16. *Ueber die mechanische Härte der Metalle, besonders des Stahls; von A. Föppl.*

Auf Grund der theoretischen Arbeiten von H. Hertz¹⁾ hat Herr F. Auerbach²⁾ eine experimentelle Untersuchung über die Härte von verschiedenen Gläsern, sowie von Flussspath, Steinsalz u. dgl. angestellt. Auf die Untersuchung von Metallen nach derselben Methode scheint man bisher nicht eingegangen zu sein. Namentlich für den Stahl, dessen Härte je nach der Zusammensetzung und nach der Behandlung, der er vorher unterworfen wurde, sehr bedeutenden Schwankungen unterliegt, hat aber die genauere Kenntniss dieser Eigenschaft ein erhebliches Interesse. Zunächst und vor allem gilt dies für die technische Praxis, der mit einer einwandfreien Bestimmung der Härte der verschiedenen Stahlsorten, die in ihr verwendet werden, sehr gedient ist. Ausserdem kann aber auch die allgemeine Physik ein solches Verfahren nur schwer entbehren, namentlich weil dadurch erst eine schärfere Verfolgung der Beziehungen zwischen der mechanischen und der magnetischen Härte verschiedener Eisensorten ermöglicht wird. Mit einer Kennzeichnung des mechanischen Verhaltens durch allgemein gehaltene Ausdrücke wie „harter Stahl“, „weiches Eisen“ etc., mit der man sich bei magnetischen Arbeiten oft genug begnügt, weil man nicht recht weiss, wie man auf bequeme Art eine genauere quantitative Bestimmung dafür setzen soll, ist nicht viel genützt. Es möge mir daher gestattet sein, hier auf eine Arbeit hinzuweisen, die ursprünglich durch die Bedürfnisse der technischen Praxis hervorgerufen wurde, und die ich zuerst selbst in Angriff nahm, deren Weiterführung ich aber dann einem meiner Schüler, Herrn F. M. Schwerd, übertrug. Einen ausführlichen Bericht über diese Unter-

1) H. Hertz, Crelle's Journ. 92. 1882 und Verhandlungen d. V. z. F. d. Gewerbefl. 1882.

2) F. Auerbach, Wied. Ann. 43. 1891; 45. 1892; 53. 1894.

suchung hat Herr Schwerd in dem 25. Hefte der früher von Bauschinger und jetzt von mir herausgegebenen „Mittheilungen des mechanisch-technischen Laboratoriums der technischen Hochschule in München“ gegeben. Da diese Veröffentlichung in physikalischen Kreisen kaum gelesen wird, gebe ich hier einen kurz gehaltenen Auszug der wichtigsten Resultate, dem ich noch einige Bemerkungen anfügen werde.

Zunächst möchte ich indessen noch erwähnen, dass mir die zweite der angeführten Abhandlungen des Herrn Auerbach vor Ausführung der Versuche zufällig entgangen war. Leider war es gerade jene, die sich am nächsten mit dem Gegenstande der Untersuchung berührte. Die Versuche wurden dadurch etwas zeitraubender, da der Weg zur Bestimmung der Härte plastischer Körper erst von neuem aufgesucht werden musste. Indessen hätte sich ohnehin von vornherein nicht wohl voraussehen lassen, dass Metalle sich ganz ähnlich wie Flussspath und Steinsalz verhalten würden, und ausserdem bildet es eine um so bessere Bestätigung für die Zweckmässigkeit des von Herrn Auerbach zuerst eingeschlagenen Weges, dass ein anderer Forscher, der mit ganz anderen Absichten an die Arbeit herantrat und mit ganz anderen Materialien arbeitete, unabhängig von ihm zu gleichen Ergebnissen gelangte.

An die Probestücke, die der Prüfung unterworfen werden sollen, muss man die Anforderung stellen, dass sie sich bequem auch aus kleineren Abschnitten herstellen lassen. Deshalb entschied ich mich für die Verwendung von kleineren Plättchen, die eine Dicke von wenigstens 7 bis 8 mm haben müssen und von etwa 15 bis 20 mm Breite und einigen Centimetern Länge. Diese werden auf einer Breitseite cylindrisch zugeschliffen und fein polirt. Der Halbmesser der Cylinderfläche soll in der Regel 20 mm betragen. Aus jeder Metallsorte, die auf ihre Härte geprüft werden soll, müssen zwei Plättchen dieser Art angefertigt werden. Um die Druckflächen nachher besser erkennen zu können, überzieht man die eine Cylinderfläche mit einer feinen Russschicht. Dann legt man die Plättchen rechtwinklig kreuzweise übereinander und setzt sie einem Drucke aus. Beim ersten Versuche wählt man die Druckkraft am besten so, dass man einen bleibenden Eindruck

von etwa 2 bis 3 mm Durchmesser auf jeder Cylinderfläche erwarten kann. Dann wiederholt man den Versuch mit verschiedenen Druckkräften, sodass man nebeneinander etwa sechs Eindrücke erhält, von denen der kleinste etwa 1,5 bis 2 mm, der grösste etwa 4 mm Durchmesser hat.

Den Durchmesser der Russflecken kann man mit Hülfe eines Mikroskops messen; gewöhnlich genügt aber schon ein Abgreifen mit Hülfe des Zirkels, also eine Bestimmung bis auf etwa 0,1 mm Genauigkeit, die sich auf diese Weise leicht erreichen lässt. Der Durchmesser des Russfleckes giebt allerdings die bleibende Abplattung vermehrt um die elastische an. Wenn man aber die Hälfte des Fleckes fortwischt, überzeugt man sich, dass bei Durchmessern von etwa 1,5 bis 2 mm an der Rand der bleibenden Abplattung so genau mit dem Rande des Fleckes zusammenfällt, dass man auf den Unterschied nicht weiter zu achten braucht.

Trägt man die Druckkräfte, mit denen man die Plättchen aufeinander presste, als Abscissen und die Flächeninhalte der zugehörigen Druckflächen als Ordinaten auf, so liegen die erhaltenen Punkte ziemlich genau auf einer Geraden, die gewöhnlich nach dem Coordinatenursprunge hin gerichtet ist, zuweilen aber auch etwas daran vorbei geht. Daraus folgt, dass der auf die Flächeneinheit entfallende Druck bei allen Druckflächen ungefähr gleich gross ist. Gerade dieser wichtige Umstand wurde unabhängig von der mir damals noch unbekannten zweiten Auerbach'schen Abhandlung aus den Versuchsergebnissen gefunden. Der Schluss, dass der Mittelwerth des specifischen Druckes, der aus den Einzelversuchen mit verschiedenen Druckflächen genommen wird, als Maass der Härte verwendet werden könne, ergab sich dann ganz von selbst und er wurde dadurch weiter bestätigt, dass die so gefundene Härteziffer bei verschiedenen Metallen mit der Schwierigkeit der Bearbeitung auf der Drehbank, der Hobelmaschine oder der Bohrmaschine, soweit sich diese einschätzen lässt, hinreichend parallel geht.

Aus den auf diesem Wege mit Cylinderhalbmessern von 20 mm von Herrn Schwerd bestimmten Härteziffern führe ich die folgenden an:

Zinn, gegossen	Härte =	400 kg/cm ²
Messingguss	„ =	2300 „
Bronceguss I	„ =	3600 „
Glockenguss	„ =	4000 „
Phosphorbronze	„ =	4300 „
Schmiedeeisen	„ =	7000 „
Gusseisen	„ =	7400 „
Englischer Werkzeugstahl I, ausgeglüht	„ =	8600 „
desgl., im ursprünglichen Zustande .	„ =	12000 „
desgl., gehärtet	„ =	34000 „

Für zwei andere Werkzeugstahlsorten, eine deutsche und eine englische, wurden folgende Zahlen gefunden:

	deutscher Stahl	englischer Stahl
im ursprünglichen Zustande	11300	13200
ausgeglüht	8500	9400
einfach gehärtet	31000	26900
blau angelassen	24900	22300
gelb angelassen.	34000	31100

Inzwischen hatte ich auch die zweite Auerbach'sche Abhandlung kennen gelernt und ich veranlasste Herrn Schwerd darauf hin, auch noch einige Versuche mit Cylinderflächen von anderen Radien anzustellen. Dabei hat sich die auffallende Thatsache bestätigt, dass die nach dem beschriebenen Verfahren berechnete Härte h von der absoluten Grösse des Cylinderhalbmessers r abhängig ist. Für die in der vorausgehenden Zusammenstellung enthaltene Phosphorbronze war bei

$$r = 20 \text{ mm} \quad 40 \text{ mm}$$

$$h = 4300 \quad 3500 \text{ kg/cm}^2$$

und für eine Bronze II von anderer Herkunft bei

$$r = 10 \quad 20 \quad 40 \text{ mm}$$

$$h = 9400 \quad 7700 \quad 6300 \text{ kg/cm}^2.$$

Trotz der ziemlich abweichenden Versuchsbedingungen sind auch hier die Produkte

$$h \sqrt[3]{r}$$

sehr nahe constant, in Uebereinstimmung mit dem Ergebnisse des Herrn Auerbach.

Ich nannte diese Thatsache auffallend und sträubte mich anfänglich, an ihre Richtigkeit zu glauben. Herr Schwerd wusste, als er die Versuche anstellte, noch nichts von der

Gesetzmässigkeit, die nach den Auerbach'schen Versuchen erwartet werden konnte und ich musste mich schliesslich von der Richtigkeit der Beobachtung überzeugen. Mein anfängliches Widerstreben beruhte auf einer einfachen Ueberlegung, die dagegen zu sprechen schien. Man denke sich nämlich den Versuch einmal mit einem gewissen Cylinderhalbmesser ausgeführt und achte auf den Zustand, in dem sich irgend ein Volumenelement befindet. Wenn man sich hierauf alle Dimensionen verdoppelt denkt, so ist das dem früheren entsprechende Volumenelement in demselben Zwangszustande, denn die specifischen Dehnungen nach allen Richtungen und die Winkeländerungen sind die gleichen wie vorher. Nach allem, was wir über das Verhalten sowohl elastischer als plastischer Körper wissen, hängt aber der Spannungszustand unmittelbar von dem Formänderungszustande ab. Wir müssen also schliessen, dass auch die specifischen Spannungen in beiden Fällen überall einander gleich sind. Hiernach müsste auch auf die Flächeneinheit der Druckfläche an entsprechenden Stellen derselbe Druck kommen, d. h. die Härteziffer h müsste unabhängig von der Grösse des Krümmungshalbmessers r gefunden werden.

Soviel mir scheint, ist nur ein einziger Ausweg offen, um diesem Widerspruche zu entgehen, nämlich die Annahme, dass sich die Oberflächenschichten der festen Körper in einem anderen Zustande befinden, als die inneren Theile. Bei Flüssigkeiten kennt man diese Abweichungen sehr gut, da sie zu den Capillarerscheinungen führen und eine andere Deutung der angeführten Thatsache scheint mir auch hier ausgeschlossen zu sein. Herr Auerbach hat eine ähnliche Bemerkung auch schon gemacht; die vorher erwähnte Betrachtung findet sich aber nicht bei ihm und er kommt daher nicht zu dem Schlusse, dass hierin die einzig mögliche Deutung der Erscheinung zu suchen sei.

Von einer weiteren Verfolgung des Gegenstandes nach dieser Richtung hin glaubte ich absehen zu können, weil es für den Zweck der Untersuchung, ein praktisch brauchbares Härteprüfungsverfahren für Metalle auszubilden, hinreicht, über die Grösse von r eine Uebereinkunft zu treffen; ich schlage daher vor, den Krümmungshalbmesser von 20 mm als Normalradius beizubehalten und die Härte h stets für diesen

anzugeben. Das Produkt

$$h \sqrt[3]{r}$$

als Maass der Härte zu wählen, kann ich mich nicht entschliessen, weil diesem Producte eine Dimension mit gebrochenen Potenzexponenten zukommt, wofür es in dem Gebiete der Mechanik an jedem Beispiele fehlt. Ueberdies scheint mir, dass die Frage der Oberflächenspannungen in festen Körpern vorher noch nach anderen Seiten hin weiter geklärt werden müsse, ehe man eine endgültige Entscheidung treffen kann.

Herr G. Wiedemann hat in einer seiner bekanntesten Arbeiten die nahe Uebereinstimmung zwischen dem mechanischen Verhalten der Metalle und dem magnetischen Verhalten des Stahls nachgewiesen. Man wird hoffen dürfen, nach dieser Richtung hin auch ferner noch werthvolle Aufschlüsse zu erhalten, wenn bei magnetischen Untersuchungen die verwendeten Eisensorten stets auch nach diesem leicht auszuführenden Verfahren auf ihre mechanische Härte geprüft werden.

München, Mech.-techn. Lab. d. techn. Hochschule, im Juli 1897.