

Abkühlungsgeschwindigkeit von Werkstücken aus schmiedbarem Eisen sich deutlich bei der Kerbschlagprobe, fast nicht bei der Zugprobe erkennbar macht (336 am Schluß).

Tabelle XXXII.

	Chemische Zusammensetzung		Zugprobe			Kerbschlagprobe \mathfrak{B}_3
	P %	S %	σ_S at	σ_B at	$\delta_{11,3\sqrt{f}}$ %	
Randzone	0,088	0,04	—	—	—	0 bis $1/2$
Längs der dunklen Streifen in der Kernzone	0,203	0,16	—	—	—	0
Kernzone	—	—	—	—	—	0 bis $1/2$
Durchschnitt über die ganze Blechdicke	0,168	0,10	{ 2630 [2460]	4290 4230	23,8 l 25,4 qu	—

l = Längsprobe, qu = Querprobe.

Die Zahl der angeführten Fälle läßt sich noch bedeutend vermehren (vgl. E. Heyn, L_4 76 und L_3 3).

Die obigen Beispiele dürften genügen, um darzutun, daß die Kerbschlagprobe Aufschlüsse gibt, welche die bisherigen Verfahren nicht liefern können, und daß also eine Ergänzung dieser Prüfungsverfahren durch die Kerbschlagprobe zum wenigsten bei Eisen und seinen Legierungen unerlässlich ist, wenn man sich ein vollständiges Bild von den Eigenschaften des Materials verschaffen will.

Natürlich ist die Kerbschlagprobe kein Universalmittel, das die Eignung des Materials für jeden Zweck dartut. Es ist ein Hilfsmittel mehr zur Erkenntnis, weiter nichts.

Sie gibt uns aber klaren Aufschluß darüber, ob ein Material empfindlich ist gegenüber der Kerbwirkung, insbesondere bei stoßweiser Beanspruchung. Die Kerbwirkung ist bei der Mehrzahl unserer Konstruktionen nicht zu vermeiden. Querschnittsänderungen, mehr oder weniger abgerundete einspringende Kanten, Niet- und Schraubenlöcher, Gewinde usw. lassen sich nicht umgehen. Stoßweise Beanspruchung ist bei bewegten Maschinenteilen selbstverständlich. Aber auch bei ruhenden Bauteilen, wie z. B. in Dampfkesseln u. dgl. können kräftige stoßweise Beanspruchungen infolge plötzlicher Temperaturungleichmäßigkeiten (Wärmespannungen) oft genug auftreten (330). Um so mehr muß Wert darauf gelegt werden, über die Widerstandsfähigkeit der Materialien solchen Beanspruchungen gegenüber Aufschluß zu erhalten.

F. Härte und Bearbeitbarkeit.

(Ergänzungen zu I, 341 bis 359, Härteprüfung)¹⁾.

a) Kugeldruckprobe.

350. Nach Erscheinen des ersten Bandes hat seit 1900 die Härtebestimmung durch die Kugeldruckprobe auf Grund der Arbeiten von Brinell (L_4 87, 88, 89 und 95) weite Verbreitung gefunden. Hierbei wird eine Kugel K aus gehärtetem

¹⁾ Die Ergänzung soll hier nur so weit gegeben werden, als zum Verständnis des Inhalts des II. Bandes unbedingt erforderlich ist; alles übrige ist der Neuauflage des ersten Bandes vorbehalten.

Stahl vom Durchmesser D , wie sie für Kugellager verwendet wird, unter einem bestimmten Druck P in das zu prüfende Material eingedrückt (Abb. 415). Der Durchmesser des Eindrucks d wird gemessen; mit seiner Hilfe wird die Oberfläche der durch den Eindruck gebildeten Kugelkalotte f_k berechnet. Das Verhältnis

$$\mathfrak{H} = \frac{P}{f_k} \dots \dots \dots (24)$$

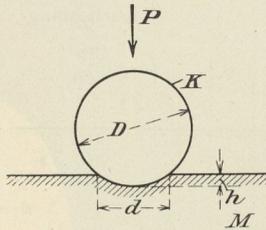


Abb. 415.

in kg/qmm ist dann die Brinellsche Härtezahl. Sie gibt also den auf die Einheit der Fläche der Eindruckskalotte bezogenen Druck als Maßstab für die Härte. Die Berechnung von f_k geschieht nach der bekannten Formel

$$f_k = \pi D h$$

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$$

Darin ist h die Eindringtiefe unter der Voraussetzung, daß die Kugel unter dem Druck keine elastische Abplattung erfährt, also die Eindruckskalotte denselben Krümmungshalbmesser hat wie die unbelastete Kugel. Dann ist

$$\mathfrak{H} = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right)} \dots \dots \dots (25)$$

Im Bereich der preußischen Staatseisenbahnen wurde seit 1900 auf Grund der Untersuchungen Kohns die Prüfung der Schienen auf Kugeldruckhärte an Stelle der bis dahin vorgeschriebenen Zugprobe zugelassen. Die angewendeten Kugeln haben 19 mm Durchmesser. Sie werden unter einem Druck von 50 t in den Schienenkopf eingedrückt. Die Eindringtiefe darf nicht weniger als 3,3 und nicht mehr als 5,5 mm betragen. Bei besonders verschleißfesten Schienen (σ_B mindestens 7000 at) soll der Eindruck zwischen 3 und 5 mm liegen ($I_4 90$). Kohn soll bereits vor Brinell die Kugeldruckprobe angewendet haben ($I_4 91$).

Die Ausführung der Kugeldruckprobe ist sehr einfach. Kohn verwendet die Schiene ohne jede Vorbereitung. Brinell stellt aus dem zu prüfenden Stoff eine Platte her, deren Flächen nur angenähert parallel zu sein brauchen. Die Fläche, auf die der Druck wirkt, muß einigermaßen glatt sein, Polieren ist aber nicht notwendig. Die Dicke der Platte soll nicht zu gering sein, nicht unter 2,5 mm. Der Abstand der Mitte des Eindrucks von der Kante der Platte soll nicht kleiner als 14 mm sein, damit der gefundene Wert der Kugeldruckhärte nicht durch seitliche Ausbauchung der Seitenflächen der Platte beeinflusst wird. Der Druck P wird mit irgendeiner Vorrichtung erzeugt, die den Druck zu messen gestattet. Die Größe des Durchmessers d des Eindrucks kann mit Hilfe eines einfachen Mikroskops oder auf andere Weise gemessen werden. Die Messung hat mindestens nach zwei aufeinander senkrechten Richtungen zu erfolgen. Der Kugeldurchmesser D ist bei Brinell 10 mm.

Brinell war sich wohl bewußt, daß die Beziehung des Druckes auf die Einheit der Eindrucksfläche $f = \frac{\pi}{4} d^2$ theoretisch richtiger wäre, als die Beziehung auf die Einheit der Kalottenoberfläche f_k . Er wählte aber die letztere aus folgendem Grunde. Beim Vordringen der Kugel in das Material erhöht sich die Härte infolge Kaltreckens, d. h. mit steigenden Eindringtiefen erhält man immer höhere Härtezahlen. Brinell glaubte diese Steigerung dadurch bis zu einem gewissen

Grade ausgleichen zu können, daß er das Verhältnis $\frac{P}{f_k}$ statt $\frac{P}{f}$ verwendete, da ja f_k mit wachsender Eindrucktiefe schneller wächst als f . Hiermit hat Brinell erzielt, daß der Wert seiner Härtezahl \mathfrak{H} mit steigender Eindrucktiefe, also bei gleichem Material mit steigendem Druck P , nicht so schnell wächst als die Zahl

$$\mathfrak{H}' = \frac{P}{f}.$$

Zu bedenken bleibt aber, daß die Härtezahl \mathfrak{H} trotzdem bei einem und demselben Material mit dem Druck P und dem Durchmesser der Kugel D veränderlich ist. Es ist deshalb erforderlich, sich auf einen bestimmten Kugeldurchmesser D und einen bestimmten Druck P zu einigen, damit die für verschiedene Materialien gewonnenen Härtezahlen vergleichbar sind. Brinell fand, daß der Durchmesser D am zweckmäßigsten gleich 10 mm gewählt würde. Er schlug als Druck P 3000 kg für Eisen und Stahl, für weichere Metalle 500 kg vor. Dieser Vorschlag ist aber für alle Metalle und Legierungen nicht gut durchführbar; einmal, weil der Druck von 500 kg bei weichen Stoffen bereits zu tiefe Eindrücke oder bei spröderen Stoffen Risse am Umfang des Druckkreises gibt, andererseits, weil der Druck 3000 kg für manche Stoffe zu groß und der von 500 kg zu klein ist. Brinell war selbst gezwungen, Zwischendrücke von 1000 kg anzuwenden.

Im folgenden wird der Druck P , bei dem die Brinellsche Härtezahl ermittelt wurde, dem Buchstaben \mathfrak{H} als Anzeiger beigeschrieben werden. \mathfrak{H}_{3000} bedeutet also z. B. \mathfrak{H} für $P=3000$ kg.

Durch die willkürliche Wahl der Drücke wird die Vergleichbarkeit der Härtezahlen verschiedener Stoffe erschwert. Praktisch verschwindend ist dieser Nachteil bei der laufenden Betriebskontrolle, wo es sich immer um Gruppen von ähnlichen Stoffen handelt, bei denen man P unverändert halten kann. Hier hat das Kugeldruckverfahren sein eigenstes Arbeitsfeld erlangt.

Nach E. Rasch (L_4 9) und E. Meyer (L_4 10) läßt sich die Beziehung zwischen dem angewendeten Druck P und dem Durchmesser des Eindruckkreises d mit genügender Genauigkeit durch die Gleichung

$$P = ad^n \dots \dots \dots (26)$$

darstellen, worin a und n unveränderliche, nur von der Art und dem Zustand des zu prüfenden Materials abhängige Größen sind. Sie sind von der Art des zu den Stahlkugeln verwendeten Materials unabhängig, sofern dieses nur wesentlich härter ist, als das des zu prüfenden Stoffes. Bei Anwendung von Stahlkugeln mit 10 mm Durchmesser gilt das durch die Gl. 26 ausgedrückte Gesetz dann nicht mehr, wenn der Durchmesser des Eindruckkreises d kleiner als 1 mm wird (E. Meyer, L_4 10). Die obere Grenze des Gesetzes ist nicht bekannt; jedenfalls gilt es nach Meyer für alle bisher untersuchten Stoffe bis zu Drücken von $P=3000$ kg bei Anwendung einer Stahlkugel von 10 mm Durchmesser.

Die Werte von a liegen zwischen 20 und 270 kg/qmm, die von n zwischen 1,91 und 2,38.

Meyer schlägt als Maßstab für die Härte den mittleren Druck vor, der infolge Einpressens der Kugel in der Druckfläche entsteht. Dieser soll mit \mathfrak{H}' bezeichnet werden. Er ergibt sich aus der Gleichung

$$\mathfrak{H}' = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d^2} \dots \dots \dots (27)$$

Nach Einsetzen des Wertes von P aus der Gl. 26 erhält man dann weiter

$$\mathfrak{S}' = \frac{4a}{\pi} \cdot d^{n-2} \dots \dots \dots (28)$$

Nach dem Gesetz der proportionalen Widerstände (I, 151) muß man bei einem und demselben Material auch bei verschiedenen Kugeldurchmessern D zu gleichen Härtezahlen \mathfrak{S}' gelangen, wenn sich verhalten

$$D_1 : D_2 = d_1 : d_2.$$

Da

$$\mathfrak{S}'_1 = \frac{P_1}{\frac{\pi}{4} d_1^2} = \mathfrak{S}'_2 = \frac{P_2}{\frac{\pi}{4} d_2^2}$$

sein soll, so muß sein

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}.$$

Man erhält also gleiche Härtezahlen, wenn die Drücke P so gewählt werden, daß sie sich wie die Quadrate der Kugeldurchmesser verhalten. E. Meyer fand bei Versuchsreihen mit verschiedenen Materialien das Gesetz innerhalb der Fehlergrenzen des Versuchsverfahrens bestätigt.

In dem Gesetz $P = ad^n$ bedeutet a diejenige Belastung, die zur Erzielung des Eindruckdurchmessers $d = 1$ mm erforderlich ist. Die Unveränderliche a hat daher die Maßeinheit kg/mm^n . Da \mathfrak{S}' mit P und folglich auch mit d veränderlich ist, so würde zur Kennzeichnung der Härte, wie E. Meyer betont, nicht ein einzelner Wert von \mathfrak{S}' aus der durch Gl. 28 dargestellten Kurve herausgegriffen werden dürfen, sondern jeder Punkt dieser Kurve zur Kennzeichnung der Härte gleichberechtigt sein. D. h. mit anderen Worten, man muß für jeden Stoff die Kurve \mathfrak{S}' als Härtemaßstab angeben. Das erschwert natürlich den Vergleich. Meyer benutzt deshalb zum Vergleich verschiedener Stoffe diejenige Zahl \mathfrak{S}' , die den Eindruckdurchmesser $d = 1$ mm gibt, das würde also nach Gl. 28 sein

$$\mathfrak{S}'_1 = \frac{4a}{\pi} \dots \dots \dots (29)$$

Ferner benutzt er auch nach dem Vorgang von Brinell die Härtezahl \mathfrak{S}' für einen bestimmten willkürlichen Druck P . Diese Zahl wollen wir mit \mathfrak{S}'_P bezeichnen, wobei der Anzeiger P den gewählten Druck P angibt. Es ist dann

$$\mathfrak{S}'_P = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d^2} \dots \dots \dots (30)$$

Der Härtenmaßstab \mathfrak{S}'_1 nach Gl. 29 muß aus der durch den Versuch ermittelten Schaulinie $P = ad^n$ entnommen werden. Hierzu ist es erforderlich, mehrere Punkte dieser Schaulinie durch den Versuch zu bestimmen, um die Größe a mit der erforderlichen Sicherheit zu erhalten. Dadurch wird das Verfahren etwas umständlich und verliert den Vorzug der Einfachheit der Ausführung, der gerade seine weite Verbreitung begünstigt hat.

Der Härtemaßstab \mathfrak{S}'_P kommt auf dasselbe hinaus, wie die Brinellzahl \mathfrak{S} , nur daß der Druck statt auf die Oberfläche der Kalotte auf die Fläche des Eindruckkreises bezogen wird. Diesem Härtemaßstab haftet bezüglich des Vergleichs verschieden harter Stoffe derselbe Nachteil an, der bereits bei Besprechung der Brinellzahl hervorgehoben wurde. Man muß für verschieden harte Stoffe verschieden große Drücke P wählen.

351. Bei manchen Materialien bietet die Messung des Eindruckdurchmessers Schwierigkeiten, namentlich wenn die Eindrücke mit kleinen Kugeln und geringen Drücken P durchgeführt werden. Diese Art der Durchführung des Versuchs hat aber gerade dann Interesse, wenn es sich darum handelt, die ursprüngliche Oberflächenhärte von Stoffen kennen zu lernen. Wendet man hierbei große Eindrucktiefen an, so erhält man die Härte des unter der Kugel stark kaltgereckten, also härter gemachten Materials. In der Beziehung $P = ad^n$ ist ja die Steigerung der Härte durch diese Kaltreckung mit inbegriffen. Diese Beziehung hat deswegen auch nur dann Wert, wenn man sich tatsächlich ein Bild von der Veränderung der Härte unter der Druckwirkung machen will, nicht aber dann, wenn man sich ein Urteil über den Widerstand bilden will, den ein Stoff in seinem ursprünglichen Zustand dem Eindringen eines Körpers entgegensetzt.

Wird die Kugeldruckprüfung als Ersatz verwendet für die Zugprobe, will man also aus den Angaben der Kugeldruckprobe auf die Zugfestigkeit σ_B eines Stoffes schließen, so wird man mit tiefen Eindrücken dem Ziel näher kommen, als mit flachen, denn der Zugversuch erschöpft ja auch die Arbeitsfähigkeit des Stoffes bis zu einem gewissen Grade und erfolgt unter fortgesetztem Kaltrecken. Ebenso wird man die Beziehung $P = ad^n$ dazu benutzen können, um sich ein Bild zu verschaffen von dem Grade, in dem die Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegenüber bleibender Formänderung durch Kaltrecken gesteigert wird.

Ferner erscheint mir die Anwendung großer Eindrucktiefen zweckmäßig bei der Prüfung von Schienenmaterial, wie sie von Kohn eingeführt ist. Hier handelt es sich nicht um Feststellung der Oberflächenhärte, sondern um Ermittlung des Widerstandes, den der Schienenkopf (Oberflächenschicht einschließlich der in größerer Tiefe darunter befindlichen Stoffteile) dem Druck entgegensetzt. Insbesondere soll sich bei der Probe zeigen, ob etwa im Schienenkopf tief unter der Oberfläche Hohlräume oder sonstige Fehlstellen liegen, die die Widerstandsfähigkeit der Schiene gegenüber dem Betriebsdruck vermindern können. Die Probe ist hier nicht nur Härteprobe, sondern auch gleichzeitig Probe auf etwaige Fehlstellen im Schienenkopf. Es muß deswegen ein Verfahren gewählt werden, bei dem das Material von der Oberfläche her möglichst weit bis ins Innere hinein mit beansprucht wird. Das ist erzielbar durch große Kugeln ($19 \text{ mm} = D$ nach Kohn) und tiefe Eindrücke (3 bis 5 mm).

Will man jedoch die ursprüngliche Oberflächenhärte eines Stoffes kennen lernen, beispielsweise um festzustellen, welchen Widerstand ein Lagermetall gegenüber dem Lagerdruck bietet, so eignet sich die Kugeldruckprobe mit tiefen Eindrücken nicht. Ein Lager, das durch die Druckwirkung bereits stark kaltgereckt und damit stark in seiner Form verändert wurde, ist nicht mehr betriebsfähig. Es ist daher auch gleichgültig, welche Härte es in diesem Zustande angenommen hat. Wesentlich ist der Widerstand gegen kleine Formänderungen unter Druck, die die Form des Lagers nicht wesentlich beeinflussen. Hier ist mithin die Härteprüfung mit kleinen Eindrücken am Platz. Es kommt hier das Bereich der kleinen Eindruckdurchmesser in Betracht, bei dem die Beziehung $P = ad^n$ nicht mehr gültig ist.

1. Härteprüfer Bauart Martens.

Zur schnellen und bequemen Messung kleiner Eindrucktiefen hat A. Martens einen Kugeldruckhärteprüfer entworfen. Über die Art der Durchführung der Prüfung hat er dann in Gemeinschaft mit dem Verfasser berichtet (L_4 92 und 93).

Der von Louis Schopper-Leipzig ausgeführte Härteprüfer ist in Abb. 416 dargestellt. Er besteht aus einem Druckerzeuger, der im unteren Teile der Vorrichtung liegt, und der darüber befindlichen Vorrichtung zur Messung der Eindrucktiefe h .

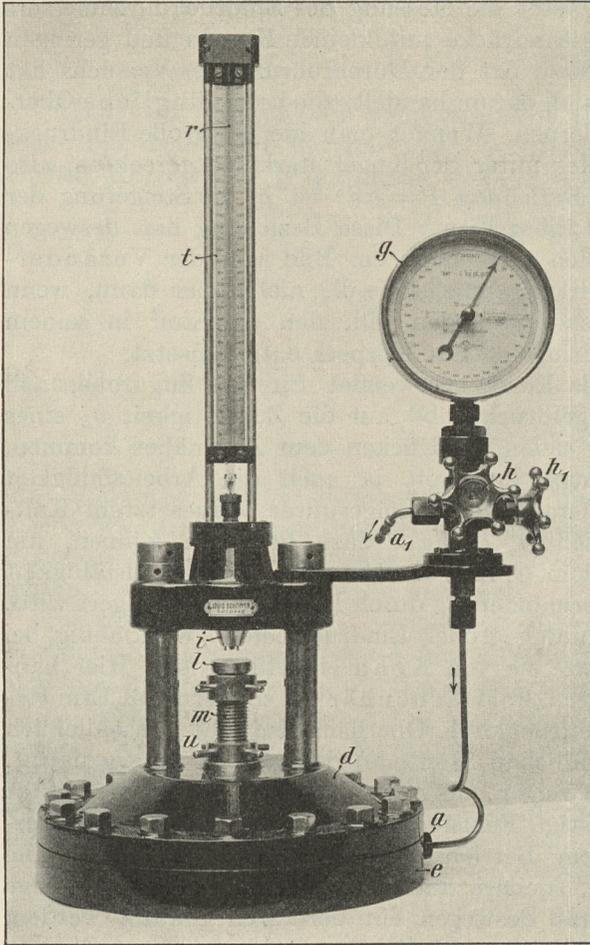


Abb. 416. Härteprüfer Bauart Martens.

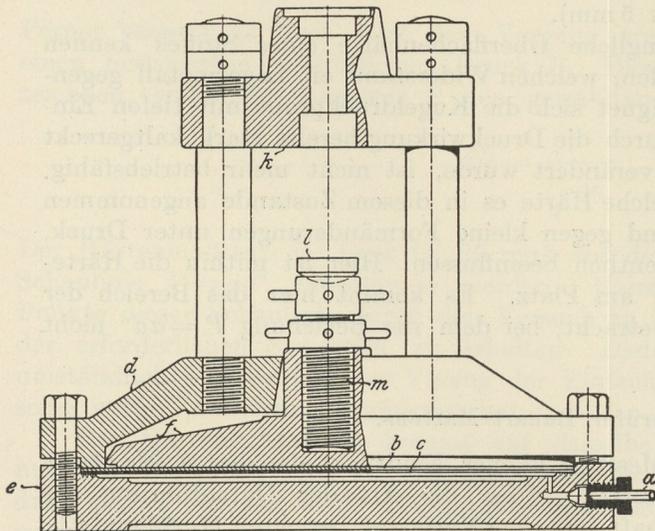


Abb. 417.

Der Druckerzeuger ist in Abb. 417 im Schnitt dargestellt. Das durch den Anschlußstutzen *a* aus der Wasserleitung eintretende Wasser gelangt unter eine Lederscheibe *b*, unter der sich die Gummihaut *c* befindet. Beide sind zwischen Deckel *d* und Grundplatte *e* wasserdicht festgeklemmt. Wird durch *a* Wasser zugelassen, so hebt sich die Membrane *b, c* und übt auf den Kolben *f*, dessen wirksame Fläche 500 qcm beträgt, einen bestimmten Druck *P* aus. Die Wasserpressung wird am Manometer *g*, Abb. 416, abgelesen, das in 300 Grade = 5 kg/qcm eingeteilt ist.

Durch Ventil *h* kann man den Wasserzufluß zu *a* und damit den Druck *P* regeln. Der höchste zulässige Druck ist, da das Manometer bis $z = 300$ anzeigt, 2500 kg.¹⁾

Die 5 mm-Stahlkugel *n* wird mit einer Spur Klebewachs in dem Futterkörper *i* befestigt, der sich gegen das Querhaupt *k* lehnt, s. Abb. 418 und 419. Der auf Härte zu prüfende Probekörper wird auf den Tisch *l* aufgelegt. Dieser ruht mittels Kugellagerung auf dem oberen Teil der Stellschraube *m*. Die Stellschraube dient zur Einstellung des Abstandes zwischen Oberkante des Tisches *l* und der Kugel *n* auf die Dicke des zu prüfenden Probekörpers.

Soll der Druck *P* vermindert werden, so ist Ventil *h* für den Wasserzutritt zu schließen, während durch Handrad *h₁* der Raum unter dem Kolben *f* mit dem Wasserabfluß *a₁* in Verbindung gebracht wird. Aus später zu erwähnenden Gründen ist es zweckmäßig, den Steuerkörper *h, h₁, a₁* nicht wie in Abb. 416 oben am Querhaupt, sondern unten auf dem Tisch anzubringen, auf dem der Härteprüfer steht, und das Auslaßrohr *a₁* mit schwachem Gefälle zu versehen.

Die Vorrichtung zum Messen der Eindringtiefe der Kugel ist ersichtlich aus Abb. 416 sowie 418 und 419. Die 3 Stahlstäbchen *o* legen sich auf die zu prüfende Fläche des Probekörpers auf. Sie tragen auf Spitzen die Stahlplatte *p*. Auf dieser ruht ein Führungskolben *m₁* und auf diesem schließlich im Schwerpunkt des Stützdruckes der drei Spitzen an *p* der Stahlkolben *m₂*, der in seinem Zylinder quecksilberdicht eingeschliffen ist. In dem Raum *q* oberhalb des Kolbens *m₂* befindet sich Quecksilber, das in das Glasröhrchen *r* hineinragt. Mittels des Stellkölbchens *s*, Abb. 419,

¹⁾ Neuerdings liefert Schopper den Härteprüfer bis zu 3000 kg Druck und zum Gebrauch mit 5 und 10 mm-Stahlkugel.

kann der Quecksilberspiegel in dem Haarröhrchen r in die Nullstellung gebracht werden. Wird nun unter dem Druck P die Kugel in das Probestück eingepreßt, so werden die Stahlstifte o und mit ihnen in gleichem Maße die gesamten Teile p , m_1 , m_2 gehoben. Das Quecksilber wird aus dem Raume q zum Teil verdrängt und steigt im Röhrchen r um einen Betrag, der an der Skala t abgelesen wird, und der in Beziehung zur Eindringtiefe h der Kugel steht.

Die Eichung des Haarröhrchens r erfolgt mit Hilfe einer Mikrometerschraube, die an Stelle des Tisches l auf die Stellschraube m aufgebracht wird und dem Meßgerät beigegeben ist. Sie wird in das Muttergewinde m_3 eingeschraubt und hat oben einen mit Teilung versehenen Kopf, während der Teil m_4 der Stellschraube m die Nullmarke trägt. Der Kopf der Mikrometerschraube wird durch die Stellschraube m nach oben bewegt, bis er die Stäbchen o des Tiefenmessers eben anhebt. Das Quecksilber in dem Röhrchen r wird durch den Stellkolben s auf Null eingestellt. Man hebt nun durch Drehen des Kopfes der Mikrometerschraube die Stahlstäbchen o um bekannte Beträge und liest den jedesmaligen Stand des Quecksilbers im Röhrchen r ab. Als dann dreht man die Mikrometerschraube im entgegengesetzten Sinne und wiederholt die Ablesungen während des Niederganges des Quecksilbers.

Infolge des Gewichtes der Quecksilbersäule im Tiefenmesser entsteht ein Gegendruck auf den Probekörper, der dem Druck P entgegenwirkt. Dieser Gegendruck ist aber bei den größten Eindringtiefen h nicht größer als 3 kg und bei kleinen Eindrücktiefen erheblich geringer, so daß er vernachlässigt werden kann.

Die elastischen Formveränderungen innerhalb des Tiefenmessers, die sich unter dem genannten Druck einstellen können, z. B. durch elastische Zusammendrückung der Stäbchen o oder durch elastische Formänderungen der Spitzenlagerung der Platte p , können das Ergebnis der Tiefenmessung nicht beeinflussen, da sie bei der Eichung der Skala t mittels der Mikrometerschraube bereits berücksichtigt sind.

2. Prüfungsergebnisse mit dem Härteprüfer, Bauart Martens.

Übt man auf einen Probekörper einen Druck P mittels der Kugel aus, so gibt das Quecksilber im Tiefenmesser einen Anstieg h' in Millimeter an. Dieser Anstieg h' ist nun aber nicht ohne weiteres gleich der bleibenden Eindringtiefe h der Kugel, sondern in dem Werte h' sind außer h noch die Beträge h_e für elastische Formänderungen im Apparat und für die elastische Höhenverminderung der Kugel enthalten. Auch die elastische Eindrückung des Probekörpers kann gegebenenfalls noch hinzukommen. Das Tiefenmaß mißt ja weiter nichts als den Betrag, um den die obere Fläche des Probekörpers gegenüber der Anfangstellung gehoben ist. Solches Anheben kann aber außer durch den bleibenden Kugeleindruck durch die drei genannten elastischen Wirkungen erfolgen.

Drückt man in irgendeinen Stoff die Kugel unter wachsendem Druck ein, so wird die Beziehung zwischen Druck P und Stellung des Tiefenmaßes durch die Kurve OA in Abb. 420 dargestellt, worin der Druck als Ordinate, die Stellung des Tiefenmaßes als Abszisse verwendet ist. Im Punkt A entspricht dem Druck P

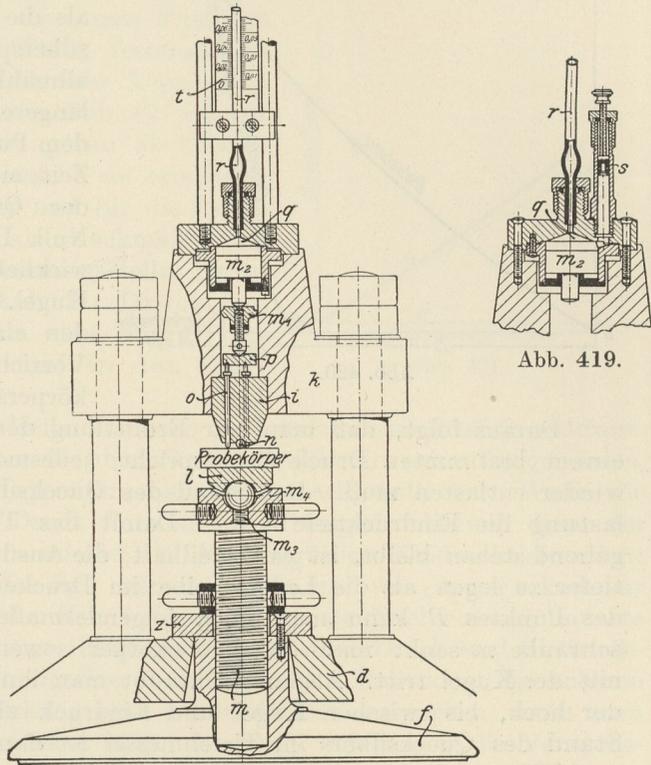


Abb. 418.

Abb. 419.

die Stellung des Tiefenmaßes h' . Schließt man nun den Wasserzufluß und öffnet allmählich den Wasserauslaß, so sinkt der Druck nach Maßgabe der Manometer-

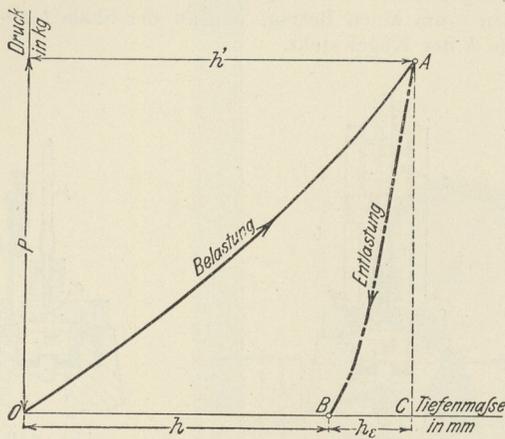


Abb. 420.

anzeige, gleichzeitig sinkt das Quecksilber im Tiefenmesser. Die Entlastungskurve AB ist aber eine wesentlich andere als die Belastungskurve OA . Der Quecksilberspiegel sinkt bei der Entlastung allmählich und bleibt beim Druck Null längere Zeit in der Höhe h entsprechend dem Punkte B stehen. Erst nach einiger Zeit sinkt bei voll geöffnetem Ausfluß der Quecksilberspiegel weiter bis auf Null. Die Strecke $OB = h$ entspricht der wirklichen bleibenden Eindringtiefe der Kugel. Der Betrag $BC = h_e$ entspricht den elastischen Formveränderungen der Vorrichtung, der Kugel und des Probekörpers selbst.

Daraus folgt, daß man zur Ermittlung der bleibenden Eindringtiefe h , die einem bestimmten Druck P entspricht, jedesmal bis zu P belasten und darauf wieder entlasten muß. Der Stand des Quecksilbers im Tiefenmaß gibt bei Entlastung die Eindringtiefe h an. Damit das Tiefenmaß im Punkte B vorübergehend stehen bleibt, ist es vorteilhaft, die Ausflußöffnung des Abflußrohres etwas tiefer zu legen als die Lederscheibe im Druckerzeuger. Zur Kontrolle der Lage des Punktes B kann man noch folgendermaßen verfahren. Mittels der Stellschraube m senkt man den Probekörper soweit, daß er ganz außer Berührung mit der Kugel tritt. Alsdann schraubt man ihn mittels der Stellschraube m wieder hoch, bis zwischen Kugel und Eindruck eben wieder Fühlung erfolgt. Der Stand des Quecksilbers im Tiefenmesser ist dann wieder gleich h .

Wie man sieht, ist es für die Handhabung des Gerätes nicht erforderlich, über die elastischen Formänderungen h_e Ermittlungen anzustellen, da man sie ausschalten kann.

Die Vorrichtung gestattet aber bequem, über das Maß dieser Änderungen Aufschluß zu erlangen. Näheres hierüber s. L_4 93. Hier soll nur darauf hingewiesen werden, daß die Kugel ganz erheblich elastisch abgeplattet werden kann. Die Abplattung kann bis zu 80 v. H. und mehr von dem Wert der bleibenden Eindringtiefe h ausmachen. Sie ist bei niederen Drücken P stärker als bei höheren und bei harten Probestoffen größer als bei weichen.

Es entsteht nun die Frage, in welcher Weise die durch den Martensschen Prüfer gemessenen Eindringtiefen h zur Kennzeichnung der Härte verwendet werden können.

Man könnte nach Brinell (350) als Härtemaßstab den Quotienten $\frac{P}{2\pi r h}$ verwenden, worin r der Halbmesser der unbelasteten Kugel ist. Der Wert von $2\pi r h$ entspricht aber hierbei nicht mehr der Oberfläche der Eindruckkalotte, die ja durch den Ausdruck $2\pi R h$ dargestellt wird, wo R der mit P veränderliche Krümmungshalbmesser des Eindruckes ist. In dem Ausdruck $\frac{P}{2\pi r h}$ tritt somit r als willkürliche Konstante auf. Es liegt also nahe, einfach das Verhältnis zwischen Druck P und Eindringtiefe h als Härtemaßstab zu benutzen. Da dies Verhältnis mit dem Halbmesser der Kugel veränderlich sein wird, ist es zweckmäßig, nur einen bestimmten Kugeldurchmesser, und zwar die 5 mm-Kugel, zu verwenden.

Trägt man für verschiedene Stoffe P als Ordinate zu der Eindringtiefe h als Abszisse auf, so erhält man Kurven nach Art des Schemas in Abb. 421. Die Fortsetzung der Kurven geht durch den Koordinatenanfang. Für niedrige Drücke schmiegen sie sich an eine Gerade \mathcal{G} an. Bei größeren Drücken weichen sie von der Geraden \mathcal{G} meist nach oben, seltener nach unten ab.

Es ist somit nicht nötig, die ganze Funktion $P=f(h)$ als Kennzeichen der Härte festzustellen, sondern es genügt, für irgendeine sehr kleine Eindringtiefe h_n , die kleiner als OD in Abb. 421 ist, für die also $P=f(h)$ noch genügend genau als Gerade aufgefaßt werden kann, den Druck P zu ermitteln. Für den vorliegenden Härteprüfer und für die 5 mm-Kugel hat sich $h_n = 0,05$ mm als zweckmäßig und dieser Bedingung entsprechend herausgestellt. Demgemäß wird als Härtemaßstab der Druck $P_{0,05}$ angegeben, der nötig ist, um eine Kugel von 5 mm Durchmesser 0,05 mm tief in den Stoff einzudrücken.

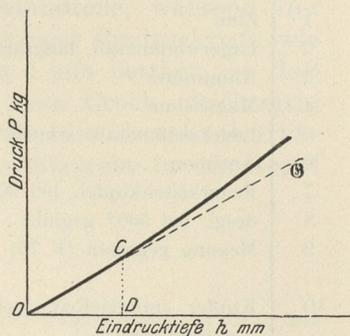


Abb. 421.

In der Quelle ($L_4 93$) sind eine Reihe Versuche mit verschiedenen Stoffen veröffentlicht. Dabei ist auf die starken Nachwirkungserscheinungen hingewiesen, die bei einigen Stoffen (Zinn, Magnesium, Lagerweißmetall) auftreten. Wenn die Kugel unter einem bestimmten Druck P in den Stoff eingedrückt und dann der Wasserzufluß abgesperrt wurde, erreichte sie die endgültige Eindringtiefe nicht sofort. Die Kugel drang mit der Zeit immer weiter ein, was daran erkennbar war, daß das Quecksilber mit der Zeit weiterstieg. Diese Nachwirkung dauerte viele Stunden lang. Das endgültige Gleichgewicht zwischen Druck und Eindringtiefe wurde sehr langsam, wenn überhaupt je erreicht. Man kann bei solchen Stoffen mit ausgeprägter Nachwirkung sehr erhebliche Fehler begehen, wenn man die Kraft P nicht lange genug wirken läßt. Dadurch würde aber die Versuchsdauer für die Prüfung erheblich vergrößert. Wenn man jedoch die Eindringtiefe h der Kugel klein wählt, wie z. B. 0,05 mm, so ist die Nachwirkung nach einigen Minuten der Druckeinwirkung schon nicht mehr meßbar; sie wird erst bei erhöhten Drücken merkbar. Darin liegt wieder ein Vorteil der Auswahl des kleinen Druckes $P_{0,05}$ als Härtemaßstab.

Ordnet man die untersuchten Stoffe nach steigender Kugeldruckhärte $P_{0,05}$, so erhält man die in der Tabelle XXXIII niedergelegte Reihenfolge.

Schließlich ist noch zu erwähnen, welche physikalische Bedeutung dem Umstand zukommt, daß die Kurve $P=f(h)$ für niedere Drücke sich einer Geraden \mathcal{G} anschmiegt, die durch den Koordinatenanfang geht und der Gleichung $P=Ch$ genügt, wenn C konstant ist. Setzt man p gleich dem mittleren Flächendruck auf die Fläche des Eindringkreises $\frac{\pi}{4}d^2$, so ist

$$P = p \frac{\pi}{4} d^2,$$

worin sowohl p als auch d veränderlich ist. Bezeichnet man wie früher den Krümmungshalbmesser der Eindringkalotte (nicht den Halbmesser der unbelasteten Kugel!) mit R , so ergibt sich die geometrische Bezeichnung

$$\frac{d^2}{4} = h(2R - h)$$

und folglich

$$P = \pi p h(2R - h).$$

Bei sehr kleinen Drücken P und demzufolge auch sehr kleinen Eindringtiefen h kann die Größe h gegenüber $2R$ in dem Ausdruck $2R - h$ vernachlässigt werden, so daß man angenähert erhält:

$$P \text{ rd. } 2\pi p h R.$$

Tabelle XXXIII.

Nr.	Metall und sein Zustand	Kugeldruck- härte $P_{0,05}$ kg	Bemerkung über Zusammensetzung			
1	Zinn	14				
2	Lagerweißmetall, langsam abgekühlt .	21	Sn 83,1; Sb 11,1; Cu 5,4			
3	Aluminium	25				
4	Magnesium	26				
5	Lagerweißmetall, schnell abgekühlt .	26	wie 2			
6	Antimon	27				
7	Feuerkistenkupfer, bei 900° geglüht .	30				
8	desgl. bei 500° geglüht	43				
9	Messing gegossen (F 70)	61	Cu 69,4; Zn 27,1; Sn 1,2; Pb 1,1; Fe 1,1			
10	Kupfer unmittelbar aus Feuerkiste entnommen	81	das gleiche Kupfer wie 7 und 8.			
11	Lagerrotguß, in Sand gegossen ¹⁾ . .	83	Cu 83,6; Sn 16,0; Zn 0,2; Pb 0,07; As 0,2			
12	Kohlenstoffarmes Flußeisen S 660 . .	98	C 0,07; Si 0,06; Mn 0,10; P 0,010; S 0,019; Cu 0,015			
13	Lagerrotguß, in Kokille gegossen ¹⁾ .	136	dieselbe Legierung wie Nr. 11			
14	Werkzeugstahl S 772, geschmiedet . .	277	C 1,03; Si 0,26; Mn 0,19; P 0,02; S 0,03			
15	Werkzeugstahl, S 774, bei 900° in Wasser abgeschreckt und darauf angelassen bei	C° 600 bis 700	260 bis 277	C 0,95 Si 0,35 Mn 0,17 P 0,012 S 0,024		
16					500	446
17					400	595
18					275	1060
19					200	2285
20					100	2775
21	nicht angelassen		2775			

Durch den Versuch ist erwiesen, daß unterhalb eines gewissen Grenzwertes von P und h die Gleichung $P = Ch$ angenähert gültig ist; es folgt also innerhalb der gemachten Einschränkungen:

$$pR = \text{Konstante,}$$

d. h. während der Druck wächst, muß der Krümmungsradius R rasch abnehmen. Die Konstanz von pR gilt nur für kleine Eindrücktiefen, aber sie gilt gerade für diejenigen Eindrücktiefen h , bei denen sich sowohl p als auch R am stärksten ändert. (Näheres hierüber L_4 93.) Es besteht also eine ähnliche Beziehung zwischen dem mittleren Flächendruck p und dem Krümmungshalbmesser der Kalotte (= Krümmungshalbmesser der Kugel an der Abplattung), wie zwischen Druck und Volumen eines Gases nach dem Mariotteschen Gesetz.

3. Einige Bemerkungen über den Vergleich zwischen Ritzhärte und Kugeldruckhärte.

Es soll hier darauf aufmerksam gemacht werden, daß der Vergleich zwischen Ritzhärte nach Martens (I, 357 bis 358) und der Kugeldruckhärte nur dann möglich ist, wenn ausschließlich homogene Stoffe zur Prüfung gelangen. Arbeitet man mit Stoffen, die aus zwei oder mehreren Gefügebestandteilen verschiedener Härte bestehen, so ist ein Vergleich beider Verfahren ausgeschlossen. Einer der Hauptvorteile der Ritzprobe liegt gerade darin, die verschiedene Härte der einzelnen Gefügebestandteile beobachten und messen zu können. Der betreffende

¹⁾ Die Kugeleindrücke waren derart unrund, daß Messung des Eindrückdurchmessers d unmöglich erschien. Dagegen war h mittels des Härteprüfers bequem meßbar.

Stoff hat dann eben nach der Ritzprobe nicht eine, sondern mehrere Härten, und es ist nicht ersichtlich, welche von diesen in Vergleich mit der Kugeldruckhärte gesetzt werden soll, die doch den durchschnittlichen Widerstand der verschiedenen Gefügebestandteile gegenüber dem Eindringen der Kugel mißt. Es ist nicht zu vergessen, daß die Ritzbreite ihrer Größenordnung nach wesentlich kleiner sein kann als die Breite der einzelnen Gefügebestandteile, während der Eindruckdurchmesser bei der Kugelprobe selbst bei so geringer Eindringtiefe wie $h = 0,05$ mm bei einer 5 mm-Kugel doch immerhin etwa 1 mm beträgt, so daß in der Mehrzahl der Fälle mehrere Gefügebestandteile dem Druck gleichzeitig ausgesetzt sind. Man erhält somit bei der Kugeldruckprobe den durchschnittlichen Widerstand der einzelnen Gefügebildner, bei der Ritzprobe in der Regel die Einzelwiderstände. Beispiele hiefür s. L_4 93.

b) Kugelfallprobe.

352. Der Gedanke, die zur Härteprüfung verwendete Stahlkugel in den zu prüfenden Stoff nicht einzudrücken, sondern auf den Stoff aus einer bestimmten Höhe auffallen zu lassen und die Höhe des Rücksprungs als Maßstab für die „Härte“ zu benutzen, scheint von mehreren Seiten gefaßt worden zu sein. Dem Verfasser ist bekannt geworden, daß z. B. Tingberg bereits vor mehreren Jahren eine auf diesem Grundgedanken beruhende Vorrichtung zur Härteprüfung benutzte, aber die Veröffentlichung unterließ.

Seit 1907 kommen Vorrichtungen von Shore (L_4 94) in den Handel, bei denen der Rücksprung eines auf den zu prüfenden Stoff auffallenden Hämmerchens zur Bemessung der Härte verwendet wird. Das Hämmerchen hat etwa 2,6 g Gewicht; es trägt an seinem unteren Ende einen kleinen Diamant Di (Abb. 422), der unten nach einem flachen Kugelabschnitt K von nicht bekannt gegebenem Halbmesser abgeschliffen ist. Der wirksame Teil ist also ein Teil einer Diamantkugel, die durch das eiserne Hämmerchen H_a belastet ist. Das Hämmerchen ist in einem polierten Glasrohr, hinter dem eine Skala angebracht ist, luftdicht geführt. Durch eine besondere Vorrichtung, die durch einen Druckball aus Gummi betätigt wird, kann der in seiner höchsten Lage durch einen Greifer festgehaltene Hammer ausgelöst und zum freien Fall gebracht werden. Der Rücksprung wird an der Glas-skala abgelesen. Hierauf wird durch einen Saugball aus Gummi und besondere Zwischenvorrichtungen über dem Hammer Luftverdünnung erzeugt, so daß dieser gehoben und wieder von dem Greifer festgehalten wird. Die Fallhöhe des Hammers beträgt 250 mm. Die Skala für die Bemessung des Rücksprungs hat eine willkürliche Teilung, deren Beziehung zum gewöhnlichen Längenmaß nicht bekannt gegeben ist. Die Höhe des Rücksprungs des Hammers beim Auftreffen auf eine Probe gehärteten Werkzeugstahls (Kohlenstoffstahl von nicht bekannt gegebener Zusammensetzung) ist gleich 100 gesetzt und in 100 gleiche Teile geteilt. Nach oben ist die Skala mit der gleichen Teilung bis zum Teil 140 verlängert.

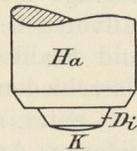


Abb. 422.

Dem Härteprüfer wird eine Platte des betreffenden gehärteten Stahles beigegeben, die bei der Prüfung den Rücksprung 100 ergeben soll. Erreicht der Hammer diesen Rücksprung nicht mehr, so ist dies ein Zeichen dafür, daß die Diamantkugel K nicht mehr in Ordnung ist.

Das zu prüfende Material muß eine ebene Fläche erhalten, auf die die Kugel auftrifft. Die Fläche braucht aber nur klein zu sein.

Der Härteprüfer kann auch an einem ausschwenkbaren Arm befestigt und auf größere Werkstücke aufgesetzt werden, deren Härte zu prüfen ist. Voraussetzung ist natürlich, daß die Oberfläche dieser Werkstücke nicht etwa durch

chemische Einflüsse (z. B. Entkohlung durch Glühen) verändert ist, andernfalls muß diese veränderte Oberfläche erst durch Feilen oder Schleifen entfernt werden.

Da die Skalenteilung der Shoreschen Härteprüfer und der Punkt 100 der Skala willkürlich und somit nicht jederzeit nachprüfbar sind, so kann Eichung der Vorrichtung nicht erfolgen. Die Übereinstimmung der mit verschiedenen Härteprüfern gewonnenen Ergebnisse hängt lediglich von der Sorgfalt des Lieferers der Vorrichtung ab. Für den Empfänger besteht keine Möglichkeit, sich davon zu überzeugen, ob seine Ergebnisse mit denen übereinstimmen, die auf anderen Härteprüfern derselben Bauart erhalten werden. Die dem Apparat beigegebene gehärtete Probestahlplatte ändert daran nichts, da ebenfalls nicht feststellbar ist, inwieweit die an verschiedene Stellen gelieferten Probeplatten in der Art des Materials und in der Art der Härtung übereinstimmen.

Ein solcher Zustand mag wohl vom geschäftlichen Standpunkt des Lieferers der Vorrichtung begreiflich erscheinen, läuft aber dem wichtigsten Grundsatz des Materialprüfungswesens entgegen. Dieser fordert, daß alle Vorrichtungen Anschluß haben müssen an anerkannte Maßsysteme und daß dieser Anschluß unabhängig vom Lieferer jederzeit nachgeprüft werden kann.

Die Shoreschen Arbeiten haben die Anregung gegeben, daß man sich mit der Frage näher befaßt, welchen Aufschluß der Rücksprung über die Eigenschaften des zu prüfenden Materials liefert (L_4 98 bis 101). Aus den oben angegebenen Gründen wandte man sich hierbei sehr bald von der Anwendung des Diamant-hämmerchens mit der willkürlichen Abrundung und von der Shoreschen willkürlichen Skala ab. Man verwendete als auftreffende Masse Stahlkugeln und maß die Rücksprunghöhe in der üblichen Längeneinheit (mm oder cm). Die Stahlkugeln lassen sich in sehr gleichmäßiger Weise im Massenbetrieb herstellen. Solange die Kugel nicht bleibende Formänderung erleidet, kommt für den Kugelfallversuch nur der Elastizitätsmodul ihres Materials in Betracht, der ja bei Eisen- und Stahlsorten verhältnismäßig geringen Schwankungen selbst bei ziemlichen Verschiedenheiten im Material und in der Vorbehandlung unterliegt.

Setzt man voraus, daß von der gesammten durch die fallende Kugel gelieferten Arbeit $A = PH$ (worin P das Gewicht und H die Fallhöhe der Kugel ist) nichts auf Erschütterungen, Reibung usw. verwendet wird, so ergibt sich

$$A = A_e + A_p.$$

Hierbei ist A_e die gesamte elastische Formänderungsarbeit, welche elastische Formänderung des Probestücks und der Kugel herbeiführt. Ihr proportional ist die Rücksprunghöhe H_1 der Kugel. A_p ist die zur bleibenden Formänderung aufgewendete Arbeit, wobei vorausgesetzt ist, daß die Kugel beim Fallversuch keine bleibende Formänderung erleidet. Mithin muß sein

$$PH = PH_1 + A_p$$

und daraus

$$H_1 = H - \frac{A_p}{P} \dots \dots \dots (31)$$

Je größer die auf bleibende Formänderung verwendete Arbeit wird, um so kleiner wird der Rücksprung H_1 bei unveränderten Werten von Fallhöhe H und Kugelgewicht P . Wird keine bleibende Formänderung hervorgebracht, ist also $A_p = 0$, so müßte $H_1 = H$, d. h. der Rücksprung gleich der Fallhöhe sein. Bei metallischen Stoffen kommt dies nicht vor, da hier auch bei Verwendung sehr kleiner Fallhöhen H meßbare bleibende Formänderungen eintreten (Schneider, L_4 101) und auch sonst bei Abwesenheit bleibender Formänderungen verschiedene unkontrollierbare Einflüsse, wie Erschütterungen des zu prüfenden Stoffes und seiner Unterlage usw., die Rücksprunghöhe verkleinern.

Wird bleibende Formänderung erzeugt, so gestalten sich die Verhältnisse verwickelter. Die Rücksprunghöhe ist dann in noch nicht völlig aufgeklärter Weise abhängig von dem Elastizitätsmodul des zu prüfenden Stoffes und des Stoffes der Kugel, von der Lage der Quetschgrenze und von der Widerstandsarbeit des zu prüfenden Materials gegenüber bleibender Formänderung, von der gesamten Fallarbeit der auftreffenden Kugel, von der Masse und der Art der Auflagerung des zu prüfenden Stoffes, von der Beschaffenheit der Oberfläche der Probe usw.

Es erscheint etwas gewagt, eine so verwickelte Funktion als „Härte“ des Materials zu bezeichnen. Es ist ohne weiteres zu erwarten, daß die durch den Rücksprung gekennzeichneten Eigenschaften des Stoffes nicht unmittelbar mit den Eigenschaften vergleichbar sein werden, die die Kugeldruckprobe mißt. Dies geht aus der folgenden, der Arbeit Fréminvilles (*L₄ 98*) entnommenen Übersicht hervor. Die Ergebnisse wurden mit Stahlkugeln von 16 mm Durchmesser und etwa 16 g Gewicht bei einer Fallhöhe $H = 1000$ mm gewonnen.

	Rücksprung H_1 in mm
Gußeisen	350—500
Weiches Flußeisen	300—380
Kautschuk	400
Marmor	500
Glas	890
Gehärteter Werkzeugstahl	930

Hier wird also ein Material wie Kautschuk in seiner „Härte“ dem Guß- und Flußeisen gleichgesetzt, trotzdem daß man in dem Kautschuk mit dem Finger einen Eindruck hervorrufen kann, was bei den beiden Eisensorten schwer möglich erscheint. Die übliche Begriffserklärung der Härte als der Widerstand gegenüber dem Eindringen eines fremden Körpers paßt in diesem Falle ganz und gar nicht auf die durch den Rücksprung gemessene Eigenschaft. Auffällig erscheint auch die Nähe der beiden Stoffe Marmor und Glas in der obigen Reihenfolge, da doch aus der Mineralogie bekannt ist, welcher großer Härteunterschied zwischen Glas und Marmor besteht.

Der Grund für die eigenartige Einreihung der Stoffe nach obiger Zusammenstellung liegt in der großen Verschiedenheit ihres Widerstandes gegenüber elastischer Formänderung, die sich im Rücksprung der Kugel überwiegend kundgibt und die Unterschiede in der Härte ganz überdeckt.

Beim Vergleich von Stoffen, deren Widerstand gegenüber elastischer Formänderung, wie er sich z. B. im Elastizitätsmodul ausdrückt, verhältnismäßig wenig verschieden ist, tritt der Einfluß der verschiedenen Härte auf den Rücksprung in den Vordergrund. In solchen Fällen kann dann der Rücksprung bis zu einem gewissen Grade als Maßstab für die Härte dienen. Ein solcher Fall liegt z. B. vor bei abgeschreckten und bis zu verschiedenen Graden angelassenen Stählen, deren Elastizitätsmodul untereinander wenig verschieden ist. Sie ordnen sich deswegen bezüglich des Rücksprungs bei der Kugelfallprobe in derselben Reihenfolge ein, wie bei der Kugeldruckprobe.

Die folgende Tabelle XXXIV, die bezüglich der Kugelfallprobe den Angaben Shores (The Shore Scleroscope, Aug. 1910, 4. Aufl.) selbst, und bezüglich der Kugeldruckhärte den Angaben von Brinell (*L₄ 88*) entlehnt ist, bestätigt das oben Gesagte. Die Prüfung auf Rücksprunghöhe gibt bei den einzelnen untersuchten metallischen Stoffen nur ein verschwommenes Bild von dem Grad der Härte, während die Kugeldruckprobe die Stoffe in derselben Reihenfolge gibt, wie sie uns von der Erfahrung her geläufig ist.

Tabelle XXXIV.

Stoff	Brinellzahl		Rücksprung in Teilung der will- kürlichen Skala nach Shore
	ξ_P	bei Druck P kg	
Blei	5,7	200	2—5
Zinn	14,5	500	8
Lagerweißmetall (Babbitt) . .	23,0	500	4—9
Zink	46,0	500	8
Gold	48,0	500	5
Silber	59,0	500	6,5
Messing	63,0	500	7—35
Kupfer	74,0	500	6
Flußeisen mit etwa 0,15% C .	100,0	3000	22
Werkzeugstahl mit etwa 1% C	260,0	3000	30—35
Desgl. gehärtet	627,0	3000	100

Aus den angegebenen Gründen wird im besonderen Teile dieses Bandes die mit dem Shoreschen Härteprüfer oder mit anderen Kugelfallvorrichtungen gemessene Rücksprunghöhe nur dann angegeben werden, wenn Angaben über die Härte nach anderen Verfahren fehlen.

c) Die Bearbeitbarkeit durch schneidende Werkzeuge.

1. Abhängigkeit der Bearbeitbarkeit von der Härte und der Geschmeidigkeit¹⁾.

353. Die Mehrzahl der Werkstücke aus metallischen Stoffen bedarf zur endgültigen Formgebung der Nachbearbeitung mittels schneidender Werkzeuge, wobei ein Teil des Stoffes in Form von Spänen vom Werkstück entfernt wird.

Je nachdem, ob die Beseitigung eines bestimmten Metallvolumens durch Zerspanen größeren oder geringeren Aufwand an Zeit, maschineller Arbeit und Werkzeugen erfordert, nennt man den Stoff schwer oder leicht bearbeitbar. Es fragt sich nun, in welcher Beziehung der Grad der Bearbeitbarkeit eines Stoffes zu seiner Ritz- oder Kugeldruckhärte steht. Hier gibt bereits die Erfahrung gewisse Anhaltspunkte. So ist z. B. das reine Aluminium schwerer bearbeitbar als Flußeisen, obwohl die Kugeldruckhärte des Aluminiums ξ_{200} nach Brinell nur 38, die des kohlenstoffarmen Flußeisens ξ_{3000} etwa 100 beträgt. Daraus ist zu schließen, daß außer der Härte, also dem Widerstand gegenüber dem Eindringen eines fremden Körpers, bei der Bearbeitbarkeit durch schneidende Werkzeuge noch andere Einflüsse mitwirken müssen.

Um hierüber Aufschluß zu erlangen, ist es wichtig, sich wenigstens in groben Umrissen ein Bild von dem Vorgang des Spanabhebens zu verschaffen, der in erster Linie durch die Arbeiten von Thieme (*L₄ 102, 103*) aufgeklärt worden ist. Danach ist dieser Vorgang ein Druckversuch nach Art der Abb. 423. Die Druckkraft P greift außerhalb des Schwerpunkts der Fläche CEE_1C_1 an. S bedeutet das Werkzeug, das ersetzt gedacht ist durch ein Prisma aus Werkzeugstahl. Die Brustfläche ist Br , die Rückenfläche R . In Wirklichkeit würde ein Werkzeug das Aussehen von Abb. 424 haben. Der Einfachheit halber ist in Abb. 423 der Brustwinkel β (vgl. Abb. 424) gleich 90° und der Ansatzwinkel α (vgl. Abb. 424) gleich Null gesetzt. W sei das zu bearbeitende Werkstück, von dem ein Teil von der Breite b und der Tiefe t weggespannt werden soll. Das

¹⁾ Unter Geschmeidigkeit soll die Fähigkeit eines Stoffes, sich kaltrecken (293) zu lassen, verstanden werden. Der Grad der Geschmeidigkeit ist um so größer, je weiter das Kaltrecken ohne Zerstörung des Zusammenhanges getrieben werden kann.

Werkzeug S bewegt sich unter dem Einfluß der Kraft P in der Richtung des Pfeiles gegen das Werkstück W . Hierbei wird die Spannung σ auf der Druckfläche CDC_1D_1 wachsen. Die Brust des Werkzeuges Br bewirkt unter sich die Höhenverminderung λ_1 des Werkstückes W . Das hierbei verdrängte Metall weicht nach den Seiten hin aus, wie in Abb. 423b. Schließlich wächst die Spannung bis zu einem Betrag σ' , bei dem Gleiten des Materials längs einer Ebene AB stattfindet, die mit der Richtung der Kraft P den Winkel $90 - \varphi$ bildet.

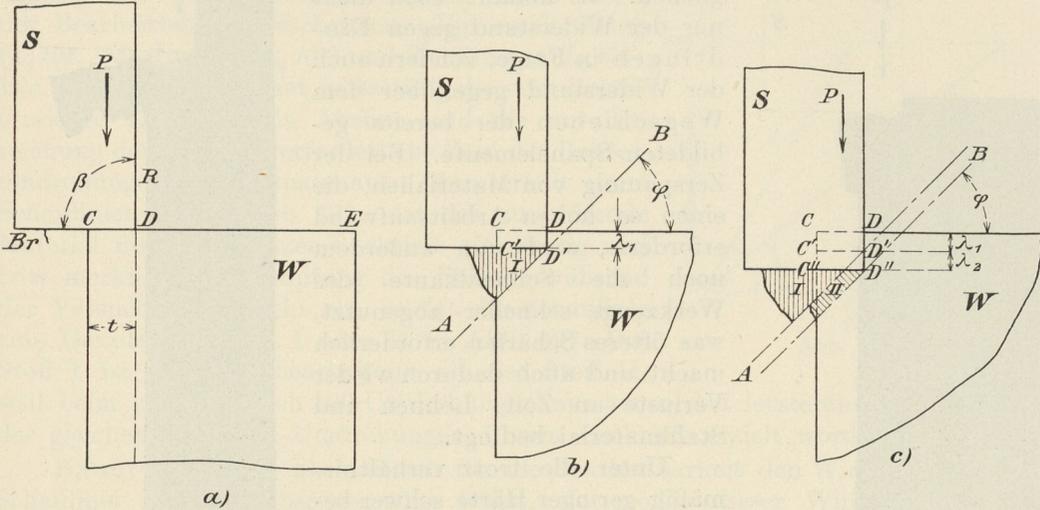
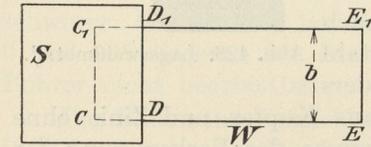


Abb. 423.



Besteht das Werkstück W aus einem Material, wie z. B. Gußeisen, das auch beim gewöhnlichen Druckversuch mit Kraftangriff im Schwerpunkt der Druckflächen bei einer bestimmten Spannung den Zusammenhang verliert, so findet auch in dem oben beschriebenen Falle nach der Erreichung der Spannung σ' Abtrennung des oberhalb AB gelegenen in Abb. 423b schraffierten Teiles I längs der Ebene AB statt. Der Teil I soll als erstes Spänelement bezeichnet werden. Es fällt entweder ganz ab, oder bleibt nur in losem Zusammenhange mit dem Werkstück W . Jedenfalls setzt es dem weiteren Vordringen des Stahles S keinen weiteren Widerstand entgegen. S. Abb. 425.

Anders liegt der Fall, wenn W aus einem geschmeidigen Stoff besteht, der auch bei dem gewöhnlichen Druckversuch trotz Aufwandes großer Arbeit nicht zum Bruch gebracht werden kann (I, 56, 125 bis 128). Dann findet nach Erreichen einer Grenzspannung σ' keine Abtrennung nach AB statt, sondern das Spänelement muß beim Vorrücken des Werkzeuges S unter Verbrauch von Formänderungsarbeit längs der Ebene AB herausgeschoben werden, etwa wie in Abb. 423 c, während gleichzeitig die Bildung eines neuen Spänelementes II in ähnlicher Weise wie beim Element I einsetzt. Als Beispiel diene Abb. 426, die einem mit Lagerweißmetall

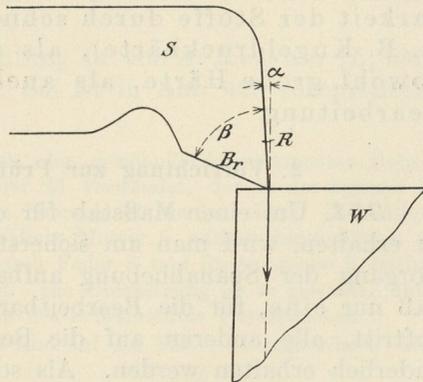


Abb. 424.

ausgeführten Versuch entspricht. Daraus erklärt sich der Mehraufwand der Arbeit bei der Bearbeitung von geschmeidigen Materialien gegenüber dem Aufwand an Arbeit bei der Zerspanung nicht geschmeidiger Stoffe. Dieser Mehraufwand wird unter Umständen, wie z. B. bei Aluminium, auch durch die geringere Härte, also den geringeren Widerstand gegen Eindringen des Stahles nicht ausgeglichen. Es kommt eben nicht nur der Widerstand gegen Eindringen in Frage, sondern auch der Widerstand gegenüber dem Wegschieben der bereits gebildeten Spänelemente. Bei der Zerspanung von Materialien, die einen so hohen Arbeitsaufwand erfordern, wird nun außerdem noch die Schneidkante des Werkzeugs schneller abgenutzt, was öfteres Schärfen erforderlich macht und auch dadurch wieder Verluste an Zeit, Löhnen und Stahlmaterial bedingt.

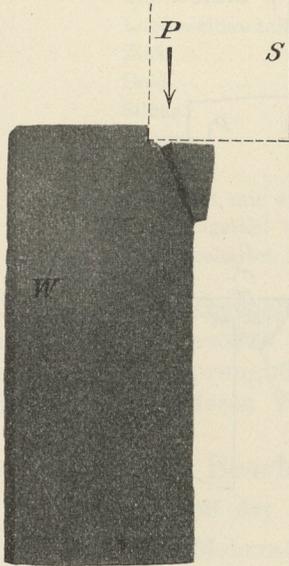


Abb. 425. Gußeisen.

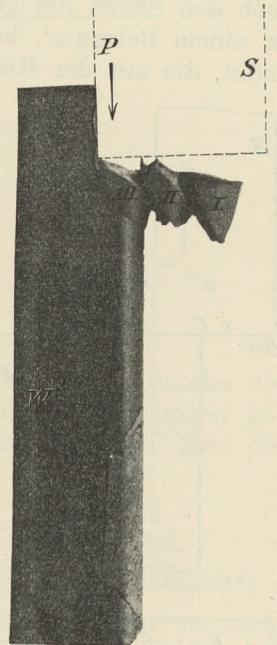


Abb. 426. Lagerweißmetall.

Unter die trotz verhältnismäßig geringer Härte schwer bearbeitbaren Stoffe gehört auch der hochprozentige Nickelstahl (25 bis 30% Nickel) und besonders

auch das Messing, wenn es im wesentlichen nur aus Kupfer und Zink ohne größere Mengen von Fremdstoffen besteht. Im Interesse der Verbesserung der Bearbeitbarkeit durch schneidende Werkzeuge setzt man dem sehr geschmeidigen Messing Stoffe zu, die die Geschmeidigkeit herunterdrücken, wie z. B. Blei. Namentlich geschieht dies bei Stangenmessing, das auf Drehbänken, insbesondere Revolverdrehbänken und Automaten, bearbeitet werden soll.

Wir kommen nach obigen Betrachtungen zu dem Gesetz, daß die Bearbeitbarkeit der Stoffe durch schneidende Werkzeuge sowohl von der Härte (z. B. Kugeldruckhärte), als auch von der Geschmeidigkeit abhängt. Sowohl große Härte, als auch große Geschmeidigkeit erschweren die Bearbeitung.

2. Vorrichtung zur Prüfung des Grades der Bearbeitbarkeit.

354. Um einen Maßstab für die Bearbeitbarkeit der zu bearbeitenden Stoffe zu erhalten, wird man am sichersten das Versuchsverfahren unmittelbar auf dem Vorgang der Spanabhebung aufbauen. Hierbei muß so vorgegangen werden, daß nur eine, für die Bearbeitbarkeit kennzeichnende Größe x als Veränderliche auftritt, alle anderen auf die Bearbeitung einwirkenden Umstände aber unveränderlich erhalten werden. Als solche Umstände kommen in Betracht: Material des Werkzeugs und seine Vorbehandlung (Härten, Anlassen); Form und Abmessungen des Werkzeugs, insbesondere die Ausbildung der Schneidkanten; Erhaltung der Schneidkanten in möglichst unverändertem Zustande während der Versuchsdauer; Schnittgeschwindigkeit, Spantiefe, Größe des Vorschubs.

Als veränderliche Größe x kann z. B. gewählt werden der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg des Werkzeugs bei unveränderter Größe des Andrucks P des

Werkzeugs, der Spantiefe t und der Spanbreite b . Man kann den Versuch auf der Hobelmaschine oder der Drehbank ausführen. Man kann auch den Bohrversuch heranziehen, indem man einen Bohrer von bestimmtem Durchmesser unter unveränderlichem Andruck P mit unveränderlicher Umdrehungsgeschwindigkeit auf den zu prüfenden Stoff einwirken läßt, und die in einer bestimmten Zeit oder nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen erreichte Lochtiefe als veränderliche Größe x und somit als Maßstab für die Bearbeitbarkeit wählt. Diesen Weg hat Chas. A. Bauer ($L_4 110$) mit seiner Bohrvorrichtung zur Prüfung der Bearbeitbarkeit besprochen. Vgl. auch Keep ($L_4 104, 105$), Leyde ($L_4 107$) und Reiningger ($L_4 106$). Die Vorrichtung zeichnet selbsttätig die vom Bohrer erreichte Lochtiefe als Abszisse und die zur Erreichung der Lochtiefe erforderliche Zahl der Bohrerumdrehungen als Ordinate auf. Man erhält dann Schaulinien wie in Abb. 427. Ist das zu prüfende Material über der ganzen Lochtiefe gleichartig und tritt merkliche Abstumpfung des Bohrers während der Versuchsdauer nicht ein, so ist die Schaulinie eine Gerade, wie z. B. I oder II in Abb. 427. Der Stoff I ist schwerer bearbeitbar, als der Stoff II, weil beim ersteren nach 100 Umdrehungen nur 5 mm, bei letzterem dagegen nach der gleichen Zahl von Umdrehungen 10 mm Lochtiefe erzielt worden sind.

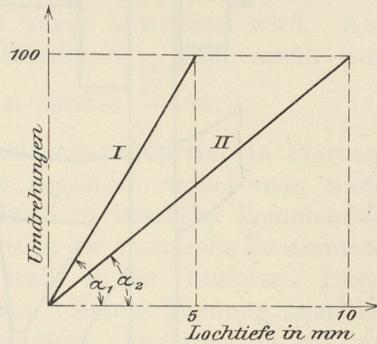


Abb. 427.

Bauer verwendet als Maßstab für die Bearbeitbarkeit den Winkel α , den die Schaulinie mit der Abszissenachse bildet. Je größer dieser Winkel ist, desto schwerer bearbeitbar ist der geprüfte Stoff. α kann innerhalb der Grenzen 0 und 90° liegen. Im letzteren Falle ist das Material mit dem verwendeten Bohrer nicht bearbeitbar.

Die Bauersche Vorrichtung sowie die in Deutschland bisher nach demselben Grundsatz gebauten Einrichtungen sind meist selbständige Maschinen, deren Preis verhältnismäßig hoch ist. Ich bin der Meinung, daß die Einführung des Bohrversuchs zur Prüfung auf Bearbeitbarkeit in vielen Werkstätten gefördert würde, wenn die Versuche auf einer Vorrichtung durchgeführt werden können, die an jeder gewöhnlichen senkrechten Bohrmaschine angebracht wird, ohne diese dadurch für ihre gewöhnliche Arbeit unbrauchbar zu machen. Dadurch werden die Beschaffungskosten der Vorrichtung geringer.

Eine dieser Bedingung entsprechende Vorrichtung in von A. Kessner ($L_4 108$) auf meine Veranlassung hin entworfen worden. Sie ist in Abb. 428 schematisch dargestellt.

Das zu prüfende Material 22 ruht auf dem Tisch 24 der gewöhnlichen senkrechten Bohrmaschine. Zur Prüfung wird beispielsweise ein Spiralbohrer 25 verwendet, der in der Spindel 1 der Bohrmaschine befestigt wird. Die Umdrehungen der Bohrspindel werden durch Zahnräder 2 und 3 auf die Gewindespindel 4 übertragen, deren bewegliche Mutter 5 seitlich durch Säulen 6 geführt wird. Die Mutter trägt den Schreibstift 7, der durch Feder 8 und Stellschraube 9 leicht gegen die Trommel 10 des Selbstzeichners angedrückt wird. Die Übersetzung ist so gewählt, daß zwei Umdrehungen der Bohrspindel 1 einem Weg von 1 mm des Schreibstiftes 7 entsprechen.

Gewindespindel 4, Führungssäulen 6 und Trommel 10 sind auf der Platte 11 angeordnet, die mit dem Gestell der Bohrmaschine verschraubt wird.

Auf dem freien Zapfen 12, der beim gewöhnlichen Werkstattbetrieb zur Handschaltung dient, wird der Belastungshebel 13 befestigt, der aus zwei Kreisbögen 14 und 15 besteht. Das an dem Kreisbogen 14 angehängte Gewicht sucht Drehung des Zapfens 12 samt dem auf ihm befestigten Zahnrad 16 zu bewirken. Das letztere greift in die an der Bohrspindel 1 befestigte Zahnstange 17 und bewirkt somit Andruck des Bohrers 25 gegen das Werkstück 22 mit einer bestimmten von der Größe des Gewichts 18 abhängigen Kraft P . Die Abwärtsbewegung der Bohrspindel wird mittels Kreisbogens 15, eines dünnen Drahtes 19, der Führungsrollen 20 und 21 auf die Trommel 10 des

Selbstzeichners übertragen, die dabei Drehung um ihre senkrechte Achse erfährt. Die Anordnung ist so getroffen, daß 1 mm Lochtiefe einer Abszisse von 5 mm im Schaubild entspricht.

Die näheren Einzelheiten und die Art der Versuchsausführung sind in der Quelle (*L₁ 108*) beschrieben.

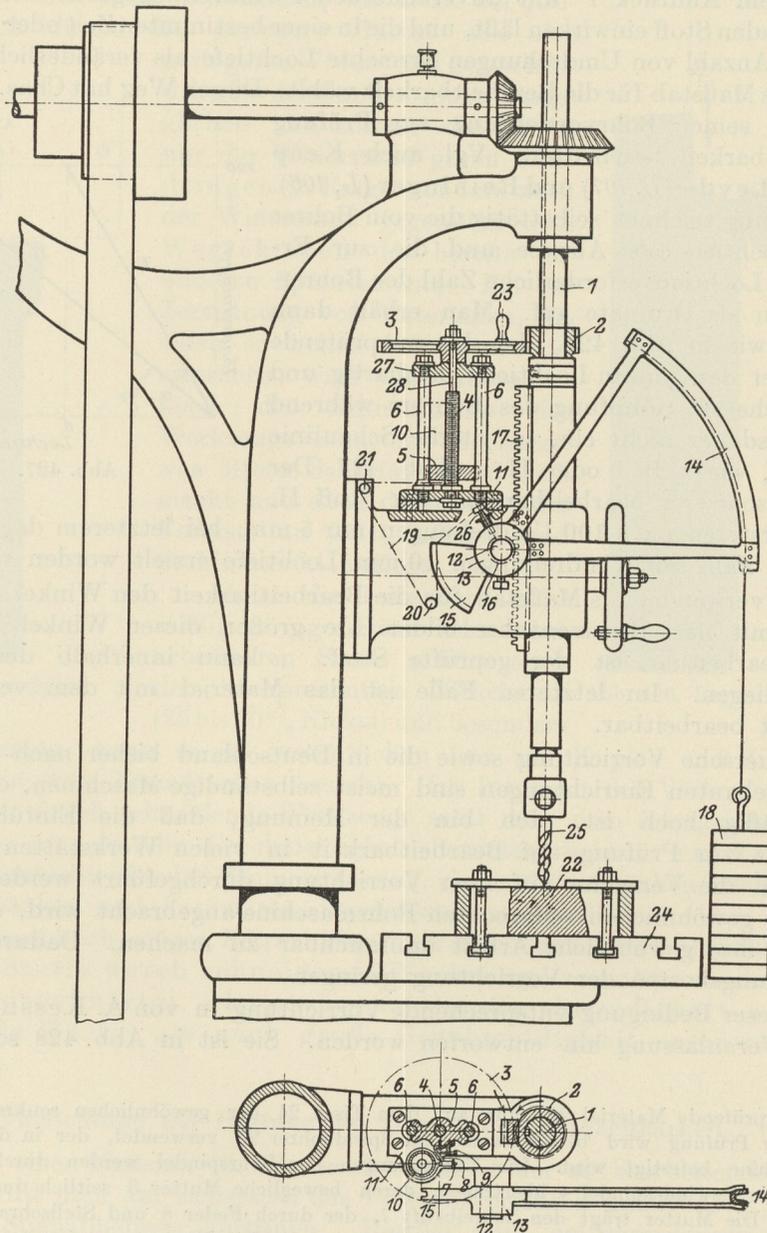


Abb. 428. Vorrichtung zur Prüfung der Bearbeitbarkeit. Bauart Kessner.

Die Bohrvorrichtung kann nur einen Vergleichswert, keinen absoluten Zahlenwert für die Bearbeitbarkeit des Materials liefern, denn die erhaltenen Winkel α (Abb. 427) werden für ein und dasselbe Material abweichen je nach der Art des zur Herstellung der Bohrer verwendeten Stahls und seiner Vorbehandlung, je nach der Größe der für den Schnitt wesentlichen Winkel und Abmessungen des Bohrers und nach dem Andruck P und der Umdrehungszahl, sowie nach dem fortschreitenden Stumpfwerden desselben.

Um alle diese veränderlichen Größen auszuschalten, ist man so vorgegangen, daß man die Bearbeitbarkeit des zu prüfenden Stoffes zu der eines Vergleichsstoffes in Vergleich setzt. Man bohrt zunächst den Vergleichsstoff und erhält den Winkel α_n' . Dann bohrt man mit demselben Bohrer unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen ohne zwischengeschaltetes Schleifen das zu prüfende Material, das den Winkel α ergibt. Um nun den Einfluß etwaigen Stumpfwerdens des Bohrers auszuschalten, wird hinterher nochmals der Vergleichsstoff gebohrt, der nun den Winkel α_n'' liefern möge, der von α_n' nur wenig abweichen wird. Aus den beiden Werten α_n' und α_n'' bildet man den Mittelwert α_n und erhält nun die vergleichsweise Bearbeitbarkeit des zu prüfenden Stoffes $\frac{\alpha}{\alpha_n} 100$.

Leyde und Reiningger wenden als Vergleichsmaterial Gußeisen in Plattenform an. Die Platten werden in größerem Vorrat gegossen, wobei man nach Möglichkeit alle die für die Bearbeitbarkeit und Härte in Betracht kommenden Einflüsse unveränderlich zu halten sucht, also namentlich die chemische Zusammensetzung und die Abkühlungsgeschwindigkeit des Metalls in der Gußform. Diese Bedingungen sind durchaus nicht leicht zu erfüllen. Meiner Meinung nach ist gerade die Schwierigkeit, einen in sich gleichmäßigen größeren Vorrat an Vergleichsgußeisen herzustellen, die Ursache gewesen, daß in manchen Gießereien die Verwendung des Bohrversuchs wieder aufgegeben worden ist. Wenn der Vorrat des Vergleichsgußeisens in sich nicht sehr gleichmäßig ist, so ist natürlich auch das Ergebnis des Bohrversuchs in gleichem Maße schwankend. Mir selbst ist es noch nicht gelungen, einen größeren Vorrat an Vergleichsgußeisen zu beziehen, welcher der Bedingung der Gleichmäßigkeit im wünschenswerten Maße entsprochen hätte. Ich halte das Gußeisen auch für den Stoff, bei dem diese Bedingung sich am schwersten erfüllen läßt.

Ich habe Versuche veranlaßt, die darüber Aufschluß geben sollen, ob nicht geschmiedete oder gewalzte Stangen von Kupferlegierungen von genau bestimmter chemischer Zusammensetzung und genau festgelegter Vorbehandlung sich besser als Vergleichsstoff eignen. Die Versuche sind noch nicht zu Ende geführt.

Da die Schaulinie nicht immer geradlinig läuft, wie die Linien I und II in Abb. 427, sondern wegen Ungleichmäßigkeiten im zu prüfenden Metall innerhalb der Lochtiefe, oder wegen Stumpfwerden des Bohrers von der Geraden mehr oder weniger abweichen, so ist es schwierig, den Winkel α zu messen. Es empfiehlt sich daher, die nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen (z. B. 100) erreichte Lochtiefe in mm als Maßstab für die Bearbeitbarkeit zu benutzen. Dieser Maßstab für die Bearbeitbarkeit soll im folgenden mit t_{100} bezeichnet werden.

Es empfiehlt sich weiter, neben Bohrversuchen mit kurzer Dauer auch solche mit längerer Dauer auszuführen, dadurch daß man mehrere Löcher hintereinander bohrt, ohne dazwischen den Bohrer zu schärfen. Man erkennt aus solchen Versuchen, ob ein Material bei längerer Einwirkung mehr auf Stumpfwerden des Bohrers wirkt, als ein anderes.

3. Beispiel für die Anwendungsfähigkeit des Bohrversuchs.

355. Als Beispiel dafür, daß die mittels der Bohrvorrichtung ermittelte Bearbeitbarkeit nicht mit der Kugeldruckhärte parallel zu gehen braucht, sei nachfolgende Versuchsreihe über den Einfluß des steigenden Bleizusatzes zu Messing mitgeteilt. Die Kugeldruckhärte $P_{0.05}$ wurde nach dem Verfahren von Martens-Heyn (351), die Bearbeitbarkeit mit Hilfe der Bohrvorrichtung Bauart Kessner (354) bestimmt. Verwendet wurde ein Bohrer aus Novostahl von 10,5 mm Durchmesser, der 197 Umdrehungen in der Minute machte und mit $P = 71$ kg gegen das Material

gedrückt wurde. Er wurde vor dem Beginn des Bohrens eines jeden Lochs auf einer Spiralbohrerschleifmaschine auf gleiche Winkel geschliffen. Die Legierungen enthielten Kupfer und Zink stets im Verhältnis 2:1, und im übrigen den als Abszisse in Abb. 429 angegebenen Gehalt an Blei. Sie waren in eiserne Formen zu Stäben von 25×25 mm Querschnitt bei etwa 140 mm Länge gegossen. Bei den bleireicheren Legierungen war bereits mit bloßem Auge Entmischung bemerkbar. In der Legierung waren kleine weißliche, tropfenförmige Einschlüsse einer bleireicheren Legierung unregelmäßig eingesprengt. Die Legierungen waren auch nicht alle frei von kleinen Poren. Beides machte sich bei der Feststellung der Kugeldruckhärte bemerkbar, die bei Eindrücken an verschiedenen Stellen derselben Probe oft erhebliche Abweichungen gab. Die in der Abb. 429 angegebenen Versuchswerte sind das Mittel aus mehreren Einzelwerten. Bei der Bearbeitbarkeit erstreckt sich der Versuch über ein größeres Volumen des Metalls. Deswegen treten hier die Einflüsse der Unregelmäßigkeiten der Legierungen infolge von Poren und Seigerung weniger deutlich zutage. Auch hier sind die Mittelwerte aus mehreren Versuchen angegeben.

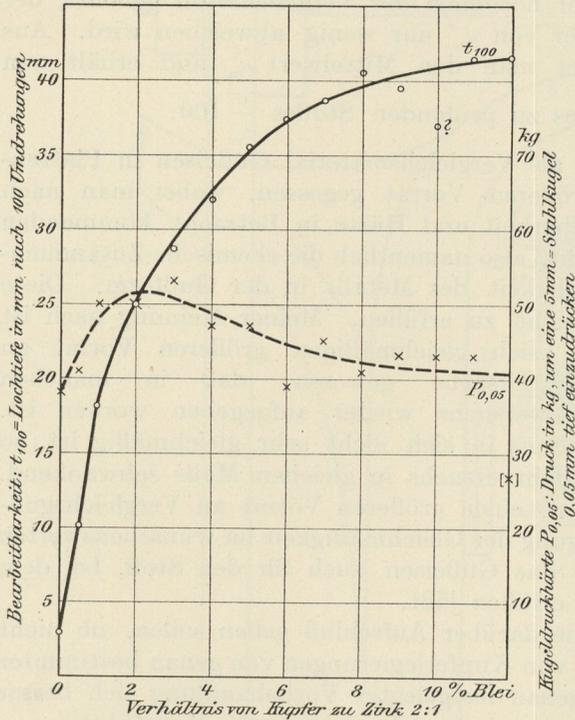


Abb. 429. Bearbeitbarkeit und Kugeldruckhärte von gegossenem bleihaltigen Messing.

außerordentlich rasch gesteigert wird. Bereits $\frac{1}{2}\%$ Blei steigert die Bearbeitungsfähigkeit auf den dreifachen Betrag gegenüber der bleifreien Legierung. Man ersieht hieraus die wesentliche Rolle, die die Verminderung der Geschwindigkeit des Messings durch Blei für die Bearbeitbarkeit spielt.

Die Kugeldruckhärte $P_{0,05}$ wird durch geringen Bleizusatz zunächst gesteigert und strebt dann wieder abwärts einem Grenzwert zu. Trotz der Steigerung der Kugeldruckhärte bis 2% Blei werden die Legierungen leichter bearbeitbar.