

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

Scherfestigkeit 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 abzuschneidenden 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

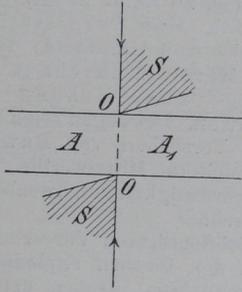


Fig. 154.

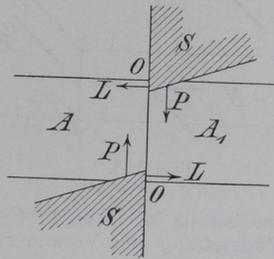


Fig. 155.

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.

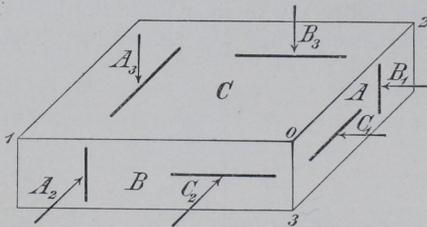


Fig. 156.

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 einschneittig, 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

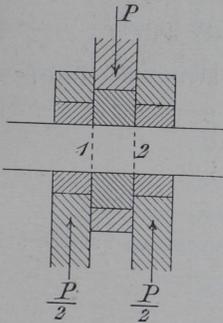


Fig. 157.

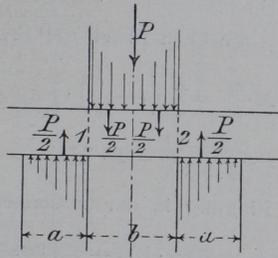


Fig. 158.

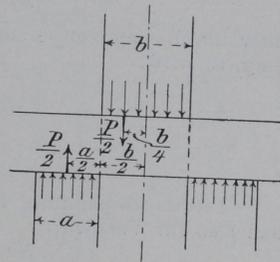


Fig. 159.

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

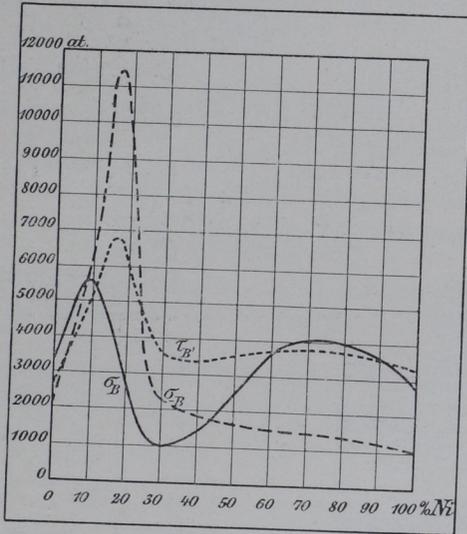


Fig. 160.

Festigkeitseigenschaften von Eisen-Nickellegirungen mit wachsendem Nickelgehalt.
 σ_B = Tragfestigkeit, $\sigma_{B'}$ = Druckfestigkeit, $\tau_{B'}$ = 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,

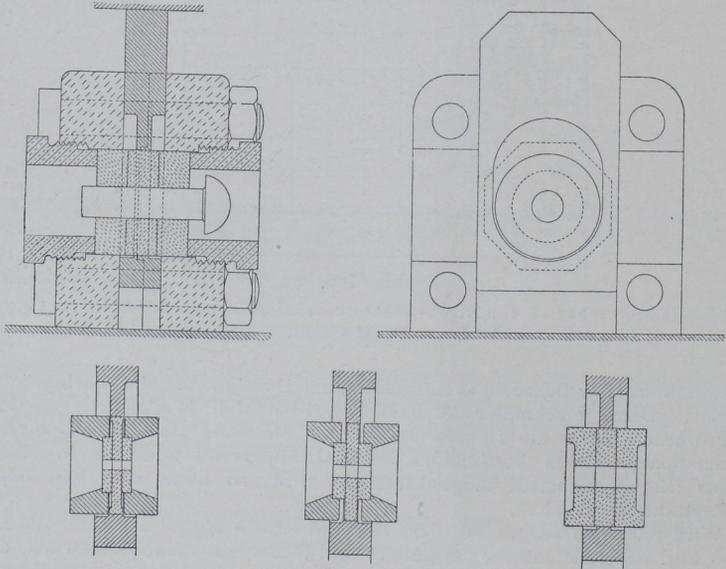


Fig. 161.

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 zweisehnittigen 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

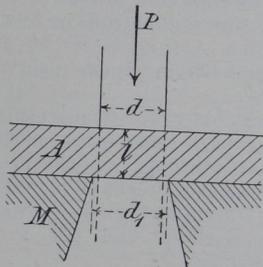


Fig. 162.

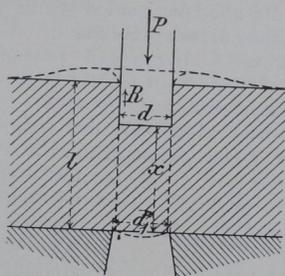


Fig. 163.

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

$$\tau_{\text{L}} = \frac{P}{f}, \text{ wenn}$$

$f = \pi dl$ 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:

$$\tau_{\text{L}} = \frac{P}{\pi dl}.$$

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 Lochen 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-

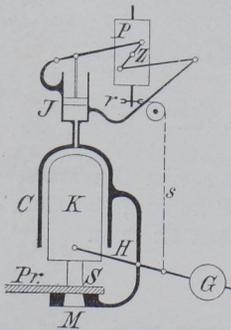


Fig. 164.

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.

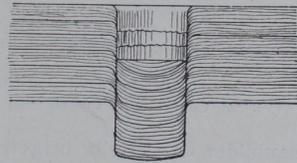


Fig. 165.

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

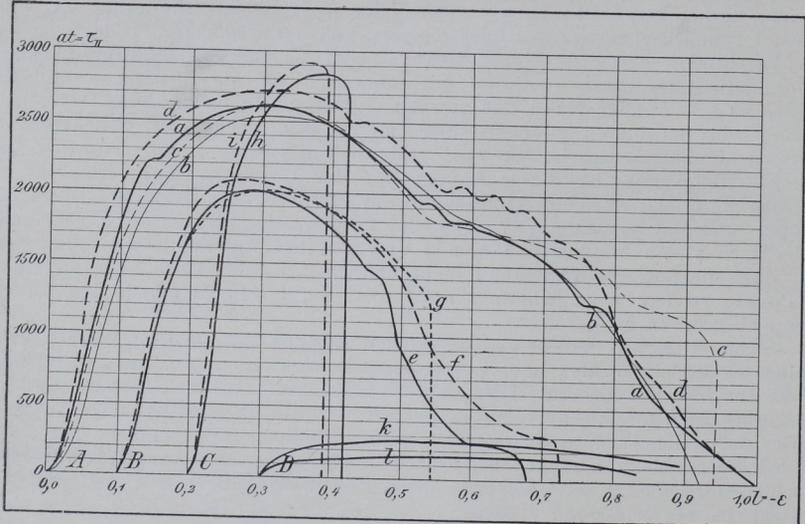


Fig. 166. Schaubilder von Lochversuchen.

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_{II} 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.

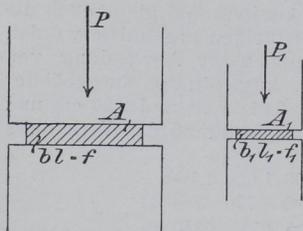


Fig. 167.

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

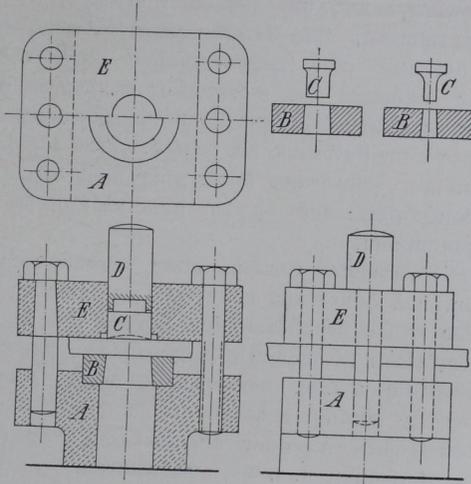


Fig. 168.

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.