügigste chemische Veränderung kann aber schon sehr erhebliche Aenderungen in der Härte herbeiführen. Würde dies nicht der Fall sein, so dürfte sich

¹⁾ Schon im Absatz 5 S. 5 ist darauf aufmerksam gemacht, dass ein Gegensatz zwischen Härte und Weichheit nicht besteht. Demgemäss wird letztere hier auch nicht besonders behandelt. Die Weichheit ist ein minderer Grad von Härte und muss daher in gleicher Weise ausgedrückt werden.

schon längst für Metalle eine ähnliche Härteskala eingebürgert haben, wie für die Minerale.

345. Die Härte der Metalle ist ganz besonders von der chemischen Zusammensetzung abhängig, dies ist in hervorragendem Maasse beim Eisen der Fall, dessen Härte und Härbarkeit bekanntlich in aussergewöhnlichem Maasse durch den Kohlenstoffgehalt beeinflusst wird. Weil nun diese Thatsache im Eisenhüttenfache jeden Tag hervortritt, ist es zur Gewohnheit geworden, auch dann von weichem oder hartem Eisen [Stahl] zu reden, wenn man an die mechanische Härte unmittelbar gar nicht denkt, sondern eigentlich nur die chemische Zusammensetzung im Auge hat. Im Besonderen nennt man Eisen oder Stahl weich, wenn verhältnissmässig wenig Kohlenstoff zugegen oder hart, wenn der Kohlenstoff reichlicher vorhanden ist; freilich trifft die Thatsache fast immer zu, dass der Widerstand des Eisens gegen Formänderung beim Schmieden, Hämmern, Feilen oder bei sonstiger Bearbeitung mit dem Kohlenstoffgehalt zunimmt, das kohlenstoffreichere Material also härter erscheint. Man hat aus den vorerwähnten Gründen namentlich für den Werkzeugstahl sogenannte Härteskalen nach wachsendem Kohlenstoffgehalt geordnet aufgestellt.

346. Weil wieder die elektrische Leitungsfähigkeit, die Magnetisirbarkeit, das Aufnahmevermögen für Magnetismus und andere Eigenschaften abhängig sind von der chemischen Beschaffenheit und wie diese parallel gehen mit der Härte, so hat es auch nicht an Vorschlägen gefehlt, die Härteordnung des Eisens aus dem elektrischen, thermoelektrischen oder magnetischen Verhalten zu bestimmen. v. Waltenhofen, v. Kerpely, Barus u. A. m. (*L 196; 197, S. 37; 198*).

347. Ferner hat man durch Erfahrung oft gefunden, dass feste Körper in der Regel zugleich hart zu sein pflegen, und deswegen hat sich die Gewohnheit eingebürgert, nach den Ergebnissen des Festigkeitsversuches ebenfalls ohne weiteres von harten und weichen Metallen zu sprechen.

348. Dass diese Zustände im praktischen Leben dazu beitragen müssen, die schon bestehenden Schwierigkeiten der Begriffsfeststellung für die Härte zu vermehren, liegt auf der Hand; aber man wird diese bereits sehr fest eingewurzelten Gewohnheiten nicht mehr ändern können und wird mit ihnen rechnen müssen. Dazu kommt nun noch der Umstand, dass unter passender Veränderung der zu Anfang gegebenen landläufigen Begriffserklärung für die Härte im mechanischen Sinne eine grosse Menge von Vorschlägen für die Methode der Härtemessung gemacht ist, so dass es mir unmöglich wird, auf alle einzeln einzugehen. Ich will mich vielmehr damit begnügen, eine Uebersicht über die verschiedenen Verfahren zu geben und nur die Hauptgesichtspunkte besprechen, die für den einen oder andern meiner Leser vielleicht von Werth werden könnten.

Die meisten der vorgeschlagenen Härtemessverfahren kann man in folgende Gruppen einordnen:

- I. Die Härte wird durch Eindringen eines zweiten Körpers bestimmt,
 - A. indem der eindringende Körper seinen Ort auf der zu prüfenden Körperfläche nicht ändert, Eindringungsverfahren;
 - B. indem der eindringende Körper sich gegen den zu prüfenden Körper verschiebt, ihn ritzt, Ritzverfahren.

II. Die Härte wird aus den Festigkeitseigenschaften des Materiales abgeleitet.

Bei Gruppe IA kann man folgende Untergruppen bilden:

1. Eindruckverfahren. Ein Stempel wird durch ruhigen Druck in das zu prüfende Material eingetrieben, und hierbei wird entweder
 - a) die Eindringungstiefe bei stets gleichem Druck, oder
 - b) der zur Erzeugung einer bestimmten Eindringungstiefe erforderliche Druck gemessen.
2. Einhiebverfahren. Ein Stempel wird durch fallendes Gewicht in das zu prüfende Material eingetrieben und hierbei entweder
 - a) die Eindringungstiefe bei gleicher Schlagleistung, oder
 - b) die zur Erzeugung einer bestimmten Eindringungstiefe erforderliche Schlagleistung gemessen.

Bei Gruppe IB kann man folgende Untergruppen bilden:

1. Die relative Härte wird mit Hülfe einer Reihe von verschiedenen harten Probekörpern festgestellt.
2. Ein ritzender Körper wird gegen das Probestück gedrückt und hierbei entweder
 - a) der Druck gemessen, welcher nöthig ist, um für die Wege- oder Zeiteinheit einen bestimmten Theil des Probekörpers fortzuarbeiten, oder
 - b) der Verlust wird gemessen, den das Material durch den ritzenden Körper bei bestimmter Belastung in der Wege- oder Zeiteinheit erleidet, oder
 - c) der Druck wird bestimmt, welcher eben noch ausreicht, um an dem Probekörper eine Spur von bestimmter Breite zu hinterlassen, oder
 - d) die Spurbreite wird gemessen, welche unter einer bestimmten Belastung des ritzenden Körpers erzeugt wird.

349. Bei den Eindringungsverfahren, Gruppe IA, werden in der Regel Stempel aus hartem Stahl benutzt, denen von den einzelnen Forschern verschiedene Formen gegeben worden sind. Die Form der Stempel, ihre Härte, die Beschaffenheit ihrer Oberflächen, die Art des Eintreibens u. a. m. ist bei diesen Versuchen von Einfluss, und man kann mit zwei Apparaten oder Verfahren gleicher Art bei demselben Körper nur dann dieselben Gütezahlen finden, wenn die maassgebenden Theile der Apparate und die Versuchsausführung in allen Fällen genau gleich sind. Da aber der Stempel Abnutzungen unterworfen ist und es praktisch schwer ist, Stempel von durchweg gleicher Härte zu erzeugen, so ist es bei allen diesen Verfahren nothwendig, sich eine Reihe von Probekörpern zu halten und zwischen den einzelnen Härteprüfungen immer wieder auf diese Körper zurückzugehen, um sich von dem Unverändertsein der Stempel zu überzeugen. Man giebt den Stempeln natürlich solche Formen, dass sie durch Nachschleifen jederzeit genau wieder hergestellt werden können. Man hat dann sein Hauptaugenmerk auf eine zweckmässige und ganz gleichmässige Härtung der Stempel zu legen. Die gebräuchlichsten Stempelformen sind in Fig. 238 abgebildet (*L 189. 192. 199—201*).

Bei der Form *a* misst man die Länge des Eindruckes, bei *b* dessen Durchmesser, bei *c* und *ca* wird bei Anwendung der Kugelfläche (Auerbach) der Druck bestimmt, der angewendet werden muss, damit bei spröden Körpern ein Sprung, oder bei zähen Körpern gerade der erste bleibende

Eindruck erzeugt wird. In der Charlottenburger Anstalt wurden von Rudeloff, unabhängig von Föppl [der dieses Verfahren zuerst veröffentlichte], an Stelle der Kugelflächen Auerbachs, gekreuzte Cylinder benutzt, Fig. 239 *ca*. Ich selbst benutzte noch früher, zum Vergleich von Messerschneiden untereinander, unmittelbar die gekreuzten Klingen, also Cylinder mit sehr kleinem Halbmesser. Bei Form *d* wird die Eindringungstiefe festgestellt und auch wohl der hieraus berechnete Rauminhalt der verdrängten Masse als Maass für die Härte benutzt [United States Ordnance Department]. Calvert und Johnson nahmen diejenige Belastung des Stempels *d* an, die ihn bei bestimmten Abmessungen in einer halben Stunde um ein bestimmtes Maass [3,5 mm] eindringen machte. Keep benutzte einen Stempel *e*, dessen untere Fläche 100 kleine Pyramiden trug und auf den ein Schlagmoment von 288 kg cm [25 Pfd. aus 1 m Höhe] ausgeübt wurde. Dieser Stempel wurde nun so an das Probestück angesetzt, dass mit je

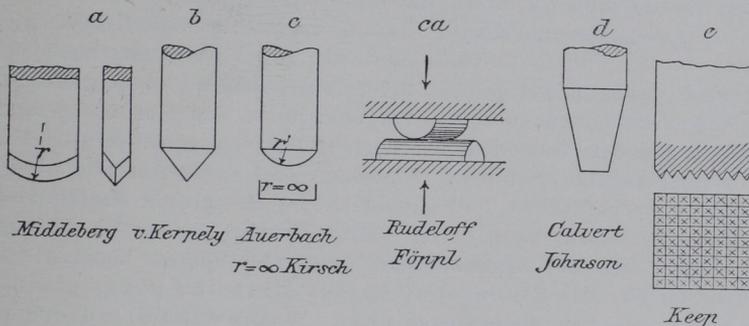


Fig. 239.

dem Schläge die Zahl der auftreffenden Pyramidenspitzen grösser, also deswegen die Eindringungstiefe geringer wurde, bis zuletzt die Eindrücke äusserst schwach werden.

350. Bei den Einbiehverfahren [Gruppe IA₂ Abs. 348], welche ohne Zweifel praktisch die einfachsten sind, hat man ausser auf die bereits besprochenen Fehlerquellen noch darauf zu achten, dass die Wirkungen der schlagenden und der widerstehenden Massen bei den Apparaten in gleichen Verhältnissen zu einander stehen, dass streng genommen also auch die Probestücke nahezu gleiche Massenverhältnisse zum Apparat haben, wenn nicht dessen Massen an sich gross sind. Nur bei Innehaltung aller dieser Vorsichtsmaassregeln können mit verschiedenen Apparaten gleicher Art gewonnene Ergebnisse mit einander verglichen werden. Auch die Massen der Unterlagen, auf denen die Apparate stehen, müssen ebenfalls beachtet werden, wenn diese widerstehenden Massen nicht an sich schon den angreifenden sehr wesentlich überlegen sind; sie sind zweckmässig zu befestigen.

351. Auch bei der Gruppe IB, bei den Ritzverfahren, ist in allen Fällen das Versuchsergebniss durchaus abhängig von den besonderen Bedingungen, unter denen die einzelnen Vorrichtungen arbeiten. Die Stichel wirken z. B. auf weiche, bleiähnlich sich bearbeitende Körper ganz anders als auf harte, spröde Körper. Dies tritt ganz besonders deutlich bei dem Verfahren der Härtebestimmung durch Abschleifen [Hauenschild, Bau-

schinger, Smith u. A.] hervor; bei diesem Verfahren arbeitet gewissermaassen nicht ein einziger Stichel, sondern unzählige von mannigfachster Form. Das weiche Blei schleift sich unter Umständen schlechter als harter Stahl (*L* 218).

Die ritzende [schneidende] Wirkung des Stichels ist sehr stark von seiner Form, Härte, Art der Anstellung, Geschwindigkeit der Bewegung und sonstigen äusseren Umständen abhängig. Man muss auch für die Apparate dieser Gruppe vollständige Uebereinstimmung der Vorrichtungen und Verfahren verlangen, wenn an mehreren Orten übereinstimmende Ergebnisse erhalten werden sollen.

352. Bei allen bisher besprochenen Verfahren wird mehr oder minder ausschliesslich die Härte der Körperoberfläche bestimmt, sie haben den Umstand gemein, dass sie ein Maass für die Härte an sich überhaupt nicht liefern können; vielmehr kommt es innerhalb der einzelnen Bestimmungsarten immer wieder auf die einfache Vergleichung des Widerstandes hinaus, den verschiedene Körper irgend einem für alle Körper gleichen Angriffsverfahren entgegensetzen, und die Ergebnisse verschiedener Verfahren sind daher mit einander nicht ohne weiteres zu vergleichen. Es kann sogar vorkommen, dass die für eine Reihe von Körpern gefundenen Härtefolgen bei den verschiedenen Verfahrensarten ganz verschieden und selbst widersprechend ausfallen. Einzelne dieser Verfahren sind aber leicht und bequem durchführbar, und sobald sie für das gleiche Material dauernd gleiche Werthe liefern, kann es für unsere Zwecke schliesslich ganz gleichgültig sein, ob wir das Ergebniss mit mehr oder minder Recht als einen Maasswerth für die Eigenschaften der Härte im streng wissenschaftlichen Sinne ausgeben dürfen oder nicht. Wenn wir mit unserem Verfahren nur das praktische Ziel erreichen, einen neuen, aber zuverlässigen Vergleichsmaassstab für verschiedene Materialien unter einander zu gewinnen, und wenn das Ergebniss geeignet ist, uns über den Grad der technischen Brauchbarkeit des Materiales für bestimmte Zwecke zu belehren, so hat es volle Berechtigung. Die Methode wird um so brauchbarer sein, je mehr die Härteordnung, in welche sie die Körper bringt, mit unseren durch eine Summe von Thatsachen gewonnenen und uns in Fleisch und Blut übergegangenen, aber in Summe nicht nach dem Maasse ausdrückbaren Erfahrungen übereinstimmt. Die Mohssche Skala giebt eine Härtefolge der Körper, die dieser Forderung genügt, sie hat sich allgemein eingebürgert; daher muss man von irgend einer Härtebestimmungsform verlangen, dass sie mindestens nicht in Widerspruch zur Mohsschen Skala geräth. Es kommt also, nachdem die Härte in absolutem Maass zur Zeit nicht ausgedrückt werden kann¹⁾, schliesslich darauf hinaus, das Verfahren so auszubilden, dass innerhalb der Mohsschen Skala feinere Härteunterschiede mit Sicherheit erkannt werden können.

353. Wie wir sahen, zielten alle bisher geschilderten Verfahren auf

¹⁾ Auerbach nimmt dies für sein auf die Hertzsche Begriffserklärung (*L* 202) gegründetes Verfahren allerdings in Anspruch, aber das Verfahren ist in der Auerbachschen Form für unsre praktischen Zwecke sehr wenig brauchbar. Vielleicht lässt sich mit dem Rudeloff-Föpplischen Verfahren besser arbeiten; wenigstens sind bei ihm die Probekörper leicht herzustellen und gestatten ohne Schwierigkeit eine mehrmalige Wiederholung des Versuches mit den gleichen Körpern.

die Feststellung der Oberflächenhärte ab, und man war in Erkennung dieses Umstandes zuweilen auch bemüht, die Härte des Gesamtkörpers begrifflich festzustellen. Hierbei ging man zumeist von den Festigkeitseigenschaften der Körper aus und versuchte die Härte aus den beim Festigkeitsversuch gewonnenen Ergebnissen abzuleiten [Hauptgruppe II der Härteprüfungsverfahren]. Reiser (*L 204*, S. 6) definiert unter Berufung auf Ledebur, z. B.:

„Härte ist der Widerstand, welchen ein Körper sowohl dem Eindringen eines anderen festen Körpers — Bohren, Sägen, Feilen — als auch einer bleibenden Formänderung durch Druck oder Zug entgegensetzt.¹⁾ Mit der Härte steigt die Elasticitätsgrenze, so dass Körper, deren Elasticitätsgrenze hoch liegt, auch bedeutende Härte zeigen. Liegen in diesem Falle auch die Elasticitätsgrenze und Festigkeit nahe bei einander, so ist der Körper hart und spröde, z. B. weisses Roheisen; liegt dagegen zwischen Elasticitätsgrenze und Festigkeit noch ein grosser Zwischenraum, so ist der Körper hart und zäh.“²⁾

Auch Auerbach, Hartig, Kirsch u. A. wollen die Elasticitätsgrenze³⁾ als Maass für die Härte angewendet wissen, und Kirsch kommt sogar in Folge dieses Strebens dahin, dass er soviel besondere Härten eines Materiales annimmt, als er Beanspruchungsweisen kennt. Man sieht leicht ein, in welchem Maasse die Sache sich verwickelt.

354. Ich will bei der Definition von Reiser-Ledebur einen Augenblick verweilen, um die Gründe vorzuführen, die es mir unmöglich machen, mich der Anschauung anzuschliessen, dass Härte durch die Elasticitätsgrenze allein gemessen werden könne. Reiser erkennt zunächst im zweiten Theil seines ersten Satzes zwei Härten an, eine die durch Druck und eine die durch Zug wachgerufen wird. „Mit der Härte steigt die Elasticitätsgrenze“, sagt Reiser. Da nun Gusseisen, wie viele andere Materialien, keine vollkommene Elasticität besitzt, die Elasticitätsgrenze, wie wir sie definirten, nämlich σ_P , oder die Elasticitätsgrenze der älteren Definition, nämlich die Spannung σ_E , die zuerst eine bleibende Formänderung erzeugt, beim Gusseisen sehr niedrig liegt, so wäre Gusseisen kein harter Körper. Da nach

¹⁾ In „Stahl und Eisen“ 1894 S. 479 sagt Ledebur: „Unter der Bezeichnung „Härte“ lässt sich ebensowohl der Widerstand eines Körpers gegen Zerspaltung [z. B. beim Bohren] als auch die Sprödigkeit verstehen, welche der Körper an den Tag legt, wenn er irgendwie auf Festigkeit beansprucht und dadurch einer Formänderung unterworfen wird. In der letzteren Auslegung bildet demnach Härte den Gegensatz zur Geschmeidigkeit.“

Ich liess einige Worte gesperrt drucken, um die Vielheit in dieser Erklärung und die Schwierigkeit, sie sich zum klaren Verständniss zu bringen, hervortreten zu lassen. Härte wäre also Sprödigkeit. Im Sprachgebrauch ist Sprödigkeit das Gegentheil von Zähigkeit. Ein zäher Körper kann hiernach nicht hart sein. Manganstahl lässt sich zu einer Schleife, also in ausserordentlich hohem Maasse biegen und ist so hart, dass er mit schneidenden Werkzeugen nicht bearbeitet werden kann.

²⁾ In der zweiten Auflage seines Werkes (*L 204*) liess Reiser diese Definitionen fallen.

³⁾ Praktischer würde es immerhin sein, an Stelle der Elasticitätsgrenze, also von σ_E oder σ_P , die Streckgrenze σ_S einzuführen, weil diese sich leichter bestimmen lässt und auch bislang in der Praxis meistens unter der Bezeichnung Elasticitätsgrenze verstanden wird. Dann hat man aber keine neue Eigenschaft, sondern nur eine neue Bezeichnungsweise für eine altbekannte Eigenschaft des Materials.

Reiser der Zwischenraum zwischen σ_B und σ_P (bezw. σ_E) entscheidend für die Benennung „zäh“ und „spröde“ sein soll, so würde, da für Gusseisen $\sigma_B - \sigma_P$ gross ist, Gusseisen ein weicher und zugleich zäher Körper sein; das widerspricht offenbar unserer Erfahrung.¹⁾ Auf Druck geprüft würde Gusseisen aber noch viel weicher erscheinen, weil σ_B ganz erheblich grösser als σ_P und dabei σ_P (bezw. σ_E) ebenso wie σ_P sehr niedrig, wenn nicht bei Null liegt. Ganz abgesehen von diesem Umstande, tritt folgendes Hinderniss auf. Die Elasticitätsgrenze in unserem Sinne, nämlich σ_P , ist schon recht schwierig genau zu bestimmen, aber noch viel umständlicher und schwieriger ist die Spannung beim Eintritt der bleibenden Formänderung festzustellen; soll man hierbei die elastischen Nachwirkungen vorübergehen lassen? oder soll man ihren Betrag als bleibende Formänderung in Rechnung stellen? In der That werden hierin von den Autoren Spielräume gewährt, indem sie einen gewissen Betrag von bleibender Formänderung zulassen; aber hierdurch wird die Grenze kaum fester, ihre Bestimmung praktisch kaum erleichtert.

355. Wollen uns die Vertreter für die Elasticitätsgrenze als Härtemaass auch die Benutzung der *P*-Grenze [oder noch besser der *S*-Grenze] einräumen, so wird die Schwierigkeit keine geringere. Für Gusseisen und die Materialien ohne *P*-Grenze bleiben die bereits geschilderten Umstände bestehen. [Für Gusseisen würde σ_S nahezu mit σ_B zusammenfallen; nur σ_S würde einigermaassen sicher zu bestimmen sein.] Man denke aber nur an die bereits besprochenen Versuche Bauschingers über die Veränderung der Elasticitätsgrenze durch Ueberanstrengung (Abschnitt *i* 2 S. 207)! Welche von den vielen *P*-Grenzen [oder *S*-Grenzen], die künstlich erzeugt werden können, soll als Härtemaassstab angenommen werden? oder soll man sich auch die Härte des Materiales als im gleichen Maasse wie σ_P schwankend denken? Alle Verfahren, die auf Bestimmung der Elasticitäts- oder Streckgrenze als Maass für die Härte hinausgehen, haben mit den genannten Schwierigkeiten zu kämpfen, wenn sie theoretisch auch noch so gut begründet sind. Will man aber schon auf diese Weise einen Maassstab für die Härte bilden, so erscheint es mir praktischer, hierbei von der *S*-Grenze auszugehen. Man würde dann nicht einen besonderen Versuch für die Härtebestimmung nöthig haben, sondern könnte die Ergebnisse der Festigkeitsversuche ohne weiteres benutzen, um den Grad der Zughärte, der Druckhärte, der Biegehärte u. s. w. anzugeben, und hätte dadurch den Vorzug, dass man alle älteren Versuchsergebnisse, bei denen ja die „Elasticitätsgrenze“ in der That meistens unserem σ_S entspricht, sogleich an den neuen Maassstab anschliessen könnte. Aber welchen Gewinn hätten wir hieraus für die Erkenntniss der Materialeigenschaften?

356. Für die praktische Materialprüfung kommt noch ganz etwas anderes hinzu. Alle diese Verfahren setzen im Grunde genommen homo-

¹⁾ Es dürfte aber auch zu Widersprüchen mit den Anschauungen des gewöhnlichen Lebens führen, wollte man die absolute Grösse der Differenz $\sigma_B - \sigma_P$ [oder $\sigma_B - \sigma_S$] als Maassstab für die Einreihung aller Materialien nach ihrer Zähigkeit (in Reisers Sinne) benutzen. Offenbar wird hieran auch nicht gedacht worden sein; man hat die Definition vielmehr in erster Linie den bekannten Konstruktionsmaterialien angepasst.

gene Körper voraus. Wir haben aber, namentlich unter den Metallen, nur sehr wenige wirklich homogene Körper. Bleiben wir beim Gusseisen! Gusseisen besteht, wie bekannt, aus einem Zellwerk einer härteren Legirung zwischen Eisen, Kohlenstoff und anderen Elementen und aus einer weicheren Eisenmasse mit Kohlenstoffausscheidungen, die sich als Kern in den Zellen befindet. Prüft man also Gusseisenstücke auf Druck zwischen Flächen, so ist es selbstverständlich, dass der Widerstand des härteren Zellwerkes in anderem Maasse wachgerufen wird, als derjenige der eingelagerten weichen, gewissermaassen zur Versteifung des Gerippes dienenden Masse. Alle Methoden der Härteprüfung, die mit Endflächen an den Stempeln arbeiten, bestimmen daher in ihrem jeweiligen eigenen Sinne die mittlere Härte [dasselbe gilt natürlich für alle Ergebnisse des Festigkeitsversuches] des von Zellwerk und Füllmasse gebildeten Körpers. Alle Verfahren, die mit schneidenförmigen oder spitzen Stempeln arbeiten, bestimmen, je nachdem wie der Stempel zufällig trifft, die Härte des Zellwerkes oder die Härte der Füllmasse, wenn der Stempel nicht tief in den Probekörper eingetrieben wird. Wird aber der Stempel einigermaßen tief eingetrieben, so tritt der voraufgehend erläuterte Fall ein.

357. Alle bis jetzt aufgeführten Umstände und besonders die Ueberlegung, dass es wünschenswerth sein muss, die Kenntniss der Materialeigenschaften durch von einander möglichst unabhängige Verfahren zu erweitern, haben mich veranlasst, bei Konstruktion eines Härteprüfers für die Versuchsanstalt zu Charlottenburg (*L 188*) auf das Ritzverfahren zurückzugreifen und in Ausbildung des Turnerschen Verfahrens (*L 203*) die Ritzung mit einem Diamanten *D*, Fig. 240 mit kegelförmiger Spitze von nahezu 90° Spitzenwinkel vorzunehmen, unter dem das Probestück mit einem Schlittenwerk *S* langsam verschoben wird. Der Diamant *D* ist an einem Waagebalken *w* befestigt und kann durch Verschieben des Laufgewichtes *L* nach und nach belastet oder entlastet werden. Turner hat den Versuch in der Weise ausgeführt, dass er den Diamanten belastete, so dass er einen deutlichen Strich beschrieb. Unter Entlastung von Stufe zu Stufe zog er Strich neben Strich, bis diese Striche dem blossen Auge verschwanden, um dann wieder stufenweise zu belasten, bis die Striche wieder erkennbar wurden. Als Maassstab für die Härte benutzte er die mittleren Belastungen des Diamanten in Grammen, welche gerade den Strich verschwinden und wieder erscheinen machten. Da es aber praktisch schwer ist, diese Thatsache zuverlässig festzustellen, weil Uebung und Sehschärfe des Beobachters, Güte der Beleuchtung u. s. w. von Einfluss auf das Ergebniss sind, so habe ich das Verfahren dahin abgeändert, dass ich entweder die Belastung des Diamanten in Grammen als Härtemaassstab wählte, die eine bestimmte Strichbreite z. B. $10\mu = 0,01\text{ mm}$ erzeugte, oder zur Vereinfachung des Verfahrens auch den reciproken Werth der Strichbreite in μ annahm, die unter einer bestimmten Belastung des Diamanten erzeugt wurde.

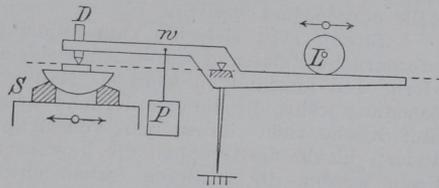


Fig. 240.

a. Der erstere Maassstab ist theoretisch einwandfreier, weil die Strichbreiten

nicht so sehr durch die Unvollkommenheiten des Diamanten beeinflusst sind. Es ist nämlich sehr schwer, Diamanten von tadelloser Form zu erhalten, da die Spitzen durch Spalten des rohen Diamanten und Abschaben der scharfen Kanten mit Diamantsplittern hergestellt werden; vollkommen geschliffene Spitzen würden sehr teuer werden.¹⁾ Unter dem Mikroskop zeigt eine Diamantspitze Rauheiten und Höcker, wie in Fig. 241 *a* übertrieben gezeichnet, und die Strichbreite *b* kann daher bei verschiedener Belastung nicht immer proportional zur Eindringtiefe *t* werden. Nimmt man nun aber immer gleiche Eindringungstiefe als Maasswerth an, so werden die Kanten des Striches immer von den gleichen Stichelstellen erzeugt, die Striche haben immer gleiches Querschnittsprofil.

Ich muss aber auch noch darauf aufmerksam machen, dass bei manchen Materialien sich neben dem Strich ein Wulst bildet, in Fig. 241 *b* übertrieben ge-

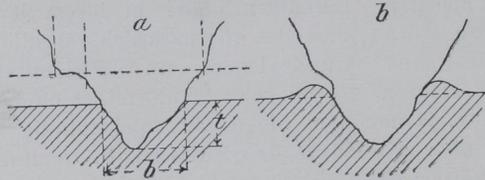


Fig. 241.

zeichnet, der die Messung der wahren Strichbreite zuweilen sehr schwierig, wenn nicht unmöglich macht. Gelingt es nicht, durch geeignete Veränderung der Beleuchtung des Objektes unter dem Mikroskop sich ein Urtheil über die Grösse des begangenen Fehlers zu bilden, so wird man das Prüfungsergebniss als ein angenähertes zu betrachten haben, das die Härte zu klein liefert. Gleiche Materialien werden immer gleiche Erscheinungen zeigen und daher auch stets an gleicher Stelle eingeordnet werden.

Streng lässt sich die zum Eindringen bis auf das vorgeschriebene Maass erforderliche Belastung durch Ausprobiren nicht bestimmen, das würde zu langwierig und umständlich werden. Man geht daher so vor, dass man nahezu die Belastung wählt, die die erforderliche Strichbreite giebt und nun in Gruppen immer fünf Striche zieht, indem man von Gruppe zu Gruppe die Belastung stufenweis ändert, bis in die Gruppen die gewünschte Strichbreite sicher eingeschlossen ist. Dann werden die mittleren Strichbreiten aus den einzelnen Gruppen mit den entsprechenden Belastungen als Ordinaten und Abscissen aufgetragen; aus den Schaulinien wird nun durch Einzeichnen der Ausgleichlinie diejenige Belastung bestimmt, die die Strichbreite 10μ erzeugt haben würde. Die Strichbreiten müssen natürlich unter mikroskopischer Vergrösserung mit dem Mikrometer genau ausgemessen werden.

b. Etwas schneller und einfacher kommt man zum Ziel, wenn man den reciproken Werth der unter einer bestimmten Belastung erzeugten Strichbreite als Härtemaassstab wählt; dies ist für praktische Zwecke, bei denen es sich um schnellen Vergleich mehrerer Proben von bekanntem Material handelt, auch ganz ausreichend. Man zieht dann bei der als Einheit gewählten Belastung (10 oder 20 gr) vielleicht 10 oder 15 Striche und stellt die mittlere Strichbreite fest. Will man stets in dieser Weise vorgehen, so lässt sich Apparat und Verfahren viel einfacher gestalten.

c. Die Methode, die Härte nach meinem Vorschlage durch Ritzung zu bestimmen, hat neben ihrer Einfachheit, wie mir scheint, den Vorzug, dass sie häufig auch die Gleichförmigkeit der Struktur der geritzten Körper beurtheilen lässt. Bei Gusseisen dringt z. B. der Diamant auf dem harten Netzwerk weniger tief ein als in die weiche Füllmasse, und der Unterschied in den Strichbreiten giebt zugleich ein Maass für die Härteunterschiede dieser beiden Materialbestandtheile.

¹⁾ Man würde aber auch durch das Schleifen keine absolute Gleichheit verschiedener Diamanten erzielen, weil sie unter einander verschiedene Härte haben, und weil wahrscheinlich auch die Härte eines Diamanten nach den verschiedenen Richtungen verschieden sein wird. Mit Iridium überzogene Stahlspitzen haben sich nicht bewährt.

Es kommen aber auch Körper mit zelligem Gefüge vor, deren harte Bestandtheile zugleich so spröde sind, dass sie unter dem Diamanten wegbröckeln, namentlich wenn sie zugleich porös sind, so dass die Diamantspitze gewissermaßen in die Poren hineinfällt und dann bei der Weiterführung des Stückes die Zellwänden durchbricht (Bimstein). Für solche Körper kann die Ritzmethode mit Spitzen keinen Maassstab für die Härte liefern. Man müsste dann den Vergleich schon mit einem schneidenförmigen Stichel ausführen, der in die Poren nicht eindringt.

d. Harte pulverförmige Körper prüft man auf ihre Härte am einfachsten, indem man sie in Kork eindrückt und mit ihnen Körper verschiedener Härte zu ritzen sucht.

e. Mikroskopisch kleine Flächen kann man auch nach dem Vorgange von Behrens (L 195) mit verschiedenen harten Nadeln anstechen und so auf ihre Härte prüfen.

f. Ich will übrigens nicht verhehlen, dass über die Zulässigkeit des Ritzverfahrens zur Bestimmung der Härte die Meinungen ausserordentlich getheilt sind (L 147—149; 188—195). Um stark wissenschaftlich veranlagte Gemüther ferner nicht mehr in Aufregung zu versetzen, wird es daher gut sein, durch die Bezeichnungweise anzudeuten, dass ich keinen Anspruch darauf mache, das Härteproblem in ihrem Sinne gelöst zu haben. Um keinen Zweifel bestehen zu lassen, schlage ich vor, die durch die Ritzmethode bestimmte Härtestufe des Materiales als seine **Ritzhärte** und in der Abkürzung mit \mathfrak{H}_r zu bezeichnen. Ich werde also, wo es sich in Zukunft um Härtegrade handelt, die mit meinem Apparat bestimmt sind, nur von der Ritzhärte des Materiales reden.

358. Eine Reihe von Metallen ergab folgende Ritzhärten:

Tabelle 27. Ritzhärte verschiedener Materialien im Vergleich zur Mohsschen Skala.

Art der Körper	Zusammensetzung	Ritzhärte	Mohs
Schellack	—	15,0—17,8	—
Blei	Pb	16,8	1,5
Zinn	Sn	23,4—28,2	2—3
Legirung	CuSn ₅ ; 97:903	36,4	2—3
"	CuSn ₄ ; 119:881	37,8	2—3
Kupfer	Cu	34,3—39,8	3
Zink	Z	42,6	—
Legirung	CuSn ₃ ; 152:848	30,0 u. 44,6*)	2—3
"	CuSn ₂ ; 212:788	21,8 u. 48,7*)	2—3
Messing	—	44,7—52,8	—
Nickel	Ni	55,7	—
Legirung	CuSn; 350:650	— u. 62,5*)	3—4
"	Cu ₂₅ Sn; 932:68	67,5	3
Stahl, weich	—	70,8—76,5	—
Legirung	Cu ₁₀ Sn; 890:110	78,0	3
"	Cu ₂₀ Sn; 915:85	81,6	3—4
"	Cu ₁₀ Sn; 843:157	82,5	3—4
"	Cu ₂ Sn; 482:518	83,0	4
"	Cu ₅ Sn; 729:271	100,0	4—5
"	Cu ₁ Sn; 683:317	102,0	4—5
"	Cu ₃ Sn; 618:382	110,0	4—5
Glas	—	135,5	5—5,5
Stahl, hart	—	137,5—141,0	6—6,5

Man kann die in der Tabelle zusammengestellten Versuchsergebnisse benutzen, um den Maassstab für die Ritzhärte \mathfrak{H}_r mit der Mohsschen Skala \mathfrak{H}_m zu vergleichen und bekommt dann etwa die in Fig. 242 dargestellten Verhältnisse.

359. Die Körper, deren Härte man bestimmen soll, haben nun aber nicht immer solche Formen, dass man sie bequem unter einen Apparat

*) Harte und weiche Stellen.

bringen kann. Der Versuchsanstalt zu Charlottenburg wurde z. B. von einem Hüttenwerk die Aufgabe gestellt, Kalanderwalzen aus Hartguss, die in verschiedenen Fabriken im Betriebe waren, hinsichtlich ihrer Härte zu vergleichen. Dies konnte natürlich nur auf einem Umwege erreicht werden. Zu dem Zweck liess ich eine Reihe von Stahlmeisseln gleicher Form Fig. 243 herstellen und härtete sie in verschiedenem Maasse. Die

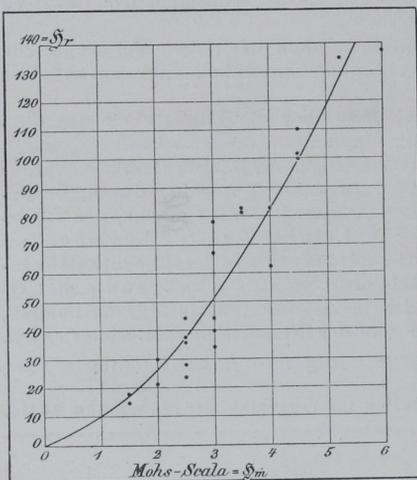


Fig. 242.

Härtestufen der Meissel stellte ich durch das vorhin besprochene Prüfungsverfahren, durch Ritzen fest. Ausserdem verschaffte ich mir eine Reihe von Hartgussproben, ähnlicher Art wie das Material der Walzen. Durch gegenseitiges Ritzen dieser Stücke stellte ich ihre Härtefolge ebenfalls fest. Mit den gleichen Stücken ritzte ich nun die Walzenoberfläche und konnte deren Härte also nach meinen Probekörpern ordnen.

Ausserdem wurde versucht, mit den Meisseln unter Anwendung ganz leichter Schläge Einbiege in die Walzenoberflächen zu machen. Dabei

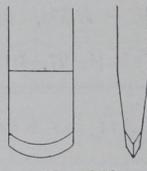


Fig. 243.

wurde festgestellt, welche von den nach ihrer Härte geordneten Meisseln noch Eindrücke in die Walzenflächen machten, ohne ihre Schneide zu verändern und welche Nummern eine stumpfe Schneide bekamen. Auf diese Weise war es möglich, auch die Walzen nach ihrer Härte mit einander zu vergleichen. Selbstverständlich ist dies nur eine rohe Methode, aber man kann von ihr in der Praxis immerhin Gebrauch machen.

1. Zähigkeit und Sprödigkeit.

360. Ebenso wenig wie für die Härte, ist es bis jetzt gelungen für die Zähigkeit und Sprödigkeit eine vollkommen zutreffende Begriffs-erklärung oder Maasszahl zu finden.

Im praktischen Leben wird ein Körper als zähe bezeichnet, wenn er bei grossem Widerstande möglichst grosse Formänderungsfähigkeit zeigt, und als spröde, wenn er schon bei geringen Gestaltsänderungen, namentlich bei plötzlicher Inanspruchnahme, zerbricht. Zähigkeit und Sprödigkeit sind durchaus nicht, wie es auf den ersten Blick scheint, unvereinbar mit einander. Pech ist, wie schon mehrfach hervorgehoben, bei langsamer Formänderung zähe, aber bei stossweisser Beanspruchung sehr spröde. Als Maasswerthe für die Zähigkeit und Sprödigkeit sind verschiedene Grössen vorgeschlagen worden.

361. Eine Reihe von Forschern will den Unterschied zwischen Streckgrenze [von ihnen meistens Elasticitätsgrenze benannt] und Bruchgrenze als Maasswerth für die Zähigkeit benutzen [Reuleaux,

Reiser (*L 204*) u. A.]. Je weiter hiernach Streckgrenze und Bruchfestigkeit für Zug oder Druck bei einem Material auseinander liegen, desto grösser ist die Zähigkeit. Man würde nach diesem Vorschlage verschiedene Zähigkeitswerthe erhalten, je nachdem man sie aus Zug- oder Druckversuchen ableitet. Das ist an sich auch nicht ganz ohne Berechtigung, aber man muss dann folgerichtig den gleichen Begriff auch auf alle anderen Beanspruchungsformen [Biegen, Scheeren, Verdrehen, Knicken u. s. w.] übertragen; man bekommt also dann eine ganze Reihe von Werthen für die Zähigkeit eines Materiales, die keineswegs parallel mit einander zu gehen brauchen.

362. Andere Forscher haben die Dehnbarkeit oder auch allein die bleibende Dehnung, als Maassstab für die Zähigkeit vorgeschlagen [Hartig, Fischer (*L 106*) u. A.]. Auch sie kennen verschiedene Zähigkeiten für Zug, Druck u. s. w.

363. Ein fernerer Vorschlag von mir bezieht sich auf die Querschnittszusammenziehung als Maass für die Zähigkeit (*L 205*). Dieser Vorschlag deckt sich aber insofern mit dem voraufgehenden, als ja die Querschnittszusammenziehung eigentlich auch ein Maass für die Dehnbarkeit der Längeneinheit in der Einschnürungsstelle ist, sobald man es mit Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 zu thun hat. Denn es ist wie früher *36* angeführt:

$$q = 100 (1 - f_1/f),$$

und nach der Voraussetzung $d = s/r = 1$ muss sein:

$$V = V_1 \text{ oder } fl = f_1 l_1, \text{ d. i.}$$

$$f_1/f = l/l_1 \text{ oder oben eingesetzt:}$$

$$q = 100 (1 - l/l_1), \text{ d. h.}$$

$$1 - q/100 = l/l_1 \text{ und da nach (33)}$$

$$\delta = (l_1/l - 1) 100, \text{ oder die Dehnbarkeit in der Einschnürung:}$$

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

Wenn also die Dehnbarkeit ein praktisch genügendes Maass für die Zähigkeit ist, so muss man dies auch für die Querschnittsverminderung in Anspruch nehmen. Sie würde in diesem Falle das Maass für die gesammte Zähigkeit darstellen, die das Material bis zur Aufhebung des Zusammenhanges zu entwickeln vermag, während die Dehnbarkeit immer nur einen Theil von diesem Betrage darstellt, da ja die Querschnitte ausserhalb der Einschnürung nach deren Beginn ausser Thätigkeit kommen (*314*, Fig. 220). Wenn δ und q Maasse für die Zähigkeit sind, dann hat δ den Vorzug, dass in ihm auch ein Maass für die Gleichmässigkeit des Materiales gegeben ist. Man könnte, wenn es sonst praktischen Werth hätte, aus der Gegenüberstellung der Dehnbarkeit, die der Stab beim Beginn der Einschnürung hatte, mit der Dehnbarkeit der Einschnürung, das Verhältniss feststellen, in welchem die Gesamtzähigkeit des Materials zur Geltung gebracht worden ist.

364. Reiser schlägt vor, sowohl den Unterschied zwischen Streckgrenze und Bruchgrenze, als auch die Dehnbarkeit zur Beurtheilung des Zähigkeitsgrades zu benutzen. Vergleicht man

beide Maassstäbe mit einander, so ergibt sich z. B. für Eisen Fig. 244 [Schaulinie 1] und Zink [Linie 2], dass, nach dem ersten Maassstabe

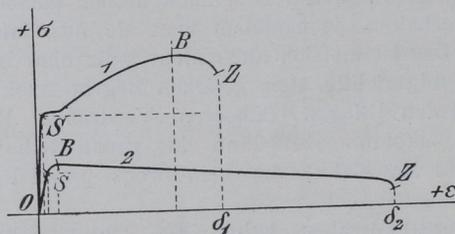


Fig. 244.

$\sigma_B - \sigma_S$ gemessen, die Zähigkeit des Eisens grösser ist als die des Zinks, während nach dem zweiten, Zink zäher ist als Eisen, weil $\delta_2 > \delta_1$.

365. Statt des Unterschiedes $\sigma_B - \sigma_S$ könnte man auch wohl das Verhältniss zwischen σ_S und σ_B als Maasswerth benutzen, welches ebenso wie das Verhältniss zwischen σ_P und σ_B für gleiche Materialien und ähnliche Zustände, d. h. nach gleicher voraufgegangener mechanischer Bearbeitung des Materials, z. B. Kaltwalzen, Hämmern, Ziehen, Glühen, Abschrecken u. s. w., Werthe liefert, die nahezu als gleichbleibend, also als der Gattung und dem Zustande des Materiales eigenthümlich, betrachtet werden können. Ich habe dies bei Zusammenstellung einer sehr grossen Zahl von Versuchsergebnissen für unsere wichtigsten Konstruktionsmaterialien stets bestätigt gefunden und benutze daher seit mehreren Jahren das Verhältniss σ_S/σ_B , um den Grad der mechanischen Bearbeitung von Metallen auszudrücken. Dieser Werth σ_S/σ_B beträgt z. B. für Flusseisen im geglühten Zustande zwischen 0,55 und 0,75 und kann in kaltgezogenem Draht auf über 0,95 wachsen. Diese Erfahrung war für mich Veranlassung, zeitweilig das Verhältniss σ_B/σ_S als Maassstab für die Zähigkeit zu benutzen.

366. Will man dem Vorschlage Reisers folgen, so würde durch die Zusammenfassung mit dem Werthe σ_B/σ_S die Zähigkeit des Materials

$$\mathfrak{Z} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \varepsilon$$

oder bis zum Bruch gerechnet:

$$\mathfrak{Z} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta}{100}$$

noch besser mit den praktischen Erfahrungen in Einklang kommen. Ist aus den Festigkeitswerthen der Werth σ_S/σ_B zur Materialbeurtheilung bereits errechnet, so ist die Berechnung von \mathfrak{Z} mit Hülfe des Rechenmaassstabes aus den Werthen σ_S/σ_B und δ am zweckmässigsten aus

$$\mathfrak{Z} = \frac{\delta}{\frac{\sigma_S}{\sigma_B} \cdot 100} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta}{100}$$

auszuführen.

Da in den beiden Gleichungen für \mathfrak{Z} der Werth δ von der angewendeten Probenform, d. h. von dem Verhältniss $n = l/Vf$ (Abschnitt a 8)

abhängig ist, so gilt dies auch für \mathfrak{Z} . Man muss daher ebenso wie früher bei δ auch zu \mathfrak{Z} den Index n hinzufügen, wenn man Klarheit über den Werth \mathfrak{Z} geben will. Es ist also zu schreiben

$$\mathfrak{Z}_n = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100} \dots \dots \dots 31)$$

367. Ich habe in Tab. 28 die verschiedenen in Vorschlag gebrachten Maassstäbe für die Zähigkeit durch Gegenüberstellung der Er-

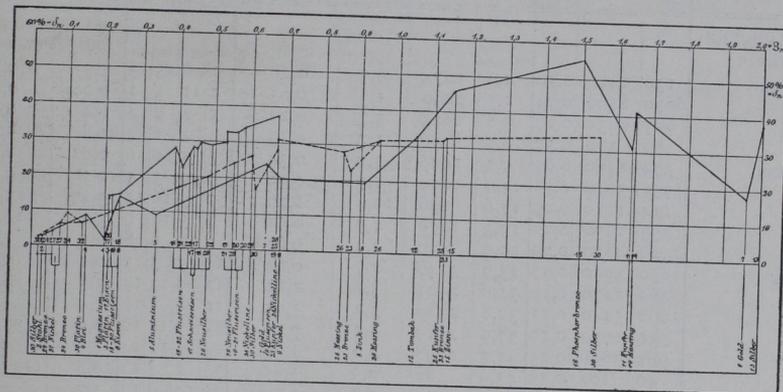


Fig. 245.

Zähigkeit und Bildsamkeit von Metallen.

gebnisse zur Anschauung gebracht. Für verschiedene Metalle und Metalllegirungen finden sich die Zähigkeitszahlen nach den oben besprochenen

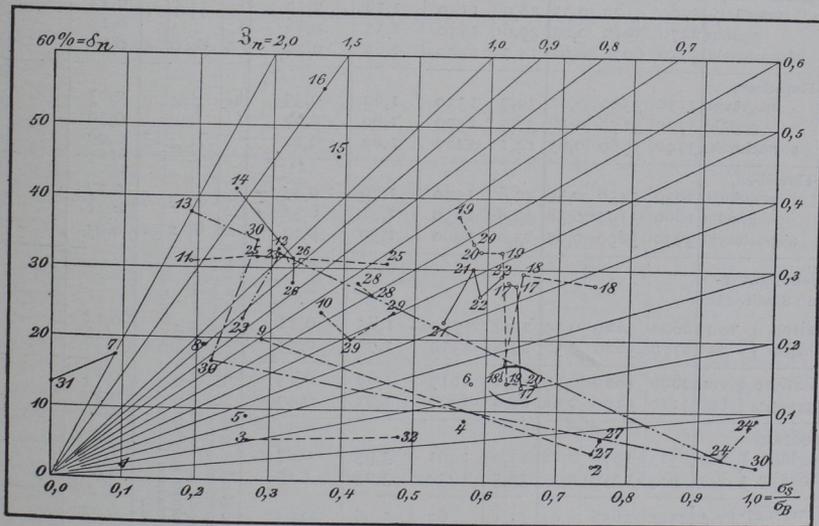


Fig. 246.

Einfluss von $\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$ und δ_n auf die Zähigkeit \mathfrak{Z}_n .

Tabelle 28. Gegenüberstellung der Zähigkeit und Bildungsamkeit von Metallen nach verschiedenen Maassstäben.

Material	σ_S at	σ_B at	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit				Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildungsamkeit		Ordnungszahlen nach Maassstäben e u. f	
				δ_n %	$\sigma_B - \sigma_S$ at	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S}$	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$	a	b	c	d	$\frac{\sigma_n}{\sigma_S} \cdot 10^3$	$\frac{Z}{aT}$		
															e
a) H. Fischer, gegläute Metalldrähte															
1) Magnesium	136	1410	0,10	2,0	1274	9,7	0,20	1	6	15	3	1,5	(0,1)	9	(2)
2) Stahl	6070	8160	0,74	2,5	2090	1,3	0,03	2	11	1	1	0,005	0,002	1	1
3) Platin	607	2230	0,27	5,8	1623	3,7	0,21	3	8	9	4	0,4	0,6	3	3
4) Blei	62	108	0,57	8,7	46	1,7	0,15	4	1	2	2	24,8	5,5	15	10
5) Aluminium	374	1380	0,27	9,2	1006	3,7	0,34	5	4	10	6	0,9	1,6	6	7
6) Eisen	1750	3040	0,58	14,0	1690	1,7	0,24	6	9	3	5	0,1	0,6	2	4
7) Gold	114	1110	0,09	17,6	996	10,0	1,96	7	3	16	15	15,4	15,4	14	13
8) Zink	293	1370	0,21	19,3	1070	4,7	0,91	8	5	12	9	3,1	11,0	11	12
9) Nickel	1420	4850	0,29	20,0	3430	3,4	0,68	9	16	8	8	0,5	1,4	5	6
10) Neusilber	1850	4990	0,37	23,9	3140	2,7	0,64	10	15	5	7	0,4	0,8	4	5
11) Kupfer	469	2470	0,19	31,0	2001	5,3	1,64	11	10	13	13	3,5	8,3	12	11
12) Tombak	1060	3440	0,31	32,8	2380	3,2	1,05	12	13	7	10	1,0	3,1	7	8
13) Silber	331	1750	0,19	37,9	1419	5,3	2,00	13	7	14	16	6,0	22,9	13	14
14) Messing	902	3600	0,25	41,2	2698	4,0	1,65	14	14	11	14	1,8	3,8	10	9
15) Zinn	40	102	0,39	45,9	62	2,5	1,15	15	2	4	11	28,8	1147,5	16	15
16) Phosphorbronze	1270	3400	0,37	55,3	2130	2,7	1,50	16	12	6	12	1,2	—	8	—
b) Charlottenburg, Mittelwerthe															
17) Schweisseisen, ursprgl.	2280	3600	0,64	27,9	1320	1,58	0,45	}5	2	4	6	0,20	0,21		
geglüht	2090	3330	0,63	28,2	1240	1,58	0,44								
abgeschreckt	3160	4860	0,65	13,5	1700	1,54	0,21								
18) Thomas-Flusseisen, ursprüngl.	2980	4120	0,75	28,0	1140	1,38	0,39	}6	1	1	5	0,13	0,19		
geglüht	2470	3810	0,65	29,6	1340	1,55	0,46								
abgeschreckt	3750	6070	0,62	14,7	2320	1,62	0,24								
19) Martin-Flusseisen, ursprüngl.	2170	3500	0,62	32,7	1330	1,62	0,53	}8	4	6	8	0,25	0,38		
geglüht	1760	3170	0,56	37,4	1590	1,80	0,67								
abgeschreckt	3740	5960	0,63	14,1	2220	1,89	0,22								
20) Martin-Flusseisen, ursprüngl.	2030	3450	0,59	32,6	1420	1,70	0,55	}7	3	7	7	0,27	0,31		
geglüht	1860	3190	0,58	33,8	1330	1,71	0,58								
abgeschreckt	3930	5890	0,67	13,8	1960	1,50	0,21								
c) Aus Uebungsversuchen mit Studirenden															
21) Flusseisen } von	2600	4620	0,54	22,6	1990	1,85	0,41						0,15		
5 Stäbe } bis	2770	5020	0,58	29,8	2310	1,73	0,53								
22) desgl. 7 Stäbe } von	2890	4820	0,59	26,2	1819	1,69	0,43						0,14		
gleichen Materials } bis	3110	5100	0,62	29,0	1990	1,61	0,49								
23) Broncedraht geglüht } von	513	1979	0,26	23,0	1401	3,95	0,87						1,45		
3 Stäbe } bis	685	(2250)	0,31	32,5	1650	3,23	1,13								
24) Desgl. wiederholt zerrissen, 3 Stäbe } von	2500	2656	0,93	(3,4)	67	1,08	0,04						0,02		
3 Stäbe } bis	2766	2952	0,98	9,0	218	1,02	0,10								
25) Kupferdraht, geglüht, 2 Versuche	1120	2420	0,46	30,8	1300	2,17	0,67						0,60		
	700	2460	0,28	31,8	1760	3,57	1,12								

No. 21 bis 24 u. 28: Die Werthe in den Zeilen gehören nicht zusammen; sie sind Grenzwerte aus den Versuchsreihen. Das Material in Reihe 21 ist nicht vollkommen gleichartig gewesen. Die untersuchten Drähte sind meistens un-geglüht geprüf.

Tabelle 28. (Fortsetzung.)

Material	σ_S at	σ_B at	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit				Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildsamkeit		Ordnungszahlen nach Maassstäben e u. f
				δ_n %	$\sigma_B - \sigma_S$ at	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S}$ c	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$ d	a	b	c	d	$\mathfrak{Z}_n \cdot 10^3$ e	$\frac{Z}{aT}$ f	
26) Messingdraht, 2 Versuche	1610 1580	4850 4770	0,33 0,33	31,3 28,0	3240 3190	3,03 3,03	0,95 0,85					0,59 0,54		
27) Nickeldraht, 2 Versuche	3700 3270	4860 4380	0,76 0,75	6,3 4,2	1160 1110	1,32 1,33	0,08 0,06					0,02 0,02		
28) Nickelledraht, 2 Versuche	1920 1990	4520 4490	0,42 0,44	28,0 26,3	2600 2410	2,38 2,27	0,67 0,60					0,35 0,20		
29) Neusilberdraht, } von 3 Versuche } bis	2170 2350	5020 5270	0,41 0,47	20,2 24,0	2670 3070	2,44 2,13	0,48 0,55					0,21 0,25		
30) Silberdraht, } von 3 Versuche } bis desgl. wiederholt zerrissen	360 470	1650 1050	0,22 0,28	17,0 34,0	1180 1290	4,55 3,45	0,61 1,55					1,30 4,30		
	1620	1650	0,97	2,3	30	1,03	0,02					0,01		
31) Golddraht	0	730	0,00	13,3	730	∞	∞					∞		
32) Platindraht	1020	2150	0,48	6,5	1130	2,08	0,14					0,14		

Vorschlägen in den Spalten a bis d. In den letzten Spalten sind die Ordnungszahlen angegeben, die die Reihenfolge der Materialien zeigen, wenn man sie nach den im Kopf bezeichneten Zähigkeitsmaassstäben einordnet. Diese Spalten und namentlich Fig. 245 zeigen, dass die Bestimmungen nach $\mathfrak{Z} = \delta$ und nach $\mathfrak{Z}_n = \sigma_B / \sigma_S \cdot \delta_n / 100$ ziemlich gut übereinstimmen, und dass sie auch der praktischen Erfahrung über die Zähigkeit der Materialien gut entsprechen.

Fig. 245 giebt eine Einordnung der Metalle nach den Werthen von \mathfrak{Z}_n und eine Gegenüberstellung der Werthe von δ_n .

Um einen noch besseren Ueberblick zu geben, wie die beiden Einzelfaktoren σ_S / σ_B und $\delta_n / 100$ den Werth \mathfrak{Z}_n beeinflussen, habe ich die Werthe aus Tab. 28 noch in Fig. 246 eingetragen, indem die einzelnen Punkte mit den Eingangsnummern aus Tab. 28 bezeichnet wurden. Die Punkte für die gleichen Metalle sind durch gleichartige Linien mit einander verbunden, und die Punkte für das Eisen ausserdem durch Kreise unterschieden. Um den Einfluss hervor zu heben, den beim Eisen das Abschrecken in Wasser auf die Einzelwerthe, sowie auf den Werth \mathfrak{Z}_n ausübt, sind die Werthe für das abgeschreckte Eisen in Fig. 246 in Klammer eingeschlossen. Die Aenderungen beziehen sich fast ausschliesslich auf δ_n , während σ_S / σ_B konstant bleibt, obwohl nach Tab. 28 die Werthe σ_S und σ_B sich gesetzmässig ändern. Vergleicht man die Werthe für Silber — No. 30 — und Bronze — 23 und 24 — unter einander, so sieht man, welchen grossen Einfluss die mechanische Bearbeitung¹⁾ sowohl auf das Verhältniss σ_S / σ_B als auch auf δ_n und demgemäss auf \mathfrak{Z}_n hat; die Verminderung der Zähigkeit kommt ausserordentlich stark zum Ausdruck.

Ueberlegt man, dass durch Fig. 246 das gesammte Feld dargestellt wird, innerhalb dessen alle möglichen Werthe von \mathfrak{Z} fallen müssen, nämlich eine ge-

¹⁾ Die vorausgegangene Dehnung beim ersten Zerreiessversuch kann ebensowohl wie das Kaltziehen als solche aufgefasst werden.

neigte Ebene, die durch den Nullpunkt der Ordinaten geht, so wird für eine bestimmte Materialgattung und für einen bestimmten Materialzustand immer nur ein eng begrenzter Ort auf der Ebene die unter diesen Umständen möglichen Werthe enthalten; alle aus Versuchen gefundenen Werthe für \mathfrak{Z}_n würden sich also um diesen Ort häufen, und der Schwerpunkt dieses Haufens würde die charakteristische Zähigkeit \mathfrak{Z}_n für die Materialgattung im bestimmten Zustande sein, z. B. für abgeschrecktes Eisen [eingeklammerte Punktgruppe].

368. Wo es nöthig wird, die Zähigkeit der Materialien in Vergleich zu stellen, soll in Zukunft der Maassstab

$$\mathfrak{Z}_n = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$$

benutzt werden, und da es sich immer nur um Vergleichung von Materialeigenschaften handeln wird, soll dieser Ausdruck nur aus Zugversuchen abgeleitet werden. Hierbei muss man aber immer dessen eingedenk sein, dass man es hier, ebenso wie bei den Härtezahlen für die Ritzhärte, nur mit einer praktischen Vereinbarung und nicht mit einem wissenschaftlich begründeten Maasswerth zu thun hat.

Körper, bei denen der Ausdruck für $\mathfrak{Z}_n = (\sigma_B/\sigma_S) \cdot (\delta_n/100)$ sehr klein wird, werden sich in der Regel als spröde und wenig widerstandsfähig gegen Stösse erweisen.

369. Besteht auf den ersten Blick auch ein grosser Unterschied zwischen den zähen und spröden Körpern, so findet man bei näherem Zusehen doch sehr zahlreiche Uebergänge, so dass die Absicht, Zähigkeit und Sprödigkeit durch denselben Ausdruck zu messen, also den Unterschied nicht anzuerkennen, wohl gerechtfertigt werden kann. Das Pech lernten wir schon als ein Material kennen, das zugleich Zähigkeit und Sprödigkeit besitzt. Körper, die wir gewöhnt sind als im hohen Maasse spröde zu betrachten, z. B. Glas, können durch Erwärmung auf einen sehr hohen Grad von Zähigkeit gebracht werden. Zink wird beim Erwärmen bis auf etwa 170° immer zäher und bildsamer; geht man aber nur wenig über diesen Wärmegrad hinaus, so wird es vollkommen bröckelig.

Andere spröde Körper kann man durch hohen Druck so verändern, dass sie unter diesen Verhältnissen, ohne Risse und Sprünge zu bekommen, Formen annehmen, wie sie sonst nur zähe oder bildsame Körper vertragen. Kiek (*L 100*) konnte bei Anwendung eines allseitig wirkenden hohen Druckes spröde Körper, wie Steinsalz, weit über das Maass zusammendrücken und biegen, das die Körper im gewöhnlichen Zustande ertragen haben würden. Er hat auf diese Weise Marmor, einen harten und spröden Körper, unter dem Prägestock mit Reliefbildern und Schrift versehen.

m. Bildsamkeit.

370. Weiche, unelastische und zugleich zähe Körper werden in hohem Grade die Eigenschaft der Bildsamkeit besitzen, d. h. je weicher, unelastischer und zäher ein Körper ist, desto leichter wird man an ihm grosse bleibende Formänderungen vornehmen können, ohne den Bruch herbeizuführen, mit desto weniger Kraftaufwand wird er sich zu Draht ziehen, auswalzen, prägen, drücken, kneten lassen.

Wie bei Besprechung der Härte (Abschnitt *k* S. 240) bemerkt wurde, pflegt diese Eigenschaft mit der Elasticitätsgrenze zu fallen oder zu steigen. Da

die Weichheit nach dem bereits in Abs. 5, S. 5 Gesagten nur ein geringerer Grad der Härte ist, so soll der Maassstab für die Bildsamkeit aus der Lage der Streckgrenze und der Zähigkeit abgeleitet werden. Der Bildsamkeitsgrad wird daher ausgedrückt durch:

$$\mathfrak{B} = \frac{\mathfrak{B}_n}{\sigma_s} \cdot 1000 \dots \dots \dots 32)$$

Der Faktor 1000 ist hinzugefügt, um bequemere Zahlen zu erhalten.

Der hiernach berechnete Bildsamkeitsgrad ist in Tab. 28, S. 248 eingetragen. Die vorletzte Spalte enthält die Ordnungszahlen für die Reihenfolge der nach \mathfrak{B} geordneten Metalle.

371. Für den Bildsamkeitsgrad hat bereits Fischer (*L 106*) einen anderen Maassstab vorgeschlagen, und ich bin es schuldig zu erklären, weshalb ich mich nicht angeschlossen habe. Dies ist nur aus Zweckmässigkeitsgründen geschehen, denn die Einordnung der Metalle nach den Fischerschen Zahlen [drittletzte und letzte Spalte] ist nach Aussage von letzter Spalte bei Anwendung beider Maassstäbe fast die gleiche.

Fischer leitet den Bildsamkeitsgrad auf etwas umständliche, für die Praxis ganz gewiss nicht bequeme, wenn nicht unbrauchbare Weise, her. Er setzt:

$$B = \frac{Z}{aT} \text{ und}$$

versteht unter Z den Zähigkeitsgrad des Materiales, $Z = \delta$, unter a den Elasticitätsgrad und unter T den Tragmodul, unser σ_s .

Der Elasticitätsgrad a wird aus dem Verhältniss der Arbeitsgrösse a_e zu der gesammten Formänderungsarbeit a , also aus $a = \frac{a_e}{a}$ berechnet.

Hierbei bedeutet a_e die gesammte elastische Formänderungsarbeit, welche das Material bis zum Bruch des Stückes zu entwickeln vermag und a die gesammte Formänderungsarbeit bis zum Bruch, beide bezogen auf 1 gr des Materiales.

Dieses Verhältniss kann aber nur durch eine sehr zeitraubende Versuchsausführung und darauf folgende umständliche Rechnung ermittelt werden.

Wie früher (41) bei Besprechung der elastischen und bleibenden Formänderung erwähnt, kann man durch wiederholte Entlastungen während des Versuches für jeden Spannungszustand die erzeugte bleibende und elastische Dehnung des Stabes getrennt bestimmen und kann aus den so gewonnenen Werthen die Schaulinie $\overline{OP2N}$ Fig. 247 für die bei jeder Spannung erzeugte elastische Dehnung verzeichnen, indem man für jede Entlastung die elastische Dehnung $\overline{\epsilon_M - \epsilon'} = \overline{Oe}$ für die vorausgehende Spannung σ_M als Abscisse 1 2

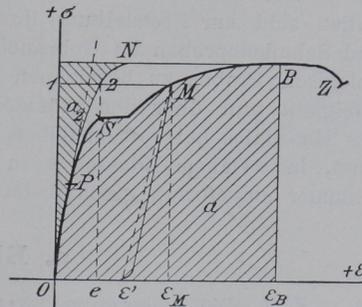


Fig. 247.

aufträgt. Ist auf diese Weise die Linie \overline{ON} gefunden, so giebt die mit

a_e ¹⁾ bezeichnete schraffierte Fläche ein Maass für die elastische Gesamtarbeit, die mit der schraffirten Fläche a , der gesammten Formänderungsarbeit, in Vergleich gestellt wird. Wie man sieht, ein zeitraubendes Verfahren, durch das nicht mehr gewonnen wird, als man es mit dem Ausdruck $\mathfrak{B} = (\mathfrak{z}_n/\sigma_s) 10^3$ auch bieten kann. Dieser Ausdruck kann aber leicht und schnell aus den Ergebnissen abgeleitet werden, die ohnehin bei jedem Zerreißversuch ermittelt werden müssen, zu deren Erlangung also ein besonderer Zeit- und Arbeitsaufwand nicht nothwendig ist.

Ich deutete schon an und bin es schuldig hier nochmals klar auszusprechen, dass die Zahlenwerthe für die Härte, Zähigkeit und Bildsamkeit in der Praxis des Maschinenbaues und auch im eigentlichen Materialprüfungswesen bisher keine so hervorragende Rolle spielen, als es nach dem vielen Kopfzerbrechen scheinen könnte, das die Technologen ihnen zu widmen pflegen. Man muss hier einen Unterschied machen zwischen dem praktisch Verwerthbaren und der strengen Forderungen der Wissenschaft. Wir können nur dann praktisch leistungsfähige Männer werden, wenn wir das, was uns die Wissenschaft zu bieten vermag, beherrschen, es in Fleisch und Blut umzusetzen verstehen und nicht Sklaven unseres Wissens werden. Deswegen ist es wohl angezeigt, zum Schluss dieser Betrachtungen nochmals darauf aufmerksam zu machen, dass die hier gegebenen Maasswerthe für Härte \mathfrak{H} , Zähigkeit \mathfrak{z} und Bildsamkeit \mathfrak{B} nichts weiter sein sollen, als Zahlenzusammenstellungen, denen wir, rein nach Ueber-einkunft, Benennungen von Materialeigenschaften beilegen, die an sich deswegen nicht in vollkommener Weise begrifflich festgelegt werden können, weil es ganz unmöglich ist, diese Eigenschaften gewissermaassen von einander loszulösen und getrennt für sich zu betrachten, etwa wie es der Chemiker macht, der aus einem Haufwerk verschiedener Elemente jedes einzeln herauschält. Wir können vollkommen zufrieden sein, wenn unsere Maasswerthe sich mit unseren praktischen Erfahrungen im Allgemeinen decken und nicht wesentliche Widersprüche zu Tage treten, denn es kommt nur sehr selten vor, dass wir für unsere technischen Zwecke verschiedene Materialien vollständig mit einander zu vergleichen und ihre Eigenschaften durch unsere Versuchsergebnisse in vollkommen erschöpfender Weise darzustellen haben. Die Aufgabe liegt vielmehr meistens derart, dass man zu ergründen hat, ob ein bestimmtes Material den aufgestellten Forderungen genügt oder nicht, oder aber, dass ein Gütemaassstab, ein Maassstab für seinen Nutzungswert zu bilden ist, worüber später in einem besonderen Abschnitt noch zu verhandeln sein wird.

B. Technologische Proben.

372. Ausser den bereits behandelten Festigkeitsversuchen mit Materialien sind zur Feststellung ihrer Güte und Verwendbarkeit noch Biege- und Schmiedeproben im Gebrauch, die man in ihrer Gesamtheit als technologische Proben zu bezeichnen pflegt. Sie sollen hauptsächlich über die Zähigkeit und über den grösseren oder geringeren Grad von Brüchigkeit des Materiales bei verschiedenen Wärmegraden Aufschluss geben oder darthun, in welchem Maasse es in der Kälte oder in der Wärme mit dem Hammer umgeformt, geschmiedet werden kann.

a. Biegeproben.

373. Die Biegeproben werden mit stabförmigen Probekörpern von 200 bis 300 mm Länge ausgeführt, die man entweder in einer besonderen

¹⁾ In Fig. 247 versehentlich mit a_2 bezeichnet.