

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

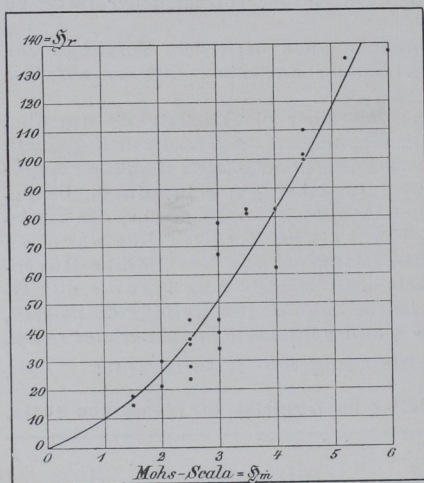


Fig. 242.

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

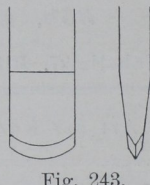


Fig. 243.

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  $\delta$  und  $q$  Maasse für die Zähigkeit sind, dann hat  $\delta$  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

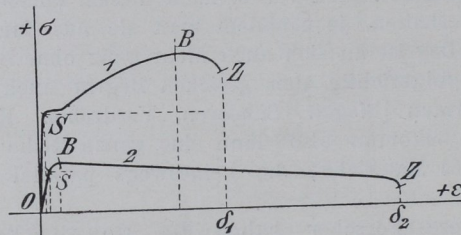


Fig. 244.

$\sigma_B - \sigma_S$  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  $\sigma_S$  und  $\sigma_B$  als Maasswerth benutzen, welches ebenso wie das Verhältniss zwischen  $\sigma_P$  und  $\sigma_B$  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  $\sigma_S/\sigma_B$ , um den Grad der mechanischen Bearbeitung von Metallen auszudrücken. Dieser Werth  $\sigma_S/\sigma_B$  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  $\sigma_B/\sigma_S$  als Maassstab für die Zähigkeit zu benutzen.

**366.** Will man dem Vorschlage Reisers folgen, so würde durch die Zusammenfassung mit dem Werthe  $\sigma_B/\sigma_S$  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  $\sigma_S/\sigma_B$  zur Materialbeurtheilung bereits errechnet, so ist die Berechnung von  $\mathfrak{Z}$  mit Hülfe des Rechenmaassstabes aus den Werthen  $\sigma_S/\sigma_B$  und  $\delta$  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  $\delta$  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  $\delta$  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-

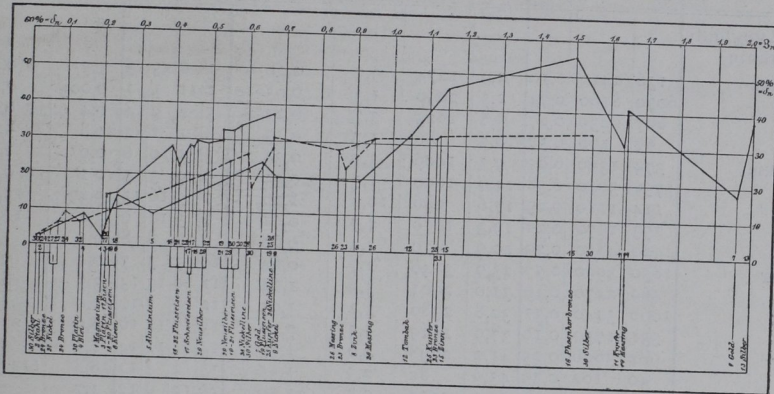


Fig. 245.

Zähigkeit und Bildsamkeit von Metallen.

gebnisse zur Anschauung gebracht. Für verschiedene Metalle und Metalllegirungen finden sich die Zähigkeitszahlen nach den oben besprochenen

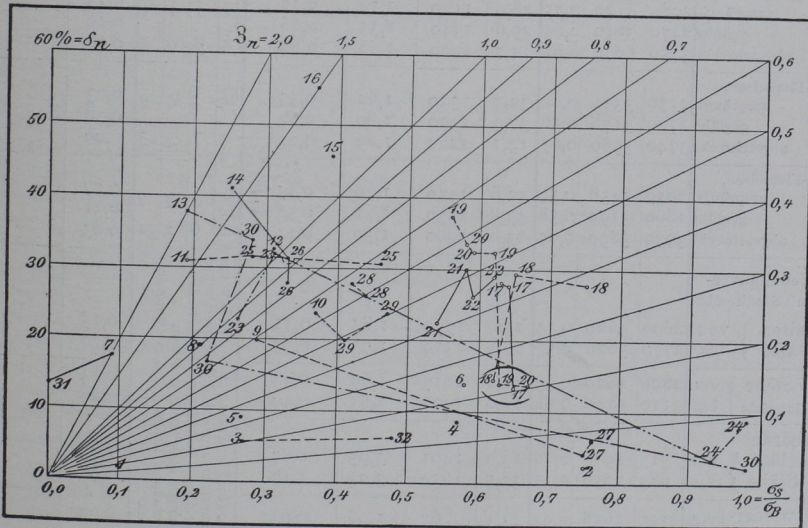


Fig. 246.

Einfluss von  $\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$  und  $\delta_n$  auf die Zähigkeit  $\mathfrak{Z}_n$ .

Tabelle 28. Gegenüberstellung der Zähigkeit und Bildungsamkeit von Metallen nach verschiedenen Maassstäben.

Material	$\sigma_S$ at	$\sigma_B$ at	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit				Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildungsamkeit		Ordnungszahlen nach Maassstäben e u. f		
				$\delta_n$ %	$\sigma_B - \sigma_S$ at	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S}$	$\frac{\sigma_B}{\sigma_S} \cdot \frac{\delta_n}{100}$	a	b	c	d	$\frac{\sigma_S}{\sigma_S} \cdot 10^3$	$\frac{Z}{aT}$			
															e	f
a) <b>H. Fischer, gegläute Metalldrähte</b>																
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) <b>Charlottenburg, Mittelwerthe</b>																
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) <b>Aus Uebungsversuchen mit Studirenden</b>																
21) Flusseisen } von 5 Stäbe	2600	4620	0,54	22,6	1990	1,85	0,41						0,15	0,20		
} bis 2770	2770	5020	0,58	29,8	2310	1,73	0,53									
22) desgl. 7 Stäbe } von gleichen Materials	2890	4820	0,59	26,2	1819	1,69	0,43									
} bis 3110	3110	5100	0,62	29,0	1990	1,61	0,49									
23) Broncedraht geglüht } von 3 Stäbe	513	1979	0,26	23,0	1401	3,95	0,87						1,45	1,88		
} bis 685	685	(2250)	0,31	32,5	1650	3,23	1,13									
24) Desgl. wiederholt zerrissen, 3 Stäbe	2500	2656	0,93	(3,4)	67	1,08	0,04						0,02	0,06		
} bis 2766	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	1,60		
} bis 700	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 geprüft.

Tabelle 28. (Fortsetzung.)

Material	$\sigma_S$ at	$\sigma_B$ at	$\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$	Maassstäbe für die Zähigkeit				Ordnungszahlen nach den Maassstäben				Maassstäbe für die Bildsamkeit		Ordnungszahlen nach Maassstäben e u. f
				$\delta_n$ %	$\sigma_B - \sigma_S$ 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 1620	1650 1050 1650	0,22 0,28 0,97	17,0 34,0 2,3	1180 1290 30	4,55 3,45 1,03	0,61 1,55 0,02					1,30 4,30 0,01		
31) Golddraht	0	730	0,00	13,3	730	$\infty$	$\infty$					$\infty$		
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  $\delta_n$ .

Um einen noch besseren Ueberblick zu geben, wie die beiden Einzelfaktoren  $\sigma_S / \sigma_B$  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  $\delta_n$ , während  $\sigma_S / \sigma_B$  konstant bleibt, obwohl nach Tab. 28 die Werthe  $\sigma_S$  und  $\sigma_B$  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 Bearbeitung<sup>1)</sup> sowohl auf das Verhältniss  $\sigma_S / \sigma_B$  als auch auf  $\delta_n$  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-

<sup>1)</sup> 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 Häufens 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  $170^\circ$  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