

**WERKSTATTBÜCHER**

**HERAUSGEBER EVGEN SIMON**

**HEFT 34**

**RIEBENSÄHM-  
TRÄGER**

**WERKSTOFF-  
PRÜFUNG**

**MÉTALLE**



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

# Zur Einführung.

Die Werkstattbücher behandeln das Gesamtgebiet der Werkstatttechnik in kurzen selbständigen Einzeldarstellungen; anerkannte Fachleute und tüchtige Praktiker bieten hier das Beste aus ihrem Arbeitsfeld, um ihre Fachgenossen schnell und gründlich in die Betriebspraxis einzuführen.

Die Werkstattbücher stehen wissenschaftlich und betriebstechnisch auf der Höhe, sind dabei aber im besten Sinne gemeinverständlich, so daß alle im Betrieb und auch im Büro Tätigen, vom vorwärtstrebenden Facharbeiter bis zum leitenden Ingenieur Nutzen aus ihnen ziehen können.

Indem die Sammlung so den einzelnen zu fördern sucht, wird sie dem Betrieb als Ganzem nutzen und damit auch der deutschen technischen Arbeit im Wettbewerb der Völker.

## Bisher sind erschienen:

- |  |   |
|--|---|
| Heft 1: Gewindeschneiden. (7.—12. Tausd.)<br>Von Obering. O. Müller.   | Heft 16: Reiben und Senken.<br>Von Ing. J. Dinnebier.   |
| Heft 2: Meßtechnik. Zweite, verbesserte Auflage. (7.—14. Tausend.)<br>Von Professor Dr. techn. M. Kurrein.   | Heft 17: Modelltschlerel.<br>2. Teil: Beispiele von Modellen und Schablonen zum Formen. Von R. Löwer.   |
| Heft 3: Das Anreißen in Maschinenbauwerkstätten. (7.—12. Tausend.)<br>Von Ing. H. Frangenheim.   | Heft 18: Technische Winkelmessungen.<br>Von Prof. Dr. G. Berndt.  |
| Heft 4: Wechselrädereberechnung für Drehbänke. (7.—12. Tausend.)<br>Von Betriebsdirektor G. Knappe.  | Heft 19: Das Gußeisen.<br>Von Ing. Joh. Mehrstens.  |
| Heft 5: Das Schleifen der Metalle. Zweite, verbesserte Auflage.<br>Von Dr.-Ing. B. Buxbaum.  | Heft 20: Festigkeit und Formänderung.<br>Von Studienrat Dipl.-Ing. H. Winkel.   |
| Heft 6: Teilkopfarbeiten. (7.—12. Tausend.)<br>Von Dr.-Ing. W. Pockrandt.  | Heft 21: Einrichten von Automaten.<br>1. Teil: Die Systeme Spencer und Brown & Sharpe.<br>Von Ing. Karl Sachse.   |
| Heft 7: Härten und Vergüten.<br>1. Teil: Stahl und sein Verhalten.<br>Zweite, verbess. Auflage. (16.—17. Tausd.)<br>Von Dipl.-Ing. Eugen Simon.          | Heft 22: Die Fräser.<br>Von Ing. Paul Zieting.  |
| Heft 8: Härten und Vergüten.<br>2. Teil: Praxis der Warmbehandlung.<br>Zweite, verbesserte Auflage.<br>(16.—17. Tausend.)<br>Von Dipl.-Ing. Eugen Simon. | Heft 23: Einrichten von Automaten.<br>2. Teil: Die Automaten System Gridley (Einspindel) u. Cleveland u. die Offenbacher Automaten.<br>Von Ph. Kelle, E. Gothe, A. Kreil. |
| Heft 9: Rezepte für die Werkstatt.<br>(7.—10. Tausend.)<br>Von Ing.-Chemiker Hugo Krause.  | Heft 24: Der Stahl- und Temperguß.<br>Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.  |
| Heft 10: Kupföfenbetrieb.<br>Von Gießereidir. C. Irresberger.  | Heft 25: Die Ziehtechnik in der Blechbearbeitung.<br>Von Dr. Ing. Walter Sellin.  |
| Heft 11: Freiformschmiede.<br>1. Teil: Technologie des Schmiedens. — Rohstoffe der Schmiede.<br>Von Direktor P. H. Schweißguth.                          | Heft 26: Räumen.<br>Von Ing. Leonhard Knoll.  |
| Heft 12: Freiformschmiede.<br>2. Teil: Einrichtungen und Werkzeuge der Schmiede.<br>Von Direktor P. H. Schweißguth.                                      | Heft 27: Einrichten von Automaten.<br>3. Teil: Die Mehrspindel-Automaten.<br>Von E. Gothe, Ph. Kelle, A. Kreil.   |
| Heft 13: Die neueren Schweißverfahren.<br>Zweite, verbesserte u. vermehrte Auflage.<br>Von Prof. Dr.-Ing. P. Schimpke.                                   | Heft 28: Das Löten. Von Dr. W. Burstyn.   |
| Heft 14: Modelltschlerel.<br>1. Teil: Allgemeines. Einfachere Modelle.<br>Von R. Löwer.  | Heft 29: Die Kugel- und Rollenlager (Wälzlager). Von Hans Behr.   |
| Heft 15: Bohren.<br>Von Ing. J. Dinnebier.   | Heft 30: Gesunder Guß.<br>Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.  |
|  | Heft 31: Gesenkschmiede. 1. Teil: Arbeitsweise und Konstruktion der Gesenke.<br>Von P. H. Schweißguth.  |
|  | Heft 32: Die Brennstoffe.<br>Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.   |
|  | Heft 33: Der Vorrichtungsbau.<br>I: Einteilung, Einzelheiten u. konstruktive Grundsätze.<br>Von Ing. Fritz Grünhagen.   |

Aufstellung der in Vorbereitung befindlichen Hefte s. 3. Umschlagseite.

Jedes Heft 48—64 Seiten stark, mit zahlreichen Textfiguren.

**WERKSTATTBÜCHER**  
**FÜR BETRIEBSBEAMTE, VOR- UND FACHARBEITER**  
**HERAUSGEGEBEN VON EUGEN SIMON, BERLIN**

HEFT 34

# **Werkstoffprüfung**

## **(Metalle)**

Von

**Prof. Dr.-Ing. P. Riebensahm** und **Dr.-Ing. L. Traeger**

Mit 92 Figuren im Text



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1928

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung . . . . .	3
I. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften . . . . .	4
A. Wissenschaftliche Prüfverfahren . . . . .	4
1. Die statischen Untersuchungen . . . . .	4
a) Der Zugversuch . . . . .	4
b) Der Druckversuch . . . . .	17
c) Der Biegeversuch . . . . .	19
d) Die Härteprüfung . . . . .	21
e) Verdrehungs- (Torsions-) Versuch . . . . .	25
f) Der Scherversuch . . . . .	25
g) Der Lochversuch . . . . .	26
2. Die dynamischen Untersuchungen . . . . .	26
a) Der Schlagdruck- und Schlagzug-Versuch . . . . .	29
b) Der Schlagbiege-Versuch . . . . .	30
c) Die Kerbschlagbiegeprüfung . . . . .	32
d) Die dynamische Härteprüfung . . . . .	37
e) Die Untersuchung der Bearbeitbarkeit . . . . .	41
f) Die dynamischen Dauerversuche . . . . .	43
B. Technologische Prüfungen . . . . .	49
1. Warmproben . . . . .	49
Warmbiegeprobe, Ausbreitprobe, Stauchprobe, Aufornprobe, Polterprobe, Bördelprobe, Schweißprobe.	
2. Kaltproben . . . . .	52
Kaltbiegeprobe, Kaltstauchprobe, Bördelprobe, Gewindebiegeprobe, Hin- und Herbiegeprobe, Verwindeprobe, Wickelprobe, Treibprobe, verschiedene Ver- fahren.	
II. Metallographische Untersuchung . . . . .	55
A. Die praktische Ausführung der Untersuchung . . . . .	55
B. Die Bedeutung der Gefügebilder . . . . .	64
III. Röntgen-Untersuchung . . . . .	66
A. Röntgendurchleuchtung . . . . .	66
B. Spektroskopische Untersuchung . . . . .	66
1. Das Raumgitter . . . . .	66
2. Das Laue-Verfahren . . . . .	66
3. Das Deby-Scherrer-Verfahren . . . . .	68

---

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Copyright 1928 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1928

## Einleitung.

Den besten Beweis für die Bedeutung der Werkstoffprüfung in der Technik bietet ihre Entwicklung. In der Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde die erste planmäßige Untersuchung von Baustoffen öffentlich bekannt, und heute gibt es keinen Industriezweig, der auf die Ergebnisse solcher Untersuchungen verzichten könnte. Sie vermittelt der Praxis für die Konstruktion und für die Fabrikation die Kenntnis von den Eigenschaften der Bau- und Werkstoffe und ermöglicht es dadurch, die zweckmäßigsten Stoffe und Formen ohne teures Probieren zu bestimmen. Die Ergebnisse der Untersuchungen bieten einen Anhalt für das Verhalten und die Veränderungen der Eigenschaften der Baustoffe bei den verschiedenen Beanspruchungen, sowohl während der Fabrikation bei der spanlosen und spanabhebenden Formgebung, wie bei Wärmebehandlungen als auch im fertigen Werkstück bei Belastungen oder unter dem Einfluß magnetischer, chemischer oder elektrischer Energien. Neben der Prüfung der Baustoffe und Werkstücke gehört aber zur Materialprüfung auch die Untersuchung der Verbrauchsmaterialien, wie Schmieröle, Brennstoffe usw., von deren Eigenschaften die Wirtschaftlichkeit ihrer Verwendung abhängt.

Soll die Werkstoffuntersuchung nur einzelne Daten liefern, die zur Kontrolle von Lieferungen zwischen Käufer und Verkäufer vereinbart wurden, oder die zur Überwachung des Betriebes dienen sollen, können die erforderlichen Prüfungen leicht in jedem Betrieb mit einfachen Einrichtungen ausgeführt werden. Die Untersuchung wichtigerer Fragen erfordert jedoch gründliche Kenntnisse der physikalischen Zusammenhänge, und überall dort, wo durch die Werkstoffprüfung Richtlinien für Konstruktion oder Fabrikation gewonnen werden sollen, werden deshalb Durchführung und Auswertung Fachleuten vorbehalten bleiben. Ob sich für einen Betrieb die Einrichtung eines eigenen Prüflaboratoriums lohnt oder nicht, hängt natürlich von den Verhältnissen ab. Bei einer guten Zusammenarbeit mit dem Betrieb überwiegen gewöhnlich die Ersparnisse durch die Verringerung des Ausschusses und der Probeausführungen die Kosten eines zweckmäßig eingerichteten Laboratoriums. Wie aber vom Materialfachmann verlangt werden muß, daß er mit den Verhältnissen im Betriebe vertraut ist, so ist es auch für jeden Konstrukteur und Betriebsfachmann mehr oder minder nötig, mit den grundlegenden Untersuchungsverfahren der Werkstoffprüfung und der praktischen Bedeutung ihrer Ergebnisse vertraut zu sein, denn nur unter dieser Voraussetzung kann er die Brauchbarkeit der verschiedenen Materialien für bestimmte vorliegende Zwecke beurteilen. Besonders in der heutigen Zeit, wo die Industrie zur Erzielung größerer Wirtschaftlichkeit auf die beste Ausnutzung der ihr zur Verfügung stehenden Materialien drängt, und andererseits die Wissenschaft mit Erfolg dahin arbeitet, ihre Erkenntnisse über den Aufbau der Stoffe und den Zusammenhang der Eigenschaften zu erweitern, ist es nötig, die Ergebnisse der Werkstoffprüfung beurteilen zu können, um die praktischen Ausnutzungsmöglichkeiten wissenschaftlicher Erfolge zu übersehen.

Für die Werkstoffprüfung lassen sich folgende Arten der Untersuchung unterscheiden:

1. Die Untersuchung der mechanischen oder allgemein der physikalischen Eigenschaften.
2. Die chemische Untersuchung der Zusammensetzung.

3. Die metallographische Untersuchung des Gefügeaufbaues.
4. Die Röntgendurchleuchtung.
5. Die spektroskopische Röntgenuntersuchung zur Bestimmung des Feinaufbaues der einzelnen Kristalle.

Von diesen haben heute nur die ersten drei praktische Bedeutung. Die Röntgenuntersuchungen befinden sich noch in der Entwicklung. Auf Grund der Fortschritte in der letzten Zeit kann man aber erwarten, daß auch sie in Kürze praktische Anwendung finden werden.

## I. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften.

Bei der Auswahl von Baustoffen sind im allgemeinen die mechanischen Eigenschaften von ausschlaggebender Bedeutung. Dementsprechend steht auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung die mechanische Untersuchung ebenfalls im Vordergrund. Die hierbei angewandten Prüfverfahren gliedern sich in wissenschaftliche und technologische. Das Merkmal der wissenschaftlichen Untersuchung ist ein zahlenmäßig erfaßbares Ergebnis mit bestimmter Dimension, das unter einheitlichen Bedingungen gewonnen ist, so daß die Ergebnisse unabhängig von Zeit und Ort der Untersuchung als gleichwertig einander gegenübergestellt werden können. Hieraus ergibt sich für die wissenschaftlichen Untersuchungen die Folgerung, daß nur mechanisch möglichst einfache Beanspruchungen gewählt werden und bei diesen das Verhalten des Werkstoffes beobachtet wird.

Die technologischen Verfahren dagegen haben lediglich das Ziel, das Verhalten der Werkstoffe bei solchen Beanspruchungen zu untersuchen, wie sie später während der Fabrikation oder am fertigen Werkstück auftreten, um seine Verwendbarkeit festzustellen. Es wird aber kein Wert darauf gelegt, das Ergebnis der Untersuchung zahlenmäßig zu erfassen.

### A. Wissenschaftliche Prüfverfahren.

Die einem Werkstück zugemuteten Beanspruchungen lassen sich grundsätzlich in statische und dynamische trennen. Bei der statischen Beanspruchung unterliegt es einer gleichmäßigen ruhenden Last, durch die das Material auf Zug, Druck, Biegung, Verdrehung oder Schub beansprucht werden kann. Bei der dynamischen Beanspruchung dagegen ist das Wesentliche die Veränderung des Spannungszustandes. Diese kann in einer Veränderung der Größe der Belastung oder der Angriffsrichtung der Belastung, als schwellende oder wechselnde Belastung oder als Stoß in Erscheinung treten.

#### 1. Die statischen Untersuchungen.

##### a) Der Zugversuch.

Die einfachste statische Beanspruchung ist der Zug. Durch den wissenschaftlichen Zugversuch soll festgestellt werden, welche Formänderungen im Werkstoff unter Einwirkung von Zugkräften auftreten. Zur theoretisch genauen Bestimmung wäre es daher nötig, verschiedene Probestäbe bei verschiedenen großen Belastungen zu beobachten. Praktisch würde dies jedoch sehr viel Zeit und Material erfordern und daher oft mit Schwierigkeiten verbunden sein. Beim normalen Zugversuch beschränkt man sich deshalb darauf, die Verlängerung des Probestabes bei langsam wachsender Last in Abhängigkeit von deren jeweiliger Größe zu bestimmen.

Die graphische Darstellung der Verlängerung des Probestabes in Abhängigkeit von der Belastung stellt das Zerreißdiagramm dar, in dem normalerweise die Ver-

längerung in vergrößertem Maßstabe als Abszisse und die Belastung als Ordinate eingetragen sind. Um die Versuchswerte vergleichen zu können, ist es nötig, aus den Belastungen die Beanspruchungen der Einheit des Querschnittes des Probestabes zu bestimmen. In der Materialprüfungstechnik wird diese Größe als Spannung bezeichnet und im allgemeinen in der Dimension  $\text{kg}/\text{mm}^2$  angegeben. Nur in einigen Fällen ist hierfür noch  $\text{kg}/\text{cm}^2$  üblich. Die Verlängerung des Probestabes wird zur Auswertung des Versuches in Prozenten ausgedrückt, wobei, wie später erläutert wird, die Ausgangslänge des Probestabes berücksichtigt werden muß.

Der Verlauf des Zerreißdiagrammes ist bei den Metallen sehr verschieden. Fig. 1 zeigt die typische Form des Zerreißdiagrammes bei weichem Flußstahl. Das Diagramm besagt, daß das Material anfangs bei steigender Belastung sich nur wenig, aber gleichmäßig bis zur Belastung  $P$  verlängert. Bei einer weiteren Belastungssteigerung nimmt die Verlängerung verhältnismäßig schneller zu, so daß die Kurve von der bisherigen geraden Richtung abweicht. Bei der Belastung  $S_0$  beginnt der Stab zu fließen, d. h. er verlängert sich, ohne daß die Belastung gesteigert wird und selbst noch, wenn die Last bis zu Höhe  $S_U$  verringert wird. Ist das Material wieder in einen Gleich-

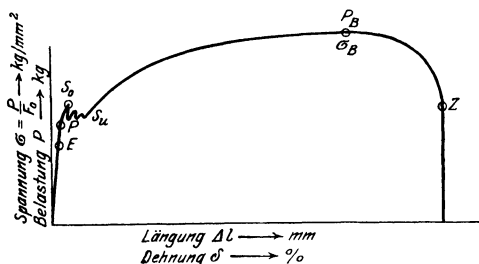


Fig. 1. Zerreißdiagramm von weichem Eisen.

gewichtszustand gekommen und erhöht man hierauf wieder die Belastung, so tritt jetzt im Verhältnis zum Verlauf des ersten Teils der Kurve eine sehr starke Verlängerung ein. Bei der Belastung  $P_B$  hat man die Höchstlast des Stabes erreicht. Bis etwa zu dieser Beanspruchung ist die Verlängerung des Stabes, abgesehen von einer geringen Raumvergrößerung unterhalb der Streckgrenze, durch eine gleichmäßige Abnahme des Querschnittes über die ganze Länge entstanden (vgl. Fig. 2). Jetzt tritt an der späteren Bruchstelle eine örtliche Einschnürung ein und der Stab erfährt infolge dieser örtlichen Schwächung auch bei abnehmender Belastung noch eine starke Verlängerung.

Während der Belastungssteigerung wird also bis zur Höchstlast  $P_B$  durch die Reckung des Stabes die Festigkeit des Werkstoffes bei jeder Belastungsgröße so weit erhöht, daß er trotz der Querschnittsverminderung die Last aushält. Man bezeichnet diese Erscheinung mit Kaltverfestigung. Wie später noch gezeigt wird, entspricht aber die Verlängerung beim Zerreißversuch nicht immer tatsächlich einer für die Aufnahme der betreffenden Belastung nötigen Verfestigung. Denn die Einstellung des wirklichen Gleichgewichtes erfordert bei den Werkstoffen verschieden lange Zeiten, und

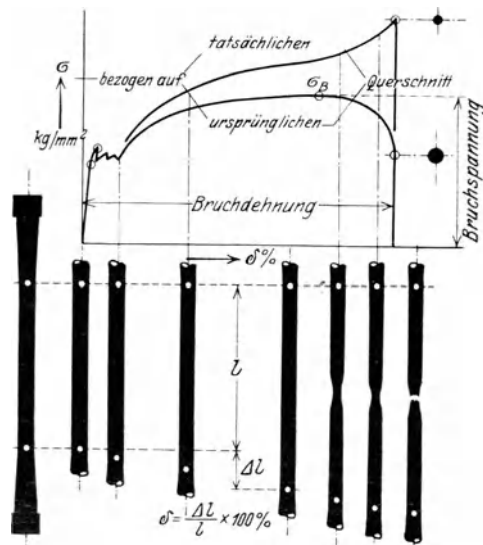


Fig. 2. Reduziertes Zerreißdiagramm und Stabformänderungen.

oft werden die Werkstoffe bei dauernden Belastungen unter  $P_B$  durch Kaltreckung gar nicht so weit verfestigt.

Um aus dem Diagramm der Belastungen in kg und Verlängerungen in mm das Zerreißdiagramm für Spannung und Dehnung zu bekommen, müssen wir theoretisch die jeweilige Belastung durch den jeweilig schwächsten Querschnitt dividieren. Für den praktischen Gebrauch interessiert jedoch nur die Spannung, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt, da nach diesem die Werkstücke berechnet werden müssen. Es vereinfacht sich infolgedessen die Aufgabe der Reduzierung des Belastungsdiagramms dahin, daß man nur die Belastungen durch den ursprünglichen Querschnitt und die Verlängerung durch die ursprüngliche Versuchslänge zu dividieren braucht, entsprechend den Formeln:

$$1) \sigma = \frac{P}{F} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right] \quad \text{und} \quad 2) \delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 [\%].$$

Da es sich für beide Größen um einen konstanten Faktor handelt, besteht diese Reduzierung in einer einfachen Veränderung des Maßstabes.

Wie wenig dieses praktische Diagramm, das auf den ursprünglichen Querschnitt bezogen ist, jedoch die wahren Spannungsverhältnisse im Probestab wiedergibt — die man erhält, wenn man die Belastungen durch den jeweiligen Querschnitt dividiert —, zeigt die obere Kurve in Fig. 2. Besonders groß wird der Unterschied nach berschreiten der Höchstlast  $P_B$ . Während das praktische Zerreißdiagramm eine Abnahme der Tragfähigkeit des Werkstoffes anzeigt, ergibt

sich aus dem reduzierten Zerreißdiagramm, daß auch in diesem Bereich die Spannung im Werkstoff wächst.

Die Dehnung bzw. die Verlängerung im Zerreißdiagramm entspricht der Dehnung der ganzen Probestablnge, wenn man zunächst von den Fehlern bei der Aufnahme eines Zerreißdiagramms absieht. Fig. 3 dagegen zeigt die Dehnungen der einzelnen Teile eines 20fach unterteilten

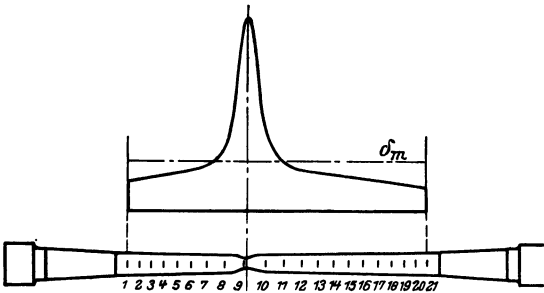


Fig. 3. Die Dehnung der einzelnen Teile eines Zerreißstabes.

Probestabes. Nur zwei Teile besitzen die Durchschnittsdehnung des gesamten Stabes, die Teile in der Nähe der Bruchstelle haben eine bedeutend größere Dehnung und die meisten Teile des Stabes eine geringere Dehnung.

Es ergibt sich hieraus zunächst, daß für die Dehnungsbestimmung unbedingt eine bestimmte Probestablnge festgelegt sein muß, wenn die Dehnungswerte, die man als Durchschnittsdehnung des Probestabes angegeben hat, miteinander vergleichbar sein sollen, und ferner, daß diese Länge ungefähr gleichmäßig zu

beiden Seiten der Bruchstelle verteilt ist. Die praktische Bestimmung der Dehnung beim Zerreißversuch ist deshalb durch die DIN Nr. 1605 festgelegt. Für genauere Untersuchungen wird die Meßlänge des Probestabes in 20 Teile unterteilt. Nach dem Bruch wird die Länge  $l'$  (Fig. 4)

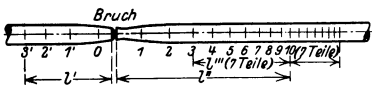


Fig. 4. Genaue Bestimmung der Dehnung (DIN Nr. 1605).

von der Endmarke der Meßlänge bis zur Bruchstelle des kurzen Stabteils und die Länge  $l''$  von der Bruchfläche bis zur zehnten Marke auf den anderen Stabteil bestimmt. Die restlichen Teile auf dem größeren Stabteil geben die nicht me-



baren Teile des kürzeren Stabes an, wenn der Bruch in der Mitte liegen soll. Man ersetzt sie dadurch, daß man die Länge  $l'''$  der entsprechenden Teile des längeren Stabteils mißt. Die Verlängerung  $\Delta l$  der Meßlänge  $l_0$  nach dem Bruch ist dann  $\Delta l = l' + l'' + l''' - l_0$ . Bei weniger genauen Versuchen genügt es nach den Normen, wenn die Bruchstelle innerhalb des mittleren Drittels der Meßlänge des Probestabes liegt, um aus der Differenz der Meßlängen nach und vor dem Versuch die Dehnung zu berechnen.

Wie bereits anfangs erwähnt, unterscheiden sich die Zerreißdiagramme der Metalle nicht nur durch die Größe der Spannungen und Dehnungen, sondern auch durch den Verlauf der Kurven. Dies ist in Fig. 5 an einigen

Beispielen gezeigt. Bei Stählen wird mit zunehmender Zugfestigkeit die Bruchdehnung geringer und gleichzeitig die Streckgrenze schwächer ausgeprägt. Gußeisen, das geringe Festigkeit und sehr geringe Dehnung besitzt, zeigt im Diagramm keine Streckgrenze und bis zum Bruch ein Ansteigen der Spannungslinie. Es fehlt also die örtliche Einschnürung an der Bruchstelle. Die Nichteisenmetalle zeigen ebenfalls fast alle die Streckgrenze nicht. Ferner unterscheiden sich ihre Diagramme von dem des Stahls meistens dadurch, daß sie bereits bei geringen Belastungen verhältnismäßig große Verlängerungen zeigen, und daß das Diagramm anfangs keinen geraden Verlauf aufweist, d. h. daß Dehnung und Spannung nicht verhältnismäßig sind.

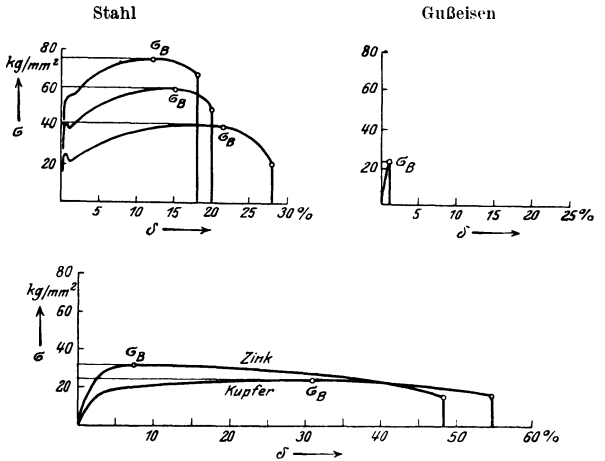


Fig. 5. Zerreißdiagramme verschiedener Metalle.

Es sei ferner an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, daß ein und derselbe Werkstoff bei verschiedenen Vorbehandlungen sehr verschiedene Zerreißdiagramme ergibt. Als Beispiel sind in Fig. 6 die Zerreißdiagramme eines Stahls im gehärteten, im angelassenen und im ausgeglühten Zustand nebeneinander gestellt.

Von den äußeren Erscheinungen an den Versuchsmaterialien während des Zerreißversuches seien hier nur die Fließlinien und die charakteristischen Formen der Bruchflächen erwähnt. Die Fließlinien, auch Lüdersche oder Hartmannsche Linien genannt, erscheinen als dunkle Linien auf den polierten Probestäben, wenn die Spannung über die Streckgrenze  $\sigma_S$  (vgl. Fig. 1) steigt. Sie verlaufen, sich gegenseitig schneidend, unter  $45^\circ : 60^\circ$  gegen die Stabachse geneigt (Fig. 7). Die Zahl der Fließlinien steigt mit der Verlängerung des Stabes. Bei Probestäben mit Zunder, Rost oder Farbschichten werden die Fließlinien gewöhnlich durch das Abspringen

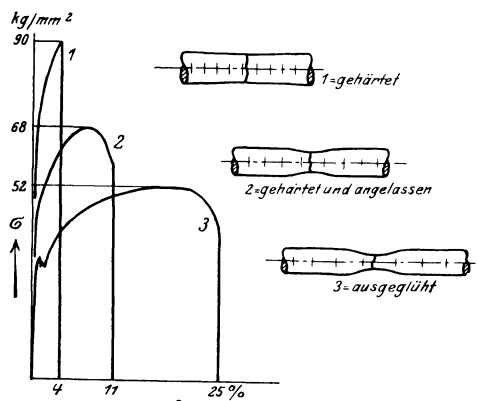


Fig. 6. Zerreißdiagramm eines Stahls gehärtet, angelassen und ausgeglüht.

der Oberflächenschicht auf diesen Linien deutlich. Sie bieten infolgedessen ein Mittel, um bei Brüchen in der Praxis festzustellen, ob das Material über die Fließgrenze beansprucht wurde. Wie später ausgeführt, gibt es auch Ätzungsverfahren, die es gestatten, den Fließlinien entsprechende Ätzfiguren auf Flächen hervorzurufen, die bei der Belastung gar nicht an der Oberfläche gelegen zu haben brauchen.

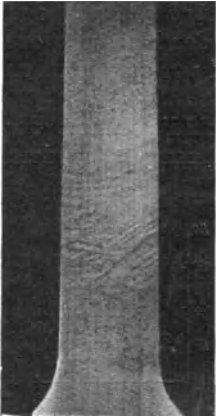


Fig. 7. Fließlinien auf einem Flachstab.

Der ideale Bruch eines Zerreißstabes ergibt drei Teile (Fig. 8a). An der Bruchstelle ziehen sich zwei kegelstumpffartige Spitzen aus einem am Umfang stehenbleibenden Ring heraus. Praktisch ist dies sehr häufig noch an der Bruchform *b* zu erkennen, bei der der Ring unbeschädigt auf einem Kegel haften geblieben ist. Häufiger sind jedoch unregelmäßigere Formen, wie z. B. der zackige Bruchrand in Fig. 8c, der dadurch entsteht, daß Teile des Ringes auf einem Kegel sitzen bleiben, während andere herausgerissen werden, oder die schiefe Bruchfläche, wobei je eine Hälfte des Ringes auf einem Kegelstumpf haften geblieben ist.

Das Bruchaussehen bietet bereits eine gute Unterlage für die Beurteilung des Werkstoffes. Aus dem Aussehen des Trichtergrundes, ob grob- oder feinkörnig, ob gleichmäßig oder verschieden, und aus der Größe des Bruchrandes, die ungefähr der Größe der Einschnürung entspricht, kann der Fachmann bereits viele Eigenschaften des Materials mit ziemlicher Gewißheit angeben. An dieser Stelle soll jedoch nicht weiter darauf eingegangen werden, da bei mangelnder Erfahrung das Bruchaussehen zu groben

Trugschlüssen führen kann, zu denen gerade der Nichtfachmann am leichtesten neigt, da es leicht sichtbare Merkmale sind, nach denen er urteilen könnte, die aber für sich allein nur einen Hinweis bieten und in jedem Fall einer Nachprüfung bedürfen.

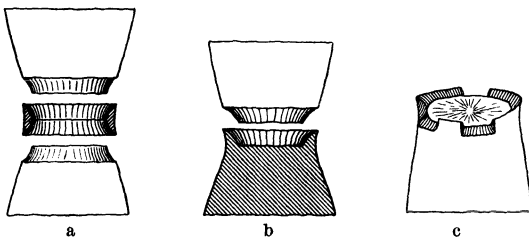


Fig. 8. Bruchformen des Zerreißstabes.

Bruchstelle hingewiesen. Sie bietet in vielen Fällen einen besseren Anhalt zur Beurteilung der Zähigkeit als die Bruchdehnung. Es geht dies aus Fig. 6 hervor, in der neben den Zerreißdiagrammen die Bruchstellen dargestellt sind. Die Bruchfläche eines zähen Stahls besitzt einen großen Trichterrand, während ein harter Werkzeugstahl ohne Einschnürung und ohne Trichterrand zerreißt. Gehärtete Werkzeugstähle ergeben oft ein fräserartiges Bruchaussehen.

Bei normalen Flußstahlproben treten gewöhnlich auf der Oberfläche Längsnähte auf. Sie entstehen durch eingeschlossene Faserbündel mit geringerer Dehnung, die infolgedessen bereits zerreißen, bevor die Bruchdehnung des Stabes erreicht ist, sobald die sie umgebenden Stabteile jeweils die Bruchdehnung der Faser überschreiten. Je nach der Entfernung der Faser von der Oberfläche entstehen kleine Querrisse oder eine perlschnurartige Aufrauung an der Oberfläche des Stabes.

### Die charakteristischen Werte des Zerreißdiagrammes.

Die Zugfestigkeit  $\sigma_B$  ist die höchste Spannung, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt, die der Werkstoff vor dem Bruch ausgehalten hat. Sie entspricht also, wie Fig. 2 zeigt, nicht der Spannung im Augenblick des Bruches.

Die Bruchdehnung  $\delta$  ist die mittlere Dehnung der Stablänge nach dem Bruche, bezogen auf die ursprüngliche Länge. Sie fällt also im Zerreißdiagramm nicht mit der Zugfestigkeit zusammen.

Die obere Streckgrenze  $\sigma_{S_o}$  ist die Spannung, bei der der Stab ohne Vergroerung der Belastung eine Längung erfährt.

Die untere Streckgrenze  $\sigma_{S_u}$  ist die niedrigste Spannung, bei der die bei der oberen Streckgrenze beginnende Formänderung noch fort dauert.

Nach den Normen wird als Streckgrenze die obere Streckgrenze angegeben. Wenn die Streckgrenze nicht am Fließen des Werkstoffes zu erkennen ist, gilt praktisch als Streckgrenze die Spannung, nach der der Stab im entlasteten Zustand 0,2% bleibende Dehnung zeigt.

Proportionalitätsgrenze  $\sigma_P$  ist die Spannung, bis zu der der Stab bei gleichen Laststeigerungen gleiche Längenänderungen zeigt.

Elastizitätsgrenze  $\sigma_E$  ist theoretisch die höchste Spannung, nach der der Stab wieder auf die ursprüngliche Länge zurückgeht; praktisch ist es die Spannung, nach der der Stab eine sehr geringe bleibende Dehnung zeigt (0,001 ÷ 0,025%).

Einschnürung (Kontraktion)  $\varphi$  ist die Querschnittsverminderung an der Bruchstelle in Prozenten des ursprünglichen Querschnittes.

Arbeitsvermögen ist der Inhalt der Fläche des Zerreißdiagrammes unter Berücksichtigung des Maßstabes. Es entspricht der Arbeit, die für die Querschnittseinheit aufgewendet ist, um den Stab zu zerreißen.

Völligkeitsgrad ist das Verhältnis zwischen der Fläche des Zerreißdiagrammes und dem Inhalt des Rechteckes, dessen Seiten parallel zu den Koordinatenachsen die Diagrammfläche begrenzen.

### Die Stabformen.

Das Ziel der wissenschaftlichen Untersuchung ist, wie anfangs erwähnt, ein zahlenmäßig fabares Ergebnis mit bestimmter Dimension, das mit anderen ver-

glichen werden kann. Sie erfordert daher genau festgelegte Versuchsbedingungen. Von groter Bedeutung ist zunächst die Form des Probestabes. Fig. 9 oben zeigt den für Deutschland festgelegten langen Normalstab. Er hat einen zylindrischen Schaft von 20 mm Durchmesser und 220 mm Länge, von denen 200 mm als Meßlänge beobachtet werden. Die zur Einspannung erforderlichen Köpfe sind durch schlanke Kegel mit dem zylindrischen Stab verbunden. Die zu diesem Probestab nötigen großen

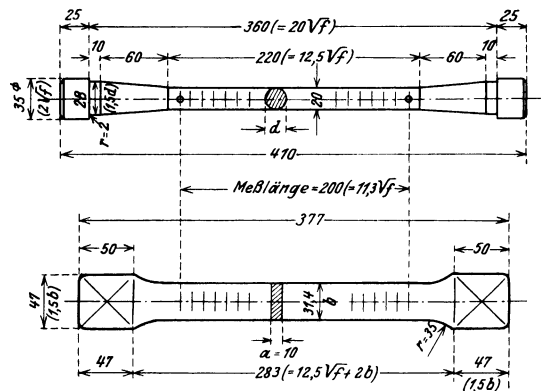


Fig. 9. Normal- und Proportional-Zerreißstab.

Materiallngen führten schon früh zu dem kurzen Normalstab, der bei gleichem Durchmesser nur eine Meßlänge von 100 mm und eine Gesamtlänge des zylindrischen Schaftes von 120 mm hat. Da aber die Herstellung dieser bestimmten

Größen aus zu untersuchenden Werkstücken nur selten möglich ist, ging man zum Proportionalstab über, dessen Form dem Normalstab entspricht, ohne aber dieselben Größen zu besitzen. Zur Erzielung vergleichbarer Versuchsergebnisse muß bei den Probestäben das Verhältnis zwischen Querschnitt und Meßlänge (vgl. Fig. 9) gewahrt bleiben, was durch umfangreiche Untersuchungen bewiesen ist. Auf Grund dieser Feststellung ist es auch nur möglich, bei Untersuchung von Blechen trotz Verwendung rechteckiger Querschnitte vergleichbare Festigkeitswerte zu erhalten. Es gilt hierbei nur die Einschränkung, daß das Seitenverhältnis nicht größer als 1:4 ist. Die übliche Form des Flachstabes zeigt Fig. 9 unten. Diese Proportionalstäbe, zu denen ja auch die Flachstäbe gehören, besitzen entweder die Form des langen oder des kurzen Normalstabes, d. h. die Meßlänge ist  $11,3\sqrt{f}$  oder  $5,65\sqrt{f}$ . Da aber bei der Untersuchung von Profilen der Einfluß von Oberfläche und Form nicht ausgeschaltet werden kann, und vielfach, besonders bei Drähten, die Herstellung von Proben mit dem bestimmten Verhältnis zum Querschnitt nicht immer ausführbar ist, werden in solchen Fällen außerdem Lang- und Kurzstäbe verwandt, die bei beliebigem Querschnitt eine feste Meßlänge von 200 bzw. 100 mm besitzen.

Der Einfluß der Meßlänge macht sich, wie bereits oben erwähnt, besonders bei der Bestimmung der Dehnung bemerkbar. Bei der Auswertung des Versuches ist es daher unerläßlich, daß mit der Dehnung die Meßlänge angegeben wird. Dies gilt besonders beim Vergleich mit Versuchswerten des Auslandes, da die Stabformen von der deutschen oft beträchtlich abweichen. Die durch DIN 1605 festgelegten Stabformen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Zerreißstäbe.

Bezeichnung der Probestabform	Anmessungen in mm			Dehnungsbezeichnung
	kleinste Versuchslänge	Meßlänge $l$	$\varnothing$	
Langer } Normalstab . . . . .	200	$(10d) = 200$	20	$\delta_{10}$ $\delta_5$
Kurzer }	120	$(5d) = 100$		
Langer } Proportionalstab . . . . .	$l + d$	$10d = 11,3\sqrt{F_0}$	beliebiger Querschnitt	$\delta_{10}$ $\delta_5$ $\delta_l$ $\delta_k$
Kurzer }		$5d = 5,65\sqrt{F_0}$		
Langstab . . . . .		200		
Kurzstab . . . . .		100		

Die Differenz in den Dehnungswerten bei kurzen und langen Proportionalstäben erhellt aus den Normenvorschriften für Schmiedestahl DIN 1611.

Tabelle 2.

$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\delta_{10}$ %
34 ÷ 42	30	25
60 ÷ 70	17	14

Es zeigt sich aus diesen Werten gleichzeitig, daß bei härteren Stählen, die geringere Einschnürung und deshalb an der Bruchstelle keine so stark über Durchschnitt liegende Dehnung besitzen, der Einfluß der Stablänge geringer ist.

Durch die Kopfform des Probestabes werden ebenfalls die Dehnungswerte des Versuches beeinflusst, denn durch die Materialanhäufung im Kopf wird die Bewegung der anschließenden Materialteile behindert und infolgedessen die Dehnung der Teile in der Nähe des Kopfes verkleinert. Für wissenschaftliche Versuche ist es deshalb notwendig, sich an die genaue Form des Normalstabes zu halten. Bei praktischen Untersuchungen dagegen kann man dies unberücksichtigt lassen. Man richtet sich vielmehr bei der Ausbildung des Kopfes nach den vorhandenen Einspannvorrichtungen und den vorliegenden Materialstärken. Fig. 10 zeigt die üblichen Kopfformen und

Einspannungen für praktische Versuche. Bei der Kopfform Fig. 10a des Normalstabes ruht der zylindrische Ansatz auf einer kugelig gewölbten Unterlage, so daß eine gute Ausrichtung des Stabes und eine sehr geringe Beeinflussung der Materialbewegung gewährleistet ist. Bei der einfacheren Einspannung Fig. 10b wird der zylindrische, etwas verstärkte Kopf zwischen zwei kegeligen gleitenden Backen, die beide einen v-förmigen Einschnitt mit feilenartigen Zähnen besitzen, eingeklemmt. Einfacher und praktischer als diese Einspannung ist die nach Fig. 10c, bei der der Kopf des Probestabes mit Gewinde versehen ist und in eine kugelschalenförmige Unterlage eingeschraubt wird. Diese Einspannung ist der vorigen vorzuziehen, weil der Probestab sich ausrichten kann und infolgedessen die Gefahr einer zusetzlichen Biegebeanspruchung fortfällt. Da bei ihr auch die vorliegende Stärke des zu untersuchenden Werkstoffes gut ausgenutzt wird, wird sie in der Praxis sehr häufig angewandt. Bei Flachstäben ist das Einklemmen des verbreiterten Kopfes zwischen ebenen, feilenartig aufgehauenen Backen (Fig. 10d) üblicher als das Einspannen mit einem Dorn durch eine Bohrung im Stabkopf. Für die Untersuchungen von Profilen, Ketten, Seilen usw., die bereits in das Gebiet der technologischen Untersuchungen fallen, sind Sondereinspanneinrichtungen nötig.

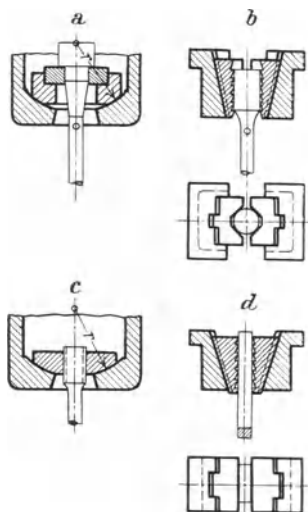


Fig. 10. Stabeinspannungen beim Zerreißversuch.

Die Zerreißmaschine und Versuchseinrichtungen. Die Zerreißmaschine besteht aus dem Gestell, dem Krafterzeuger und dem Kraftmesser. Da hier über die verschiedenen Ausführungsarten nur das notwendigste gesagt werden kann, erübrigt es sich, viel über das Gestell zu sagen. Es enthält die Lagerungen für Krafterzeuger und Kraftmesser. Die Kraft kann entweder hydraulisch oder mechanisch von Hand oder durch Motor erzeugt werden. Bei der hydraulischen Krafterzeugung wird die Kraft gleichmäßig gesteigert, während bei der mechanischen gewöhnlich eine gleichmäßige Dehnung bewirkt wird, und infolgedessen anfangs eine sehr schnelle Steigerung der Spannung entsteht. Beide Verfahren haben ihre Vorteile und Nachteile, und es läßt sich nur schwer mit wenigen Worten eine Richtlinie für die Beschaffung von Zerreimaschinen angeben, da es hauptsächlich immer auf den Zweck und die Bedienung der Maschine ankommt. Als Kraftmesser sind Laufgewichtswagen und Medosen mit Manometer gleich üblich. Bei der Laufgewichtswage wird die Belastung durch die Größe des jeweiligen Hebelarmes bestimmt, der für ein konstantes, verschiebbares Gewicht nötig ist, um der Kraft das Gleichgewicht zu halten. Sie arbeitet nach dem Grundsatz der bekannten Dezimalwagen. In der Meßdose wird die Belastung durch einen Kolben oder eine Membran auf eine Flüssigkeit übertragen und der Druck durch ein Manometer bestimmt. Aus der Druckanzeige des Manometers in  $\text{kg/cm}^2$  und der Größe der Kolbenfläche ergibt sich die Gesamtbelastung (Fig. 11). Bei den modernen Ausführungen der Medosen ist die Genauigkeit der Anzeige kaum geringer als bei guten Laufgewichtswagen. Im allgemeinen braucht für die Benutzung der Kraftmesser nur darauf hingewiesen zu werden, daß die Belastung auf Grund einer von Zeit zu Zeit zu kontrollierenden Eichkurve bestimmt werden soll und nicht nach den auf den Apparaten selbst an-

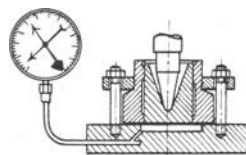


Fig. 11. Schema einer Meßdose.

gegebenen Belastungsanzeigen. Dies gilt besonders bei der Verwendung von Manometern, auf denen deshalb eine einfache Gradeinteilung der Einteilung nach Kilogramm vorzuziehen ist. Ebenso wichtig ist es, die Genauigkeit der Zerreißmaschine selber zu kontrollieren, da durch die Abnutzung und verschiedene äußere Einflüsse die Empfindlichkeit der Maschine stark beeinflußt wird. Zur Eichung

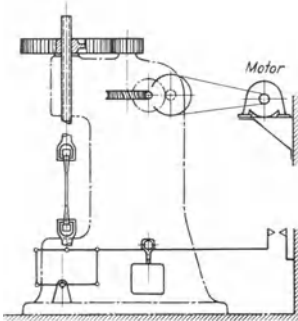


Fig. 12. Schema einer Zerreißmaschine mit mechanischem Antrieb und Laufgewichtswage.

benutzt man besondere Eichstbe, die die Form großer Proportionalstbe haben und die bei der Höchstbelastung der Maschine nicht über ihre Elastizitäts-grenze beansprucht werden. Die tatsächliche Belastung wird aus der Dehnung dieser Stäbe und den dazugehörigen Eichkurven bestimmt. Einfacher ist die Eichung mit elastischen Kraftmessern, bei denen entweder die Deformation zweier gebogener geeichter Federn durch Meßuhren angezeigt und aus der Größe der Deformation die Belastung bestimmt wird, oder bei denen der Druck auf in einem Hohlgef eingeschlossenes Quecksilber übertragen und durch genaue Manometer bestimmt wird.

Kraftbestimmung durch Laufgewichtswage. Für die Untersuchung langer Probe-stäbe, bzw. Seile, Ketten usw., sind Maschinen mit wagerechter Anordnung der Krafrichtung der leichteren Zugänglichkeit wegen vorzuziehen. In ihrer Wirkungs-

Fig. 12 zeigt als Beispiel die Wirkungsweise einer Zerreißmaschine mit mechanischem Antrieb und mit

weise unterscheiden sich diese Maschinen jedoch nicht von den senkrechten Zerreimaschinen. Bei kleinen Stäben oder Werkstoffen geringer Festigkeit, wie Papier, Gewebe usw., sind als Kraftmesser Pendelgewichte üblich. Die Belastung ergibt sich hierbei aus dem Ausschlage des Pendels, mit dem der wirksame Hebelarm des Gewichtes sich vergrößert.

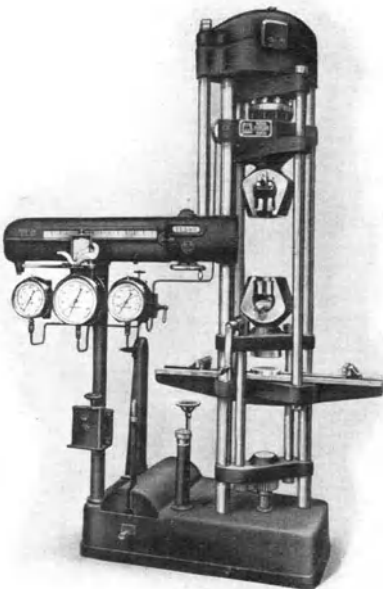


Fig. 13. Universalprüfmaschine (Losenhausen).

Wie später erwähnt ist, kann fast jede Zerreißmaschine mit Hilfe leicht einzubauender Vorrichtungen zu Druck- und Biegeprfungen verwandt werden. Viele moderne Zerreimaschinen besitzen bereits derartige Einrichtungen fest eingebaut. Eine solche Universalprüfmaschine für Zug, Druck und Biegung zeigt Fig. 13.

Maschine und der Einspannvorrichtung sowie die Formänderung der Probe außerhalb der Meblnge enthalten sind. Während die Zugfestigkeit unabhängig von der Dehnung aus der Höchstbelastung bestimmt wird, muß zur Bestimmung

Besondere Beachtung erfordert beim Zerreißversuch die Bestimmung der Dehnung. Die mittlere Gesamtdehnung kann nach dem Versuch an dem gebrochenen Stabe bestimmt werden, wie bereits auf S. 6 angegeben wurde. Sie ist aber nicht aus dem von der Maschine aufgezeichneten Diagramm zu entnehmen, da hierin gewöhnlich das Spiel der

der Elastizitäts-, Proportionalitäts- und Streckgrenze die Dehnung während des Versuches beobachtet werden. In der Praxis ist besonders die Streckgrenze erwünscht, die nur bei wenigen Werkstoffen deutlich im Diagramm erkennbar ist.

Die für die Streckgrenze durch die Norm vorgeschriebene bleibende Dehnung von 0,2% beträgt beim langen Normalstab  $200 \times 0,2/100 = 0,4$  mm und beim kurzen Normalstab nur  $100 \times 0,2/100 = 0,2$  mm. Für die Bestimmung der Elastizitätsgrenze müssen sogar Längenänderungen von nur 0,002 : 0,05 mm bzw. 0,001 : 0,025 mm beobachtet werden. Die Bestimmung dieser geringen Längenänderungen erfordert besondere Feinmeßinstrumente.

Als solche können bei genügender Länge der Probestäbe Meßuhren mit  $1/100$  oder  $1/1000$  mm Teilung verwandt werden. Gebräuchlicher und im allgemeinen genauer sind jedoch Meßeinrichtungen, wie sie in Fig. 14 und 15 schematisch dargestellt sind. Beim

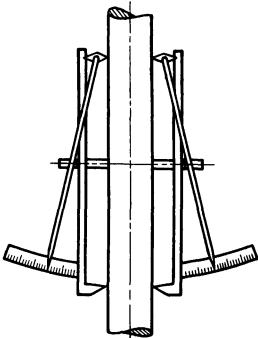


Fig. 14. Dehnungsmeßinstrument von Martens-Kennedy.

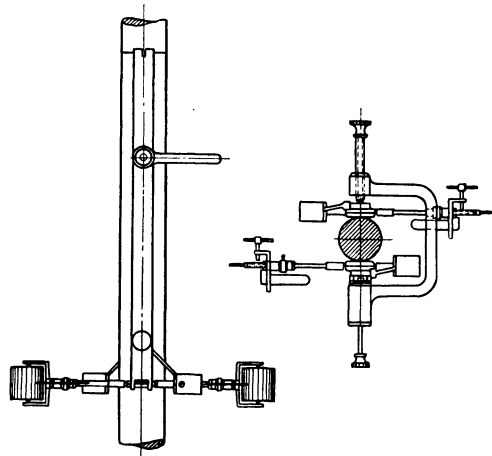


Fig. 15. Martenssche Spiegel am Zerreißstab.

Apparat von Martens-Kennedy, Fig. 14, wird die Drehung zweier Prismen durch lange Zeiger auf Skalen angezeigt. Die Drehung entsteht dadurch, daß der Probestab sich bei der Belastung verlängert und den Auflagepunkt des Prismas gegen den an den Federn, die gleiche Länge behalten, verschiebt. Die Federlänge entspricht der normalen Meßlänge. Bekanntter und noch genauer ist die Dehnungsbestimmung mit dem Martensschen Spiegel, bei dem die Drehung der Prismen, die ebenfalls zwischen je einer Feder und dem Zerreißstab eingeklemmt sind, durch je ein Fernrohr beobachtet wird. Zu diesem Zweck sitzen auf den Achsen der Prismen je ein Spiegel, in denen durch Fernrohre in größerer Entfernung aufgestellte Maßstäbe beobachtet werden. Durch die Anwendung der Spiegel ist es einmal ermöglicht, die Länge der Zeiger des Martens-Kennedyschen Apparates, die hier durch den Lichtstrahl gebildet werden, beliebig zu vergrößern, und zweitens wird durch die Reflexion im Spiegel der Ausschlag stets verdoppelt (vgl. Fig. 16). Die zahlreichen modernen Dehnungsmeßinstrumente beruhen größtenteils auf dem Grundsatz dieser beiden Apparate.

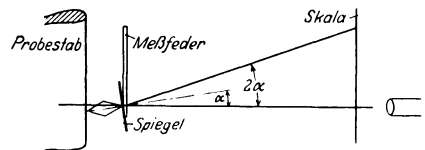


Fig. 16. Wirkungsweise des Martensschen Spiegels.

Durch die Anwendung der Spiegel ist es einmal ermöglicht, die Länge der Zeiger des Martens-Kennedyschen Apparates, die hier durch den Lichtstrahl gebildet werden, beliebig zu vergrößern, und zweitens wird durch die Reflexion im Spiegel der Ausschlag stets verdoppelt (vgl. Fig. 16). Die zahlreichen modernen Dehnungsmeßinstrumente beruhen größtenteils auf dem Grundsatz dieser beiden Apparate.

Bei vielen Baustoffen ist es wichtig, die Festigkeit bei höheren oder niederen Temperaturen zu bestimmen, wie z. B. bei Dampfkesselblechen oder Transformatormaterialien. Für derartige Untersuchungen umgibt man den Probestab mit

Behältern mit Flüssigkeit oder Luft, die entweder elektrisch oder durch Gas geheizt, oder durch Kältemischungen oder verflüssigte Kohlensäure gekühlt werden.

**Die praktische Bedeutung des Zugversuches** beruht auf der Möglichkeit, aus den Ergebnissen des Versuches die für die spätere Verwendung der Werkstoffe maßgebenden Eigenschaften zu beurteilen.

Früher rechnete der Konstrukteur allgemein bei den verschiedensten Beanspruchungen der Baustoffe mit einer zulässigen Zugspannung  $k_z$ , die einen Bruchteil der Zugfestigkeit des Materials darstellte, und noch heute richten sich die Angaben über zulässige Spannungen ( $k_z$ ) in behördlichen Vorschriften nach der Zugfestigkeit  $\sigma_B$  oder, wie die alte Bezeichnung hieß, nach  $K_z$ . Eine zehnfache Sicherheit bedeutete also  $k_z = 1/10 K_z$ . Für die verschiedenen Beanspruchungsarten, ruhende, schwellende und wechselnde Beanspruchung, für Biegungs- oder Schubbeanspruchungen begnügte man sich damit, bestimmte Bruchteile von  $k_z$  der Berechnung zugrunde zu legen. Heute, in der Zeit des scharfen wirtschaftlichen und technischen Wettbewerbs, ist diese Berechnungsart jedoch als höchst unwirtschaftlich und unsicher zu verwerfen, da sie die tatsächlich zulässigen Spannungen des Werkstoffes in keiner Weise berücksichtigt. Denn beim Bau einer Maschine ist die Spannung, bei der ein Baustoff zu Bruch geht, ein höchst gleichgültiger Faktor. Der Konstrukteur muß vielmehr wissen, wann ein Werkstück den Beanspruchungen im Betriebe nicht mehr genügt, und das ist bereits bei einer Spannung, bei der der Werkstoff unzulässig stark oder bleibend seine Form verändert.

Wie gering die zulässigen Formänderungen im heutigen Maschinenbau sind und sein dürfen, ergibt sich ohne weitere Worte aus der Zwangsläufigkeit unserer heutigen, besonders der schnellaufenden Maschinen. Der Konstrukteur muß also einen Anhalt haben, bei welcher Spannung diese Formänderungen eintreten. Da nun die Bestimmung der Elastizitätsgrenze von den verwendeten Meßinstrumenten abhängt, so daß es heute noch gar nicht einmal feststeht, welche Stoffe überhaupt eine Elastizitätsgrenze besitzen, bleibt dem Konstrukteur als Grundlage für seine Berechnungen nur die Streckgrenze. Ein weiterer Übelstand für die Bewertung eines Baustoffes nach der Elastizitätsgrenze läge darin, daß sich diese sowohl bei vorübergehenden Beanspruchungen wie auch beim Lagern infolge innerer Spannungen, beim sog. Altern bedeutend verschiebt (beim Eisen z. B. zwischen 2 und 20 kg/mm<sup>2</sup>). Es geht hieraus hervor, daß die Elastizitätsgrenze infolgedessen nicht einmal für die Abnahme eines Baustoffes brauchbar wäre. Einwandfreier ist in mancher Hinsicht die Berechnung unter Berücksichtigung der Streckgrenze, wenn diese in einem wirklich elastischen Material tatsächlich typisch in Erscheinung tritt. Dies ist aber, wie erwähnt, fast nur beim Eisen der Fall. Während nun dem Konstrukteur bei der Bewertung der Werkstoffe allein nach der Elastizitätsgrenze Stoffe wie Glas und Steine statt zäher Werkstoffe geliefert werden könnten, könnte sich bei der Bewertung allein nach der Fließgrenze seine Konstruktion allmählich völlig deformieren, da der Baustoff eine sehr niedrige Elastizitätsgrenze besitzen kann. Es gibt eben für die Bewertung eines Baustoffes keine einfache oder konstante Formel, besonders nicht für den Konstrukteur, sondern es sind immer eine Reihe von Festigkeitsdaten zu berücksichtigen, die je nach dem Verwendungszweck verschieden hoch bewertet werden müssen.

Für den Konstrukteur bietet jedoch immerhin die Streckgrenze einen bedeutend besseren Anhalt für die zulässige Beanspruchung als die frühere Beurteilung nach der Zugfestigkeit. Welche Verschiebungen der Festigkeitsdaten hierdurch eintreten, zeigt Fig. 17, die die Zerreißdiagramme dreier Stähle mit



gleicher Zugfestigkeit und ungefähr gleicher Dehnung wiedergibt, bei denen aber die Streckgrenzen verschieden hoch liegen. Bei einer Berechnung nach dem alten Verfahren würde also ein Konstruktionsteil aus jedem der drei Materialien bei der gleichen Beanspruchung dieselben Abmessungen erhalten. Die teuren legierten Stähle würden also gegenüber dem Kohlenstoffstahl auf jeden Fall die Konstruktion verteuern, ohne weitere Vorteile zu bieten. Berücksichtigt man jedoch bei der Konstruktion die Streckgrenze, so ergibt sich, daß dem Werkstück aus Manganstahl eine höhere Spannung als dem aus Kohlenstoffstahl und dem Werkstück aus Chromnickelstahl eine noch höhere Spannung als den beiden vorigen zugemutet werden kann. Aus der Lage der verschiedenen Streckgrenzen ergibt sich, daß bei gleicher Sicherheit in bezug auf das Überschreiten der Streckgrenze das Werkstück aus Kohlenstoffstahl um 31% größer sein müßte als das aus Manganstahl, und um 50% größer als das aus Chromnickelstahl. Bei einer Kalkulation der Preise müßte ferner noch die sich hieraus ergebende Gewichtsverringerng anderer Konstruktionsteile infolge der kleineren Beanspruchung durch das geringere Gewicht des betreffenden Werkstücks berücksichtigt werden. Dieser Vorteil kommt besonders bei schnellaufenden Maschinen mit hoher Beanspruchung zur Geltung. Ein weiterer Grund für die Berechnung von Werkstücken nach der Streckgrenze ergibt sich aus Fig. 18 und 19. Fig. 18 zeigt die Zerreißdiagramme

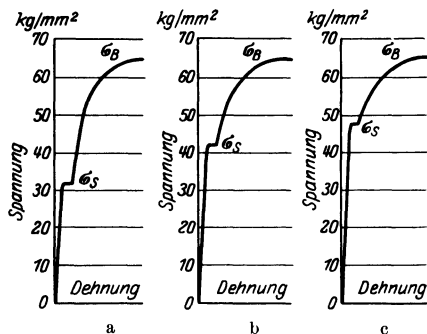


Fig. 17. Zerreißdiagramme von Kohlenstoffstahl (a), Manganstahl (b) und Chromnickelstahl (c).

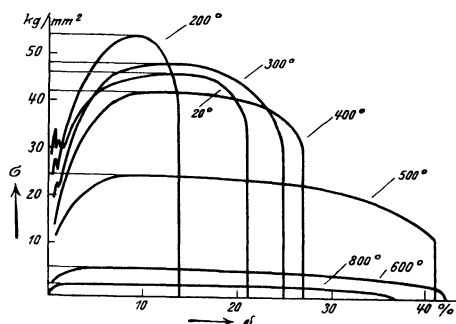


Fig. 18. Zerreißdiagramm von Stahl bei verschiedenen Temperaturen.

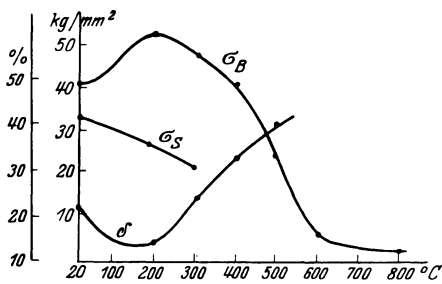


Fig. 19. Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze von Stahl bei verschiedenen Temperaturen.

eines normalen Konstruktionsstahles bei verschiedenen Temperaturen, und Fig. 19 eine Zusammenstellung der sich hieraus ergebenden Werte der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung. Der Stahl, der bei Zimmertemperatur eine Zugfestigkeit von 45 kg/mm² besitzt, ergibt eine Zugfestigkeit von 53 kg/mm² beim Zugversuch bei 200°, und selbst bei 300° noch immer eine höhere Zugfestigkeit als bei Zimmertemperatur. Für den Konstrukteur nach dem alten Verfahren ergibt sich hieraus die Schlußfolgerung, daß er Stähle, die bei 200 : 300° beansprucht werden, höhere Belastungen zumuten dürfte als bei Zimmertemperatur. Betrachtet man jedoch die Streckgrenze, so ergibt sich, daß diese bei diesen Temperaturen bereits beträchtlich gesunken ist. Der nach der alten Berechnungsart konstruierte Maschinenteil würde also der Gefahr starker Deformation ausgesetzt sein.

Ebenso muß die Veränderung der Eigenschaften durch Vergüten, Warmrecken, Kaltrecken usw. hauptsächlich nach der Verschiebung der Streckgrenze beurteilt werden.

Die Dehnung ist früher bei der Bewertung der Baustoffe vom Konstrukteur gewöhnlich weit überschätzt. Die Bruchdehnung, die sich aus dem Zerreißversuch ergibt, hat für den Konstrukteur lediglich den Wert eines Sicherheitsfaktors. Bei einem Werkstoff mit großer Dehnung kann durch die dem Bruch vorhergehende Formveränderung unter Umständen eine Spannungsverschiebung eintreten, durch die der Bruch verhindert werden kann, oder es kann dadurch die Deformation rechtzeitig bemerkt werden. Bei der Auswahl würde der Konstrukteur jedoch auf jeden Fall Baustoffe mit hoher Streckgrenze denen mit niedriger Streckgrenze und großer Dehnung vorziehen müssen. Besonders bei dynamischen Beanspruchungen sind dehnbare Baustoffe gewöhnlich nicht so widerstandsfähig. Bei Einkerbungen im Werkstück tritt bei diesen leicht ein Überschreiten der Fließgrenze im Kerbgrunde ein, während bei festeren Werkstoffen eine Verfestigung stattfindet. Die Größe der Bruchdehnung gibt dem Konstrukteur auch keinen Wert, aus dem er die Längung eines Werkstückes bis zum Bruch berechnen könnte. Denn, wie vorher besprochen, ist die Bruchdehnung lediglich ein Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Probestabteile, so daß die Bruchdehnung also auch nur für die Meßlänge, bei der sie festgestellt wurde, gilt und nicht allgemein proportional der Länge ist. Ebenso gibt diese Größe dem Betriebstechniker nur schlechte Anhaltswerte über die Verarbeitungsmöglichkeiten des Materials, wie beim Ziehen, Drücken usw.

Schließlich bedarf es nun der weiteren Erwägung, für welche Beanspruchungen die Werte des Zerreißversuches Geltung haben. In der Einführung war bereits darauf hingewiesen, daß beim Zerreißversuch der Stab nicht genau einer ruhenden Belastung unterworfen wird, sondern die Formänderung bei langsam steigender Last beobachtet wird, und daß die Einstellung des Gleichgewichtszustandes im Material bei den Belastungen Zeit erfordert. Bach fand nun bereits, daß sich bei kleineren Versuchsgeschwindigkeiten, also größeren Versuchsdauern die Zugfestigkeit des Stahls verringerte, wie Tabelle 3 zeigt:

Tabelle 3. Einfluß der Zerreidauer.  
Stahl A.

Stahl A.				Stahl B.			
Zerreidauer	19 sek	150 sek	22 min	Zerreidauer	17 sek	150 sek	23 min
$\sigma_B$	40,0	39,3	38,6 kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_B$	56,2	55,1	53,4 kg/mm <sup>2</sup>
$\delta$	?	30,8	32,5 %	$\delta$	?	25,5	26,9 %

Dieselbe Verschiebung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Versuchsgeschwindigkeit tritt beim Zink auf, das eine Zugfestigkeit von 23,2 kg/mm<sup>2</sup> ergab, wenn der Probestab in 7 sek zerrissen wurde, dagegen eine Zugfestigkeit von 20,7 kg/mm<sup>2</sup>, wenn der Stab langsam in 9 min zerrissen wurde. Fig. 20 zeigt die Zerreißdiagramme von Zink mit verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten nach Martens, die bei abnehmender Versuchsgeschwindigkeit kleinere Festigkeit und größere Dehnung zeigen.

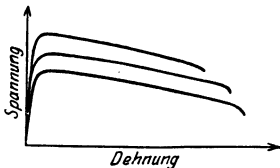


Fig. 20. Zerreißdiagramme von Zink bei verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten (Martens).

Aus diesen Beispielen ergibt sich, daß der Zerreißversuch nicht einmal für alle Belastungsfälle mit steigender Spannung einwandfreie Daten liefert. Noch wichtiger aber ist die Verschiebung der Festigkeitswerte bei wirklich ruhender Last. Hier haben neuere Untersuchungen von Welter über das Verhalten der

Metalle bei Dauerbelastungen interessante Resultate ergeben, die in Tabelle 4 zusammengestellt sind:

Tabelle 4. Statische Dauerfestigkeit.

	$\sigma_{\mathcal{E}}$ 0,001% kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\mathcal{B}}$ 0,02% kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{str.}$ 0,2% kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_B$ — kg/mm <sup>2</sup>	$\delta$ — %	Dauerversuch	
						Spannung kg/mm <sup>2</sup>	Bruch
Messing 56,9 Cu, 1,74 Pb . . . . .	7,5	11,5	15,5	45	37	{ 40 35,30 20,10	{ 8 Tage —*
Messing 56,3 Cu, 1,82 Pb . . . . .	16,5	24	36,5	51,5	14	{ 40 35,30 25 16	{ 1 Tag 25 Tage 45 Tage 110 Tage
Cu (rein) . . . . .	9	17,8	31,3	31,4	7,5	{ 30 25 25,15	{ 0 min 9 Mon. —*
Al hart . . . . .	5,5	8,5	9,5	11,5	11,5	{ 10 8 6,4	{ 3 Tage 8 Mon. —*
Härtb. Al-Legierung, Type Dural. 17 ÷ 18	20	26	44	16	{ 40 35,30	{ 26 st —*	
Härtb. Al-Legierung, Type Skleron 19 ÷ 20	26	35	48	13	{ 40 35 30	{ —*	
Stahl gewalzt 0,10,15% C . . . . .	32	32	32	44,3	37,0	{ 35 30	{ —*
Stahl gezogen 0,3% C . . . . .	42	55	60	72	10	{ 60 40	{ —*

\* Nach 12 Monaten noch nicht gebrochen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, daß selbst die Streckgrenze nur bei Stahl wirklich als Belastungsgrenze bei Dauerbelastungen angesehen werden kann, während sie bei Nichteisenmetallen keine Gewähr für die Bruchsicherheit des Werkstückes bietet. Dies ist um so beachtenswerter, als die Nichteisenmetalle in der modernen Technik ein immer größeres Anwendungsgebiet finden. Der Konstrukteur muß also bei diesen Werkstoffen auch bei der Berechnung nach der Streckgrenze noch mit sehr großen Sicherheitsfaktoren rechnen. Über die Verschiebung der Streckgrenze bei der Veränderung der Versuchsgeschwindigkeit liegen heute noch wenige Versuchsergebnisse vor.

Trotz der ihm anhaftenden Mängel behält aber der Zugversuch für die Abnahmeprüfung der meisten Werkstoffe den Hauptwert. Es muß nur für die Festsetzung der zulässigen Abweichungen ein Verständnis für die Materialeigenschaften gefordert werden. So sollte z. B. ein Stahl mit einer vorgeschriebenen Festigkeit von 50 ÷ 60 kg/mm<sup>2</sup> und 18%  $\delta_{10}$  nicht zurückgewiesen werden, wenn der Zerreißversuch 61 kg/mm<sup>2</sup> und 18,5%  $\delta_{10}$  ergibt, oder wenn die Prüfung 58 kg/mm<sup>2</sup> und 17,5%  $\delta_{10}$  ergibt. Es müßte dann z. B. hinzukommen, daß der Schwefel- und Phosphorgehalt 0,13% überstiege.

#### b) Der Druckversuch.

Der Druckversuch besitzt für die Untersuchung von Metallen nur geringe Bedeutung. Man prüft auf diese Weise höchstens Werkstoffe, die sich praktisch nur auf Druck beanspruchen lassen, wie z. B. Gußeisen und Lagermetalle. Die Hauptanwendungen dieses Prüfverfahrens liegen in der Untersuchung von Baumaterialien, wie Ziegeln, Beton usw.

Der Versuch leidet darunter, daß man die äußeren Einflüsse der Versuchsanordnung auf das Verhalten der Proben nicht so gut ausschalten kann wie beim Zugversuch. Es beeinflusst die Reibung zwischen Probe und den Auflagen bereits die Formänderung. Das Versuchsergebnis hängt schon davon ab, ob das Material der Auflage weich oder hart, rauh oder glatt, trocken oder geschmiert ist.

Der Verlauf des Spannungs-Stauchungs-Diagramms entspricht bei Metallen im allgemeinen dem Verlauf des Zerreißdiagramms. Man beobachtet auch hier eine Proportionalitäts- und Fließgrenze, die mit Quetschgrenze bezeichnet wird. Die höchste Druckbelastung läßt sich aber nur bei spröden Werkstoffen feststellen, da weichere bis zur Plattenform gequetscht werden und weitere Formänderungen schließlich unendliche Belastungen erfordern.

Bei Werkstoffen, die dem Hookschen Gesetz der Proportionalität zwischen Spannung und Formänderung folgen, entspricht der erste Teil des Bruchdiagramms der Verlängerung des ersten Teils des Zerreißdiagramms. Daraus ergibt sich, daß die Proportionalitätsgrenze im Zerreißdiagramm mit der Proportionalitätsgrenze im Druckdiagramm durch eine gerade Linie verbunden ist (vgl. Fig. 21). Bei dar-

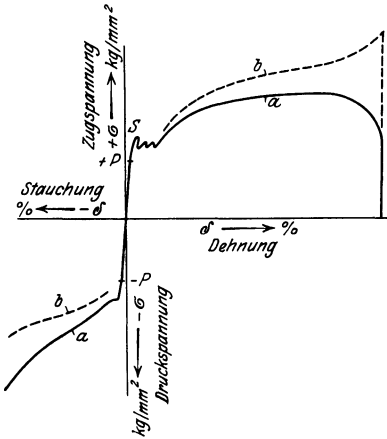


Fig. 21. Diagramme beim Zug- und Druckversuche (a = praktisches Diagramm, b = reduziertes Diagramm).

über steigendem Druck verläuft das Diagramm ebenfalls so, daß die Formänderung verhältnismäßig stärker wächst als die Belastung.

Wie beim Zerreißversuch wird auch hier aus dem Belastungs-Verkürzungs-Diagramm durch Umrechnung das Spannungs-Stauchungs-Diagramm entwickelt. Man kann hierbei die Spannung ebenfalls wieder auf den Ausgangsquerschnitt oder auf den jeweils vorhandenen Querschnitt beziehen. Im ersteren Falle würden nur die Maßstäbe des Diagramms verändert, im zweiten Falle würde sich hier eine geringere Spannung ergeben, da bei der Belastung ein Zusammenstauchen und demgemäß eine Vergrößerung des Querschnittes eintritt.

Als Normalform ist beim Druckversuch der Würfel und der Zylinder üblich. Letztere Form hat bei der Prüfung von Metallen den Vorzug der leichteren Herstellbarkeit. Bei homogenen Werkstoffen wird das Ergebnis des Druckversuches durch die Kantenlänge des Würfels nicht beeinflusst.



Fig. 22. Druckprobe aus Schweißbleisen, metroskopisch geätzt.

Damit aber Würfel und Zylinder vergleichbare Werte ergeben, müssen beim Zylinder Höhe und Durchmesser im Verhältnis  $h:\sqrt{F} = 1$  (d. h.  $h = 0,88d$ ) zueinanderstehen. Wird die Höhe im Verhältnis zum Durchmesser größer, so wird der Verlauf des Diagramms flacher, d. h. die Spannungen für dieselben Formänderungen werden kleiner. Bei sehr langen Proben ergeben sich sogar sehr

ungenauere Werte, zumal dann die Gefahr des Ausknickens der Proben besteht.

Die Verformung bei der Druckbeanspruchung wird gut durch durchgeschnittene Probekörper aus plastischem Material, wie Blei oder Wachs, die geschichtet und durch Färbung gekennzeichnet sind, oder durch Ätzung einer Probe, veranschaulicht. Fig. 22 zeigt eine geätzte Schweißisenprobe. An dem Verlauf der Seigerungslinien ist deutlich zu erkennen, daß sich über den beiden belasteten Flächen Kegel gebildet haben, die nahezu keine Verformung zeigen, während das um sie herumliegende Material herausgedrückt wird. Es tritt also auch hier dieselbe Erscheinung wie beim Zerreißversuch auf, daß sich durch die Beanspruchung drei bestimmte Zonen bilden, zwei Kegel und ein Ringkörper.

Hieraus ergibt sich, daß die beim Druckversuch am deutlichsten wahrnehmbare Erscheinung nicht allein auf die Reibung des Werkstoffes an den Druckflächen,

wodurch die Bewegung des Materials an diesen Stellen verhindert wird, zurückzuführen ist, sondern daß sie mit der Wirkung der Spannungen und dem Aufbau des Werkstoffes zusammenhängt. Es findet diese Erklärung jedoch nicht

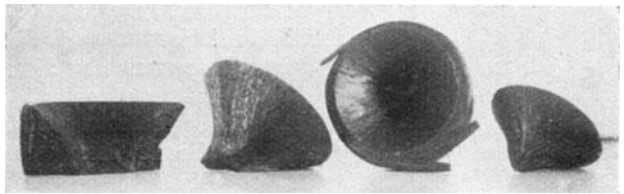


Fig. 23. Zerdrückte Messingproben.

allseitig Anerkennung. Die Bildung von Kegeln bzw. Pyramiden ist auch hier gewöhnlich im Bruchaussehen erkennbar. So zeigt Fig. 23 Teile von zerdrückten Messingzylindern. Normalerweise äußert sich jedoch die Kegelbildung innerhalb des Werkstoffes lediglich durch einen schrägen Verlauf der Bruchfläche, der dadurch zu erklären ist, daß die beiden Kegel aneinander vorbeigleiten konnten (Fig. 24). Bei mittelharten und weichen Werkstoffen erreicht man gewöhnlich nur Risse in der Oberfläche, da sie, wie schon erwähnt, sich vollkommen zusammendrücken lassen und dabei nur die Bruchdehnung der Außenfasern überschritten wird. Bei spröden Werkstoffen dagegen zerspringt der Probekörper in unregelmäßige Teile.

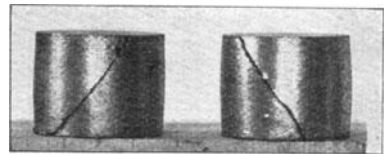


Fig. 24. Zerdrückte Guisenproben.

Der Druckversuch kann entweder auf der Zerreißmaschine oder auf besonderen Pressen durchgeführt werden. Bei einfachen Zerreimaschinen ist hierzu lediglich der Einbau einer einfachen Vorrichtung nötig. In den Universalprüfmaschinen (vgl. Fig. 13) ist diese Vorrichtung bereits getrennt von der Einspannvorrichtung für den Zerreißversuch vorhanden.

### c) Der Biegeversuch.

Die Biegeprobe wird nur selten als wissenschaftlicher Versuch durchgeführt. Bei praktischen Untersuchungen beschränkt man sich meistens auf technologische Prüfungen dieser Art. Der Biegeversuch kann nach verschiedenen Verfahren durchgeführt werden, die sich durch die Art der Krafrichtung zu den Auflageflächen unterscheiden. Zur Feststellung der Spannung und Formänderung bedarf es dann einer Umrechnung, deren Ergebnis aber stark von den einzelnen Faktoren des Versuches abhängt, die nur schwer voll zu erfassen sind.

Das Charakteristische des Biegeversuches gegenüber dem Zug und dem Druckversuch ist das gleichzeitige Auftreten von Zug- und Druckspannungen in der

Probe, und dementsprechend gleichzeitiges Eintreten zweier verschiedener Formänderungen. Hierin liegt auch begründet, daß der Biegeversuch sich wenig zu genauen wissenschaftlichen Untersuchungen eignet, da bei diesen mit Rücksicht auf die Dimension des Ergebnisses einfache Spannungen erwünscht sind. In der

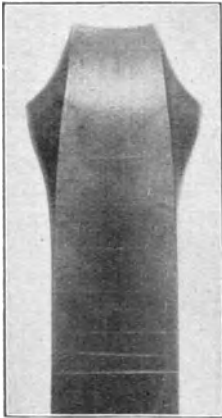


Fig. 25. Biegeprobe (Flußstahl).

Biegeprobe werden die nach außen gebogenen Fasern auf Zug beansprucht und gelängt, die anderen werden gedrückt und gestaucht, wie dies aus der Deformation der Biegeprobe zu erkennen ist (Fig. 25). Wenn das Probematerial für Zug und Druck die gleichen Abhängigkeiten zwischen Formänderung und Spannung besitzt, d. h. die Zug- und Druckdiagramme sich nach Drehung um  $180^\circ$  decken, werden die Zug- und Druckzonen der Probe gleich groß sein, und die neutrale Zone, die keine Spannung und Formänderung erfährt, in der Mitte liegen, wie dies in Fig. 26 schematisch dargestellt ist. Bei diesen Werkstoffen liegt auch die Streckgrenze beim Biegeversuch bei gleicher Spannung wie beim Zug- und Druckversuch. Bei blanken Proben sind auch hier Fließlinien zu erkennen.

Am gebräuchlichsten und wertvollsten ist der Biegeversuch für die Prüfung von Gußeisen. Hier liefert der Zugversuch bekanntlich niedrigere Festigkeitswerte als der Druckversuch, dessen Werte aber, wie im vorigen Abschnitt gesagt ist, oft sehr ungenau sind. Beim Zugversuch läßt sich ferner die geringe Dehnung nicht feststellen. Die Biegeprüfung ergibt nun einen Mittelwert als Festigkeitszahl, und aus der Durchbiegung des Probestabes im Augenblick des Bruches kann auf die Zähigkeit des Gußeisens geschlossen werden.

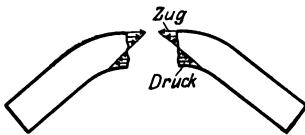


Fig. 26. Spannungsverteilung in einer Biegeprobe.

Für die Gußeisenbiegeprobe sind Stäbe mit 30 mm Durchmesser und 650 mm Länge vorgeschrieben. Die Stäbe werden direkt am Gußstück angegossen und mit Gußhaut untersucht. Es ist dies ein weiterer Vorteil gegen den Zugversuch, bei dem für genaue Unter-

suchungen geschliffene Probestäbe nötig sind. Bei der Biegeprüfung wird der Stab auf zwei Rollen mit einer Stützweite von 600 mm gelegt und durch eine in der Mitte wirkende Kraft  $P$  belastet. Die Bruchspannung wird nach

der Formel  $\sigma = \frac{P \cdot l}{4W}$  berechnet, worin  $W$  das Widerstandsmoment der Probe

bedeutet. Für die angegebenen Zahlenwerte der Normalprobe ergibt sich dann  $\sigma_B = 5,66 P \cdot 10^{-2}$  (kg/mm<sup>2</sup>). Die Durchbiegung bestimmt man am genauesten durch Beobachtung der Stabpunkte über den Stützpunkten und des Stabpunktes unter dem Angriffspunkt der Kraft mit Hilfe von Fernrohren. Die Berücksichtigung der drei Punkte ist bei genauen Untersuchungen nötig, um die Formänderungen an den Auflagestellen auszuschalten. Bei praktischen Versuchen kann dies jedoch vernachlässigt werden, und die Durchbiegung der Stabmitte mit einem guten mechanischen Meßgerät, z. B. einer Meßuhr, bestimmt werden.

Die Biegeprobe kann ebenfalls auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt werden, wie es aus Fig. 13 hervorgeht. Andernfalls kann eine einfache Zerreißmaschine durch Einbau einer einfachen Vorrichtung hierzu eingerichtet werden. Ferner gibt es besonders für die Biegeprüfung konstruierte Maschinen, die schon mit Meßvorrichtung versehen sind.

## d) Die Härteprüfung.

Das älteste Verfahren, das in der Mineralogie angewandt wird, ist die Einreihung des zu untersuchenden Materials in die Mohr'sche Härteskala. Diese enthält zehn Stufen, die durch die Härte zehn bestimmter Mineralien festgelegt sind.

1. Talk	} mit dem Finger-	7. Quarz	} ritzen Glas
2. Steinsalz oder Gips		nagel ritzbar	
3. Kalkspat	} Fensterglas-Härte 5,5	9. Korund	
4. Flußspat		10. Diamant	
5. Apatit			
6. Feldspat			

Um die Härte eines Stoffes anzugeben, ermittelt man das weichste Mineral, das auf der Oberfläche der Probe einen deutlich sichtbaren Riß erzeugte. Die Härte liegt dann zwischen der Härte dieses Minerals und des nächst weicheren.

Bei der Prüfung von Metallen versteht man unter Härte den Widerstand, den es dem Eindringen eines zweiten Körpers entgegensetzt. Hieraus ergibt sich aber für die Untersuchung dieser Eigenschaft noch keine bestimmte Festlegung der Prüfung, da sie mit keiner Dimension verbunden werden kann. Denn aus der Form des eindringenden Körpers und der Form der Probe selber ergeben sich sehr viele Möglichkeiten, den Widerstand des Werkstoffes beim Eindringen eines anderen zu prüfen, und es ist immer schwierig, die Werte der Untersuchungen auf eine allgemein anerkannte Einheit zurückzuführen. Bis vor kurzem hatten sich von den verschiedenen Prüfungsmethoden die Kugeldruckhärte von Brinell als statisches Verfahren und die Rücksprunghärte von Shore als die einzigen Methoden im Materialprüfungswesen durchgesetzt. In neuerer Zeit gewinnen daneben dynamische Verfahren zur Bestimmung der Fallhärte und die Bestimmung der Pendelhärte immer mehr Einfluß. Im folgenden kann nur eine kurze Übersicht über die gebräuchlichen Verfahren und ihre Bedeutung gegeben werden.

Bei der Bestimmung der Brinellhärte, die durch die DIN-Norm 1605 für die Abnahmeprüfungen genau festgelegt ist, wird eine Kugel von bestimmtem Durchmesser mit allmählich bis zu einer gewissen Höhe anwachsender Last in das zu untersuchende Probestück gedrückt. Als Kugeldurchmesser werden 2,5, 5 und 10 mm verwendet. Der Durchmesser richtet sich nach der jeweiligen Stärke des Probestückes und der vorgesehenen Belastung.

Die Probe wird an der zu untersuchenden Stelle geschliffen und leicht poliert, damit der Eindruck später gut beobachtet werden kann. Für die Bestimmung der Härte wird entweder der Durchmesser oder die Tiefe des Eindrucks gemessen. Man verwendet hierzu je nach der gewünschten Genauigkeit Anlegemaßstäbe mit Lupen, Mikrometerschrauben mit Lupen oder Mikroskope mit dem Maßstab im Gesichtsfeld. Aus der bestimmten Größe und dem Durchmesser der gebrauchten Kugel läßt sich dann die Größe der Oberfläche der Kalotte des Eindrucks berechnen. Die Bestimmung der Eindruckstiefe leidet bei Messung nach der Belastung darunter, daß der Wulst um den Eindruck, der bei großen Lasten im Verhältnis zur Härte des Stückes sehr stark auftritt, mit gemessen wird. Ferner ist der Einfluß der Meßfehler infolge der kleinen Größe ungünstiger als bei der Bestimmung des Durchmessers des Eindrucks, die durch die Norm vorgeschrieben ist.

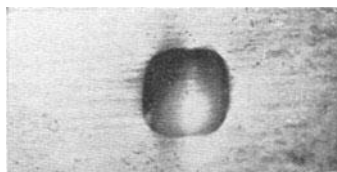


Fig. 27. Unrunder Kugeleindruck.

Diese Bestimmung wird dadurch beeinträchtigt, daß die Eindrücke bei kristallinem Aufbau des Probekörpers selten genau rund sind, sondern sich entsprechend der Kristallreckung verziehen, wie dies aus Fig. 27 zu ersehen ist. Um genaue Ergeb-

nisse zu erhalten, ist man deshalb gezwungen, mindestens zwei Diagonalen des Eindrucks zu messen und für die Berechnung dann den Mittelwert zugrunde zu legen. Nach Fig. 28 ergeben sich die Oberfläche der Kalotte  $O_{\text{Kal}}$  und die Brinellhärte  $H_B$  aus dem bekannten Kugeldurchmesser  $D$  und dem Durchmesser des Eindrucks  $d$  wie folgt:

$$O_{\text{Kal}} = \pi D \cdot h, \quad \text{wobei} \quad h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$O_{\text{Kal}} = \pi \cdot \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$H_B = \frac{P}{O_{\text{Kal}}} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Bei dieser genormten Bestimmung des Kugeleindrucks sowie bei der Berechnung aus der Eindrucktiefe bleibt unberücksichtigt die Abplattung der Kalotte infolge der elastischen Formänderungen der Kugel und des zu untersuchenden Werkstoffes, wozu bei harten Probenmaterialien noch die bleibende Formänderung der Kugel hinzukommt.

Der bisher erwähnten Wulstbildung bei weichen Stoffen, wie Lagermetallen, steht das Hineinziehen des Materials um den Eindruck herum bei zähen Materialien wie Stahl gegenüber, das zu entgegengesetzten Fehlern bei der Bestimmung der Härte führt. Die Größe dieser Fehler, die man ungefähr aus der Differenz der Härtezahlen nach der Bestimmung aus der Eindrucktiefe und der Bestimmung aus dem Eindrucksdurchmesser entnehmen kann, zeigt Tabelle 5.

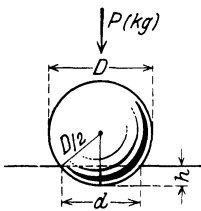


Fig. 28. Brinellprobe.

Tabelle 5. Kugeldruckhärte nach Eindrucktiefe und -durchmesser.

Werkstoff	Härte nach		Werkstoff	Härte nach	
	Eindrucktiefe	Eindrucksdurchmesser		Eindrucktiefe	Eindrucksdurchmesser
Regelmetall . . . . .	25,8	21,8	Kalziummetall . . . . .	26,6	25,0
Einheitsmetall . . . . .	19,3	16,7	Kupfer . . . . .	34,0	44,5
Lurgimetall . . . . .	33,5	32,7	Eisen . . . . .	84,1	96,2

Bei der Durchführung des Versuches ist ferner darauf zu achten, daß die Last nicht zu schnell gesteigert wird, und daß die Belastungsdauer auf der Höchstbelastung genügend lange ist, damit der Werkstoff fließen kann. Nach den DIN-Normen soll die Belastungssteigerung bis auf Höchstlast bei Eisen und Stahl etwa 15 sek betragen, die Belastungsdauer etwa 30 sek bei weichen Eisensorten, und etwa 10 sek bei härteren Werkstoffen mit einer Härte über 140 kg/mm<sup>2</sup>. Bei Lagermetallen genügen jedoch diese Belastungsdauern nicht,

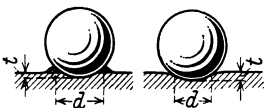


Fig. 29. Wulstbildung und Nachziehen bei Kugeldruckprobe.

um einen Gleichgewichtszustand zu erzielen. Hierzu sind vielmehr etwa 3 min erforderlich. Ein weiterer Faktor, der das Ergebnis der Härteprüfung beeinflusst, ist der Abstand des Eindrucks von der nächsten Kante des Probestückes. Da am Rande der Werkstoff bedeutend besser ausweichen kann, und infolgedessen der Eindruck zu groß würde; ebenso wirkt eine zu schwache Stärke des Probestückes.

Tabelle 6 enthält die durch die Norm festgelegten Werte für die Probenstärke, den Kugeldurchmesser und die dazugehörige Belastung bei der Untersuchung der verschiedenen Metalle.



Tabelle 6. Brinellprobe.

Probenstärke	mm	über 6	3-6	unter 3
Kugeldurchmesser . . . . .	$D$ mm	10	5	2,5
Belastung für Gußeisen und Stahl . . . . .	$P$ kg	3000	1000	250
Belastung für hartes Kupfer, Messing, Bronze u. a. . . . .	$P$ kg	750	250	62,5
Belastung für weichere Metalle . . . . .	$P$ kg	187,5	62,5	15,6

Ein Übelstand der Brinellschen Härteprüfung liegt darin, daß die Härte-  
werte von dem Kugeldurchmesser und der Belastungshöhe abhängen. Wenn  
die durch die Norm festgestellten Kugeldurchmesser nicht verwandt werden  
können, ist es auf Grund längerer Versuche ratsam, die Belastung so zu wählen,  
daß sie sich wie die Quadrate der verwandten Kugeldurchmesser verhalten, ent-  
sprechend der Formeln  $P_1 : P_2 = D_1^2 : D_2^2$ , damit sich einigermaßen vergleichbare  
Werte ergeben.

Aus allem ergibt sich besonders bei dieser Prüfung die Forderung, daß bei  
der Angabe der Ergebnisse die Verhältnisse bei der Prüfung gekennzeichnet wer-  
den. Nach den Normen wird eine Härte die z. B. mit einer 5 mm-Kugel bei 1000 kg  
Belastung und 30 sek Belastungsdauer bestimmt ist, mit  $H\ 5/1000/30$  bezeichnet.

Wie vorher schon erwähnt, können durch die Härte der verwandten Kugeln  
Meßfehler eintreten. Die Kugeln werden aus gehärtetem Werkzeugstahl hergestellt  
und sollen die höchste erzielbare Härte besitzen. Ihre Härte bestimmt man da-  
durch, daß man zwei Kugeln zusammenpreßt und aus der Größe der Abplattung

nach der Formel  $H = P : \frac{\pi d^2}{4}$  die Härte berechnet, in der  $d$  den Durchmesser

der Abplattung darstellt. Die Kraft  $P$  beträgt hierbei etwa  $5D^2$  ( $D$  in mm,  
 $P$  in kg). Die Härte der normalen Kugel schwankt zwischen 630 und 670 kg/mm<sup>2</sup>.  
Hieraus ergibt sich ohne weiteres, daß bei etwa 600 kg/mm<sup>2</sup> die größte einiger-  
maßen mit Genauigkeit bestimmbare Härte liegt.

Der Grund dafür, daß die Härteprüfung trotz der zahlreichen, ihr anhaftenden  
Mängel sich in der Praxis großer Beliebtheit erfreut, liegt in dem Vorteil dieses  
Prüfungsverfahrens gegen den Zug- und Druckversuch, daß bei ihr das Werkstück  
nicht zerstört zu werden braucht, und man daher das Werkstück selber unter-  
suchen kann, wenn auch nur an der Oberfläche. Ferner ist praktisch von großer  
Bedeutung, daß die Untersuchung gegenüber anderen Verfahren nur kurze Zeit  
erfordert. Auf diesen Vorteilen beruhte auch das große Bestreben, einen Zu-  
sammenhang zwischen den Werten der Brinellhärte und der Festigkeit zu finden.

Nach eingehenden Untersuchungen steht heute fest, daß eine bestimmte Be-  
ziehung zwischen Kugeldruckhärte und Dehnung, Streckgrenze oder Zugfestig-  
keit nicht besteht. Für die Praxis genügt es aber in den meisten Fällen, wenn  
man mit den Vorzügen der Härtebestimmung die Festigkeit angenähert bestimmen  
kann. Für derartige Fälle gilt nach den Normenvorschriften DIN Blatt 1605 für  
Kohlenstoffstahl mit einer Zugfestigkeit zwischen 30 und 100 kg/mm<sup>2</sup>:  $\sigma_B = 0,36 H$   
und für Chromnickelstähle mit einer Zugfestigkeit von 65 bis 100 kg/mm<sup>2</sup>:  
 $\sigma_B = 0,34 H$ .

Von großem Wert ist die Härteprüfung infolge der einfachen Durchführung  
ohne Zerstörung des Werkstücks für die Auswahl gleichwertiger Werkstoffe. So  
ist es z. B. für die Zusammenstellung von Radsätzen wichtig, daß die Bandagen  
eines Satzes gleiche Härte besitzen, damit sie sich gleichmäßig abnutzen und zu  
gleicher Zeit ausgewechselt werden müssen. Hier ermöglicht die Härtebestim-  
mung am leichtesten die Auswahl solcher Stücke. Dabei darf man jedoch nicht  
annehmen, daß zwischen Härte und Abnutzung oder Bearbeitbarkeit ein be-

stimmter, allgemeingültiger Zusammenhang bestehe. Diese Eigenschaften hängen von verschiedenen Faktoren ab, die durch die Härteprüfung nicht alle erfaßt werden.

Die Durchführung der Brinellprobe ist je nach den vorliegenden Probestücken und vorhandenen Einrichtungen sehr verschieden. Wenn es das zu untersuchende Werkstück erlaubt, kann man eine Vorrichtung auf der Zerreißmaschine verwenden. Praktischer sind besonders dazu hergerichtete Kugeldruckpressen. Fig. 30 zeigt eine der vielen Ausführungsformen. Die Krafterzeugung geschieht dabei von Hand, die Kraftmessung durch die vorher auf die Probebelastung eingestellte Laufgewichtswage. Bei anderen Ausführungen wird die Kraft hydraulisch erzeugt, indem ein Kolben in einen Flüssigkeitszylinder hineingedrückt wird, und der Druck auf einen großen Kolben übertragen wird, der mit der Kugel verbunden ist. Die Kraft kann statt durch Laufgewichtswage durch Meßdose oder einfaches Manometer gemessen werden.

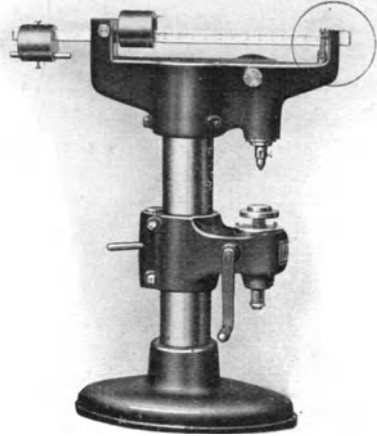


Fig. 30. Kugeldruckpresse.

Für die Durchführung von Härtebestimmungen an größeren Werkstücken gibt es Sonderausführungen, wie z. B. eine solche für die Härteprüfung von Schienen. Fig. 31.

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle auch kurz die wichtigsten anderen statischen Verfahren der Härteprüfung erwähnt.

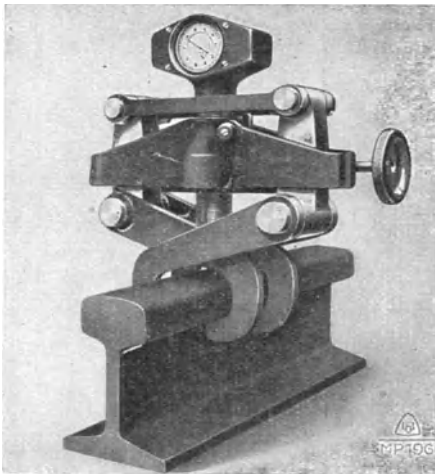


Fig. 31. Schienenhärteprüfapparat.

Martens bestimmte die Belastung, bei der eine 5 mm-Kugel einen bleibenden Eindruck von 0,05 mm Tiefe erzeugt. Er stützte sich hierbei auf die Überlegung, daß bei den hierzu nötigen geringen Belastungen der bleibende Eindruck der Belastung proportional ist. Die Bestimmung dieser Härte ist jedoch nicht einfach und erfordert einen besonderen Apparat. Föppl drückte zwei Kreiszylinder mit bestimmtem Durchmesser, die kreuzweise übereinandergelegt wurden, mit einer bestimmten Belastung zusammen und bezeichnete als Härte die spezifische Belastung der dabei entstandenen Kreisfläche. Ludwig bestimmte die Kegeldruckhärte durch Eindrücken einer gehärteten Kegelspitze mit einem Winkel

von  $90^\circ$ . Als Härte bezeichnet er die spezifische Belastung der Kreisfläche des Eindruckdurchmessers. Das Verfahren hat gegenüber der Kugeldruckprobe den Nachteil, daß sich keine theoretisch einwandfreie Spitze herstellen läßt, und daß die etwaige Herstellung einer genormten, abgerundeten Spitze mit Schwierigkeiten verbunden ist.

Turner und Martens erzeugten mit einer Diamantspitze mit  $90^\circ$  Spitzenwinkel auf einer polierten Fläche einen Riß, Turner bezeichnete als Ritzhärte

die Belastung, die einen mit bloßem Auge noch eben sichtbaren Ritz erzeugte, während Martens die Belastung wählte, die ein Riß von 0,01 mm erzeugte. Die Versuche sind kaum fehlerlos auszuführen. Bei der Härteprüfung nach Rockwell, die besonders in Amerika und in letzter Zeit auch in Deutschland Eingang gefunden hat, wird eine kleine Kugel oder Diamantspitze unter einer kleinen Vorlast in das Probestück gedrückt. Diese Stellung gilt als Nullstellung. Das Härtemaß stellt dann die Eindringtiefe unter einer Hauptlast dar, die etwa zehnmal so groß ist wie die Vorlast. Die Eindringtiefe wird dabei mit einer Meßuhr mit  $\frac{1}{1000}$  mm Genauigkeit direkt bestimmt. Das Prüfverfahren ergibt einen sehr kleinen Eindruck und eignet sich daher sehr gut für die Untersuchung fertiger Werkstücke wie auch harter Werkstoffe, wo sonst dynamische Härteprüfverfahren angewandt werden, die an anderer Stelle näher behandelt sind.

### e) Verdrehungs- (Torsions-) Versuch.

Der Verdrehungsversuch wird heute als statisches Verfahren nur noch selten angewandt. Von Bedeutung ist er lediglich für die Untersuchung anderweitig nicht geprüften Wellenmaterials. Es bestehen auch keine allgemein anerkannten Probestababmessungen und Versuchsbedingungen. Der meist zylindrische Probestab wird beiderseitig in drehbare Gehäuse eingespannt, deren Mitten genau mit der Stabachse übereinstimmen. Auf dem einen Ende greift die Kraft an, auf dem anderen wird die Größe des Drehmomentes ermittelt, entweder dadurch, daß der Ausschlag eines Pendelgewichtes oder der Druck eines Hebels auf eine Meßdose oder eine Wage gemessen wird.

Die Spannung im Probestück wächst beim Verdrehungsversuch mit dem Abstand von der Stabachse. Auf einem Kreise um die Achse herrschen gleiche Spannungen. Für die Berechnung maßgebend ist daher die Spannung in den äußersten Materialteilen. Die Bruchspannung  $\sigma_d$  in diesen Teilen wird aus dem Drehmoment beim Bruch  $M_d$  und dem Widerstandsmoment des Probestabes  $W_d$  berechnet.

$$\sigma_d = M_d : W_d .$$

Durch die Drehbeanspruchung bilden die Längsfasern eines Probestabes bei eintretender Formveränderung Schraubenlinien. Bei homogenem Werkstoff ist die Größe der Verdrehung, gemessen als Winkel der Längsfasern gegen die Stabrichtung in gleichem Abstände von der Stabachse gleich groß. Gewöhnlich läßt sich die Drehbeanspruchung an dem Bruchaussehen ohne weiteres erkennen.

### f) Der Scherversuch.

Beim Scherversuch soll der Widerstand eines Werkstoffes gegen Verschiebung zweier nebeneinanderliegender Querschnitte bestimmt werden. Die Beanspruchung beim Versuch kann einschnittig oder zweischnittig sein, je nachdem, ob der Probekörper gleichzeitig in einem oder zwei Querschnitten beansprucht wird (vgl. Fig. 32 und 33).

Beim zweischnittigen Scherversuch hat man den Vorteil, daß die beim einschnittigen Scherversuch unvermeidlichen Biegebeanspruchungen besser vermieden werden können. Zur Durchführung des Zweischnittigen, der üblicher ist, wird die zylindrische Probe *a* in zwei genau passende Buchsen *b* gelegt und über die Probe ein großer Ring *c* geschoben, der sich mit wenig Spiel zwischen den Buchsen bewegen kann. Durch die Kraft *P* des Kolbens, die auf den Ring drückt,

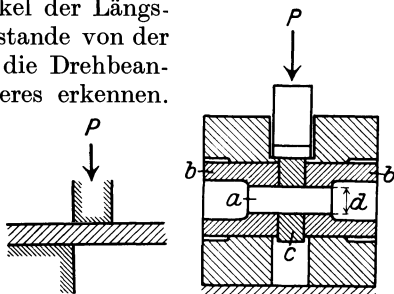


Fig. 32 u. 33. Einschnittiger und zweischnittiger Scherversuch.

wird somit die Probe doppelseitig auf Abscherung beansprucht. Die Scherfestigkeit  $\tau$  ist die spezifische Last auf die Einheit der beiden Querschnitte  $F$ .

$$\tau = P : 2F.$$

Für Flußstahl und die praktisch gebräuchlichsten Metallegierungen schwankt die Scherfestigkeit zwischen 0,75 und 1,2 der Zugfestigkeit.

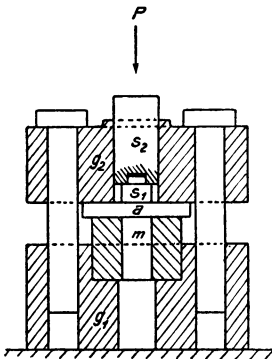


Fig. 34. Werkzeug für d. Lochversuch.

### g) Der Lochversuch.

Beim Lochversuch wird die Scherfestigkeit des Werkstoffes beim Ausstanzen eines kreisförmigen Ausschnittes bestimmt, wie es praktisch in der Blechbearbeitung häufig vorkommt. Die Versuchseinrichtung besteht in einem besonderen Stanzwerkzeug, das mit einer Meßvorrichtung verbunden ist (Fig. 34). Die sich aus dem Versuch ergebende Scherfestigkeit ist aber keine Materialkonstante, sondern ist außer von der Qualität des Werkstoffes abhängig von der Blechstärke der Probe  $a$ , dem Lochdurchmesser  $m$ , der Oberfläche des Stempels  $s_1$  (eben oder hohl) und vom Spiel zwischen Stempel und Matrize. Man

berechnet die Schubspannung  $\tau$  als spezifische Kraft bezogen auf den verschobenen Querschnitt. Sie ergibt sich aus der Formel

$$\tau = P : \pi d s,$$

worin  $d$  den Lochdurchmesser und  $s$  die Blechstärke bedeuten.

## 2. Die dynamischen Untersuchungen.

Wenn man der Ursache von Brüchen in der Praxis nachgeht, so beobachtet man, daß die Materialien meistens unter der Wirkung von Stößen oder Belastungsschwankungen gebrochen sind, während sie die ruhenden Belastungen ausgehalten haben. Die Achse eines Wagens z. B. hält gewöhnlich, solange der Wagen noch steht und beladen wird, der Bruch tritt erst ein, wenn der Wagen beim Fahren auf holpriger Straße Stöße bekommt. Ebenso ist es bekannt, daß Stahl mit schlechter chemischer Zusammensetzung oder nach unsachgemäßer Warmbehandlung sowie Werkstoffe wie Siegelack und Pech, sich langsam in weitem Maße biegen lassen, dagegen beim leichten Schlag mit dem Hammer, oft sogar schon beim Zubodenfallen zerspringen. Diese Erkenntnis führte schon früh dazu, derartig beanspruchte Werkstoffe auf ihr Verhalten bei stoßweiser Beanspruchung zu prüfen.

Als Ergebnis dieser Prüfverfahren kann man aber nun nicht mehr die Formänderung des Werkstoffes während der Belastung feststellen, und ebensowenig die im Augenblick des Bruches im Werkstoff herrschende Spannung. Es kann daher die den Bruch verursachende Beanspruchung nicht wie bei den statischen Prüfungen in  $\text{kg/mm}^2$ , also als spezifische Kraft, angegeben werden, sondern man muß die Arbeit bestimmen, die nötig gewesen ist, um den Bruch herbeizuführen, die in  $\text{mkg/cm}^2$  oder in  $\text{mkg/mm}^2$  angegeben wird. Diese Arbeit entspricht dem auf S. 9 angegebenen Arbeitsvermögen, das sich aus dem Flächeninhalt des Zerreißdiagramms ergibt. Um einen Vergleich mit den Spannungen der statischen Untersuchung zu ermöglichen, kann man aus dem dynamischen Arbeitsvermögen des Werkstoffes die mittlere Spannung berechnen, die man der mittleren Spannung bei der statischen Berechnung gegenüberstellen kann.

Da sich aber aus dem dynamischen Arbeitsvermögen für den Konstrukteur nur schwer erfaßbare Unterlagen für die Berechnung ergeben, und ferner die Be-

stimmung der statischen Festigkeitseigenschaften bedeutend einfacher und genauer ist, erreichte die statische Werkstoffprüfung zunächst einen großen Vorsprung vor den übrigen Prüfungsverfahren. Die Einführung der statischen Prüfung wurde noch unterstützt durch die hierfür entwickelten Maschinen und Hilfseinrichtungen und dadurch, daß sich bald umfangreiche Unterlagen sammelten, die die Beurteilung der Werkstoffe nach den Ergebnissen der statischen Untersuchung erleichterten. Nur in Sonderfällen, wie bei der Prüfung von Eisenbahnmaterialien, hat die dynamische Prüfung stets das Feld behauptet.

In den letzten Jahren haben jedoch die hohen Anforderungen der modernen Technik die Werkstoffprüfung in dieser Hinsicht vor neue Aufgaben gestellt. Der Bau schnelllaufender Maschinen mit möglichst kleinen Massen bei teilweise sehr hohen, stoßweisen Beanspruchungen und viele andere neue Entwicklungen fordern dringend bestimmte Unterlagen, die es ermöglichen, die Beanspruchungsgrenzen der verschiedenen Baustoffe bei dynamischen Beanspruchungsarten zu bestimmen. Heute ist es leider noch eine ungelöste Aufgabe der Materialprüfungstechnik, für die Prüfung bei diesen Beanspruchungen bestimmte Verfahren mit einheitlichen Verhältnissen vorzuschreiben, die praktisch verwertbare und miteinander vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Fortschritte auf diesem Gebiete berechtigen aber zu der Hoffnung, daß diese Forderung in nicht allzu langer Zeit erfüllt wird.

Da theoretisch als dynamische Beanspruchung jede Veränderung eines Spannungszustandes betrachtet werden muß, ergibt sich für die Werkstoffprüfung eine große Vielfältigkeit von zu betrachtenden Verhältnissen. Die Spannung kann stoßartig in großen Zeitabständen wachsen oder fallen, oder die Spannungsänderungen können rhythmisch verlaufen. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die Spannungen lediglich ihre Größe wechseln oder ob sie Größe und Richtung wechseln. In beiden Fällen entstehen im Werkstück Schwingungszustände, die unter Umständen, wenn die Massenteilchen des Werkstücks im selben Rhythmus mitzuschwingen anfangen, zu derartig hohen Beanspruchungen führen können, daß Brüche entstehen, obwohl die äußeren Beanspruchungen selber sehr gering sind. Demgemäß lassen sich die bisher entwickelten Prüfungsverfahren in zwei große Gruppen einteilen. Auf der einen Seite stehen die Verfahren, die lediglich das dynamische Arbeitsvermögen des Baustoffes bei der Beanspruchung mit einzelnen Stößen feststellen. Sie entsprechen also genau den statischen Verfahren mit sehr hohen Belastungsgeschwindigkeiten. Statt durch eine langsam gesteigerte Belastung — die sich praktisch bei den statischen Verfahren nicht umgehen läßt — wird hier das Probestück durch einen oder mehrere zeitlich voneinander unabhängige Schläge zerstört, und die bis zum Bruch aufgewandte Arbeit für die Bewertung des Werkstoffes zugrunde gelegt. Auf der anderen Seite wird der Hauptwert auf das Verhalten des Werkstoffes bei Spannungsänderungen gelegt, und für die Beurteilung die Zahl der Belastungswechsel bei bestimmten Spannungsänderungen zugrunde gelegt. Sie sind in der Materialprüfungstechnik heute allgemein als Dauerversuche bekannt.

Für die Ausführung der Schlagversuche verwendet man entweder Fallwerke oder Pendelschlagwerke, deren grundsätzliche Wirkungsweise hier als bekannt vorausgesetzt wird. Das Arbeitsvermögen der Maschinen beim Auftreffen des Hammers auf das Probestück ergibt sich aus dem Gewicht des Hammers  $G$  und der senkrechten Fallhöhe  $H$  zu  $A = G \cdot H$  (mkg). Unberücksichtigt bleibt hierbei dann aber die durch die Reibung beim Fall verbrauchte Energie, die deshalb so klein wie möglich gehalten werden muß. Beim Fallwerk wird dies durch Schmierung der Gleitbahn mit Graphit und beim Pendelschlagwerk durch Lagerung des Pendels in Kugellagern erzielt. Die Energie des Hammers wird nun aber nicht allein auf

die Probe übertragen, sondern es entsteht ein weiterer Fehler dadurch, daß ein Teil von dem Amboß aufgenommen wird, der beim Schlag eine gewisse Erschütterung und elastische Formänderung erleidet. Die Schlagwerke müssen deshalb sehr stabil gebaut sein, damit der hierfür verbrauchte Bruchteil sehr gering wird. Ein weiterer Bruchteil wird ferner beim Pendelschlagwerk dadurch verbraucht, daß die Probe vom Hammer fortgeschleudert wird. Für genaue Untersuchungen läßt sich dieser Bruchteil jedoch rechnerisch erfassen.

Zur Erzielung eines bestimmten Arbeitsvermögens der Schlagwerke kann man nach obiger Formel sowohl ein kleines Gewicht  $G$  und eine große Höhe  $H$ , als auch

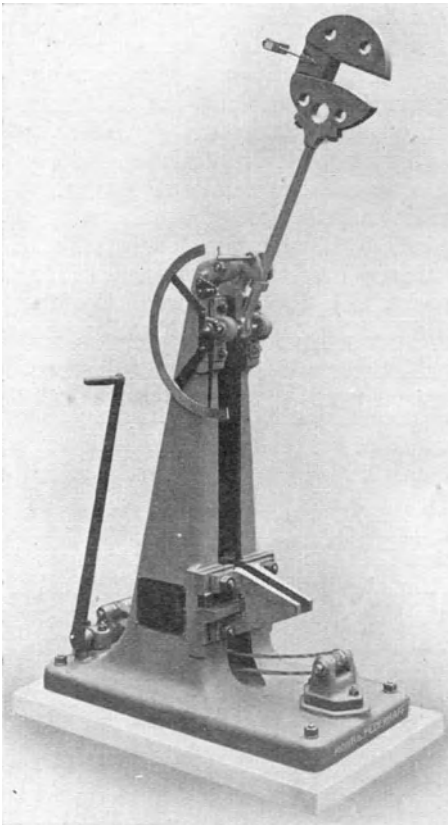


Fig. 35. Pendelschlaghammer mit Einrichtung für Schlagzugversuch (Mohr & Federhaff).

ein großes Gewicht  $G$  mit einer kleinen Höhe  $H$  wählen. Die dynamische Wirkung aber ist in beiden Fällen verschieden. Denn im ersten Fall trifft der Hammer mit größerer Geschwindigkeit auf die Probe als im zweiten. Wenn normale Schlagwerke verwendet werden, kann in der Praxis dieser Unterschied allerdings vernachlässigt werden, da er im Verhältnis zu den übrigen Fehlermöglichkeiten gering ist. Ebenso könnte nach obiger Formel die Energie eines kräftigen Schlages durch mehrere schwächere Schläge geleistet werden. Bei der Prüfung ergibt sich dann aber, daß im zweiten Falle zu derselben Formänderung eine größere Kraft nötig war als im ersten Falle. Dies findet seine Erklärung darin, daß der zur elastischen Formänderung und zur Massenbeschleunigung notwendige Bruchteil der Energie bei mehreren Schlägen mehrere Male aufgewandt werden muß. Praktisch kann allerdings auch diese Differenz in den meisten Fällen vernachlässigt werden, zumal es sich bei den dynamischen Prüfungen aus Mangel an Unterlagen gewöhnlich um Vergleichsversuche handelt.

Für die Ausführung der Schlagwerke sind vom Verbands für die Materialprüfungen der Technik bestimmte Normen und Richtlinien zur Vereinheitlichung der Prüfungsmethoden aufgestellt: Der Bär der gewöhnlichen Fallwerke soll ein Gewicht von 100 oder 500 kg besitzen (nach Martens 20 : 100 kg). Die Schabotte (Amboß) soll mindestens das 10fache Gewicht des Bärs haben. Das Fundament soll unelastisch sein und mindestens das 6fache Gewicht der Schabotte besitzen. Als Fallhöhe wird vom Verband bis 6 m empfohlen (von Martens bis 4,5 m). Die Gleitfläche ist, wie schon erwähnt, gut zu schmieren. Zur Eichung der Fallwerke werden vom Materialprüfungsamt, Berlin-Dahlem, Normal Kupferzylinder aus Stehbolzenkupfer geliefert, für die die Stauchung bei bestimmten Schlagarbeiten angegeben wird. Die auf die Probe übertragene Schlagarbeit eines Fallwerks darf nicht mehr als 2% geringer sein als die theoretisch nach der

Formel errechnete. Für die Pendelschlagwerke werden drei Größen mit einem Höchstvermögen von 10, 75 und 250 mkg empfohlen. Die Konstruktion des kleinen Pendelhammers zeigt Fig. 35. Die größeren Schlagwerke wurden früher mit einem hohen Eisengestell ausgeführt, in letzter Zeit wird jedoch auch hierfür die Form nach Fig. 35 gewählt. Bei der kleinen Größe wird das Gewicht von Hand gehoben und durch eine Sperrklinke gehalten. Bei den beiden größeren Typen wird das Gewicht mit einer Handwinde hochgezogen. Zur Bestimmung der nicht zur Zerstörung der Probe verbrauchten Energie ist an den Pendelschlaghämmer eine Anzeigevorrichtung angebracht, durch die der Durchschlagswinkel nach der Zerstörung der Probe bestimmt wird. Hierin liegt der Hauptvorteil der Pendelschlagwerke gegenüber den Fallwerken, wo die überschüssige Energie nicht direkt gemessen werden kann. Die Größe der drei Pendelschlaghämmer ist folgende:

Für 250 mkg:	Bärgewicht	85 kg,	Fallhöhe	2,94 m,
„ 75 mkg:	„	33 kg,	„	2,28 m,
„ 10 mkg:	„	8,2kg,	„	1,22 m.

Beim 10 mkg-Schlagwerk wird das Gewicht immer auf die volle Höhe gehoben. Bei den beiden größeren Schlagwerken wird die Fallhöhe den beabsichtigten Stößen angepaßt. Die Fallhöhe entnimmt man beim Pendelschlagwerk am besten einer Kurve, die die Fallhöhe in Abhängigkeit von dem zu messenden Winkel darstellt. Die zur Zerstörung der Probe verbrauchte Arbeit  $A$  ergibt sich als Differenz des Arbeitsvermögens  $A_1$  des Bären beim Auftreffen des Bären und der zum Heben des Bären nach dem Durchschlag verbrauchten Arbeit  $A_2$ .  $A = A_1 - A_2 = G \cdot H - G \cdot h = G (H - h)$ , worin  $h$  die nach dem Durchschlagen erreichte Höhe des Gewichtes  $G$  darstellt.

Für die Beurteilung der Werkstoffe wird die zu ihrer Deformation verbrauchte spezifische Schlagarbeit  $K$  bestimmt, die entweder auf die Flächeneinheit des beanspruchten Querschnitts oder die Volumen- oder Gewichtseinheit bezogen werden kann. Entsprechend den Formeln

$$K = \frac{G(H-h)}{F} \quad \text{bzw.} \quad = \left[ \frac{G(H-h)}{G_1} \right] \quad \text{bzw.} \quad = \left[ \frac{G \cdot (H-h)}{V} \right],$$

wenn  $F$  den Querschnitt in Quadratzentimetern,  $G_1$  das Gewicht in Gramm und  $V$  das Volumen in Kubikzentimetern bedeuten.

#### a) Der Schlagzug- und Schlagdruckversuch.

Die verschiedenen Schlagfestigkeitsprüfungen unterscheiden sich wie die statischen Prüfungsmethoden nach der Richtung der Kraft zur Richtung der Probe als Schlagzug-, Schlagdruck- und Schlagbiegeprüfung.

Die Ergebnisse von Schlagzugversuchen sind noch nicht so zahlreich, daß man ein abschließendes Urteil über den Einfluß der stoßweisen Belastung geben könnte. Im allgemeinen hat man aber die schon beim Zerreißversuch angegebene Tendenz bestätigt gefunden, daß die Formänderungsarbeit bis zum Bruch und die mittlere Spannung höher liegen als bei langsamer Belastungssteigerung. Dies zeigen einige Ergebnisse, die in den Tabellen 7 und 8 wiedergegeben sind, nach Versuchen von Welter.

Bei Stahl ergaben die Untersuchungen, allerdings von Proben verschiedener Chargen, Werte, die in Tabelle 8 verzeichnet sind.

Wichtiger und leichter ausführbar ist der Schlagdruckversuch. Man verwendet hier dieselben Proben wie beim statischen Druckversuch und bestimmt entweder die spezifische Schlagarbeit, bei der der Körper gerade zu Bruch geht, den Bruch-

Tabelle 7. Statische und dynamische Festigkeit von Metallen.

	Formänderungsarbeit bis Bruch in cmkg		Bruchdehnung in %	
	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
Al hart . . . . .	450	800	12,5	15
Cu hart . . . . .	900	3900	8,5	16,5
Cu weich . . . . .	2625	5100	58,5	61
Härtbare Al-Legierung Type Dural . . . . .	2100	4500	23,0	25
Messing hart . . . . .	1350	3100	7,5	15
Messing weich . . . . .	1800	4800	37,0	60

Tabelle 8. Statische und dynamische Festigkeit von Stählen.

	Mittlere Spannung bis zum Bruch kg/mm <sup>2</sup>		Mittlere Dehnung (5 ×) %	
	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
0,5 ÷ 0,54% C . . . . .	55,4	60	25,4	27
0,49 ÷ 0,5% C . . . . .	56,6	61	24,6	26,4
0,52 ÷ 0,5% C . . . . .	48,4	54	27,4	27,7
CrNi (4% Ni) . . . . .	60,8	69,5	26,1	28,1
CrNi (3% Ni) . . . . .	59,1	70,1	27,1	27,3
CrNi (3% Ni) verg. . . . .	89,8	92,7	19,5	20,4

faktor, oder die Arbeit, die den Probekörper um 80% seiner Länge staucht, den Stauchfaktor. Bei der Durchführung ist zu beachten, daß bei mehreren Schlägen, die zur Deformation verbrauchte Schlagarbeit größer ist als bei einem einzigen Schlag, was bereits oben erwähnt war, ferner, daß die Deformation wie beim statischen Druckversuch von der Beschaffenheit der sich berührenden Flächen abhängt. Besteht große Reibung zwischen diesen Flächen, so wird die Deformation geringer. Die Art der Deformation und die Druckkegelbildung beim Bruch entspricht den Erscheinungen beim statischen Versuch.

Über das Verhältnis der Deformationsarbeit beim statischen zu der beim dynamischen Druckversuch läßt sich ebenfalls noch kein abschließendes Urteil bilden. Bei einigen Metallen, wie geglühtem Kupfer und geglühtem Stahl, ist die Deformationsarbeit bei der dynamischen Prüfung etwa 10% größer als die bei der statischen, bei anderen dagegen wieder umgekehrt.

### b) Der Schlagbiegeversuch.

Der Schlagbiegeversuch entspricht ebenfalls dem statischen Biegeversuch mit großer Belastungsgeschwindigkeit. Bereits beim statischen Versuch ist auf die schwierig zu erfassende Verformung und Spannungsverteilung bei dieser Art der Beanspruchung hingewiesen. Auf der äußeren Seite der deformierten Probe werden Materialfasern auf Zug, auf der inneren auf Druck beansprucht, und zwar tritt in den äußersten Fasern die höchste Beanspruchung und infolgedessen die erste Zerstörung der Probe auf.

Gegenüber dem Schlagzug- und Schlagdruckversuch hat der Schlagbiegeversuch praktisch die größte Bedeutung gewonnen infolge seiner einfachen Durchführung. Bis vor kurzem wurde diese Prüfung, wie der Schlagdruckversuch selten als wissenschaftliche Prüfung durchgeführt, sondern man prüfte durch den Versuch die Baustoffe lediglich auf ihre Verwendbarkeit hin und stützte sich hierbei auf Vergleiche mit dem Verhalten bewährter Baustoffe. Die Untersuchungen gehören also eigentlich zu den technologischen Prüfungen. Sie sind jedoch hier besprochen worden, da bei neueren wissenschaftlichen Untersuchungen nach diesem Verfahren die dynamischen Festigkeitseigenschaften auch zahlenmäßig bestimmt wurden.



Bei den früheren Schlagbiegeprüfungen, z. B. von Eisenbahnschienen, wurde das Probestück mit 1,3 m Länge auf zwei abgerundete Stützen in 1 m Abstand gelegt und in der Mitte ein Aufsatzstück mit einer Abrundung von 150 mm Radius auf das Probestück gesetzt, auf das der Bär aus einer bestimmten Fallhöhe herabfiel. Bestimmt wurde mit einem Tiefenmaß die Durchbiegung auf 1 m Länge.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, muß auch hier darauf geachtet werden, daß durch mehrere Schläge eine schwächere Formänderung erzielt wird als durch einen starken Schlag mit derselben Arbeitsleistung. Es müssen also die Versuche möglichst immer unter denselben Bedingungen durchgeführt werden.

Ebensowenig wie aber der Konstrukteur aus der Bruchspannung des Zerreißversuches eine Grundlage für seine Berechnungen findet, kann ihm die Formänderungsarbeit bis zum Bruch bei dynamischen Beanspruchungen Anhalt für die Größe der zulässigen Stöße bieten. Nur bei großen Unterschieden der Ergebnisse gestattet diese Art der Prüfung eine maßgebende Beurteilung der Werkstoffe, und, da diese oft vorkommen, ja selbst bei einem Metall mit bestimmter Zusammensetzung die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Vorbehandlung sehr verschieden sind, hat die Schlagprüfung mit der Bestimmung der Formänderungsarbeit bis zum Bruch als Ergänzung für den Zerreißversuch bereits große praktische Bedeutung. Wie aber der Konstrukteur bei der Auswahl seines Baustoffes nach der Bruchspannung einen Werkstoff mit sehr niedriger Fließgrenze erhalten könnte, der schon bei geringer Beanspruchung große Formänderungen erleiden würde, kann er bei der Beurteilung nach der Brucharbeit allein Werkstoffe bekommen, die sich bei jedem Schlag deformieren. Einen wichtigen Fortschritt für den Konstrukteur bilden daher die von Welter empfohlenen Versuche zur Bestimmung der dynamischen Streck- und Elastizitätsgrenze.

Diese Versuche werden auf einem Pendelschlagwerk mit Spiegelapparaten durchgeführt. Auf Einzelheiten soll hier aber nicht weiter eingegangen werden, da die Durchführung der Versuche größere Erfahrung bei Werkstoffprüfungen erfordert.

Die Bestimmung der dynamischen Formänderungsarbeit bis zu einer Dehnung von 0,02% hat ergeben, daß sich hiernach die Güte der Werkstoffe ganz anders verhält als bei der Beurteilung nach der statischen Spannung, aber auch als nach der dynamischen Brucharbeit. Eine Reihe dieser Ergebnisse ist in Tabelle 9 zusammengestellt. Die Metalle sind dieselben wie in Tabelle 7. Ein Vergleich zeigt, daß sich die Reihenfolge bei der Beurteilung nach den verschiedenen Festigkeitseigenschaften bedeutend ändern würde.

Tabelle 9. Statische und dynamische Elastizitätsgrenze.

	$\sigma_{0,02}$			$\sigma_{0,02}$	
	statisch kg/mm <sup>2</sup>	dynamisch cmkg/cm <sup>2</sup>		statisch kg/mm <sup>2</sup>	dynamisch cmkg/cm <sup>2</sup>
Al hart . . . . .	8,5	10	Härtb. Al-Leg. Typ. Dural.	15	20
Cu hart . . . . .	21,0	90	Messing hart . . . . .	34	100
Cu weich . . . . .	6	20	Messing weich . . . . .	13	20

Auffallend ist der hohe elastische Widerstand gegen Stoß bei hartem Kupfer und Messing, und für die Praxis beachtenswert der verhältnismäßig niedrige Wert bei der Aluminiumlegierung.

Von großer Bedeutung ist ferner die Untersuchung, wie weit das Metall wirklich elastisch ist, d. h. ob es bei mehreren Schlägen zunehmende Formänderungen zeigt, oder ob es seine Form behält.

Nach den Untersuchungen Welters besitzen viele Metalle eine ausgesprochen dynamische Elastizitätsgrenze, unter der sie nur sehr kleine bleibende Formänderungen zeigen und auch bei wiederholten Schlägen keine Vergrößerung dieser Deformation aufweisen. Weiches Eisen und hartes Messing haben z. B. deutlich ausgeprägte Grenzen, während weiches Kupfer und weiches Aluminium so gut wie keine Elastizitätsgrenze besitzen. Während also die erstgenannten Werkstoffe auch häufige Stöße bis zu einer bestimmten Grenze aushalten, würden die anderen auch durch ziemlich leichte, häufige Schläge allmählich über das zulässige Maß verbogen.

Diese Werte gäben also dem Konstrukteur eine Richtlinie für die Größe der für einen Baustoff zulässigen Stöße, wenn die Versuchsergebnisse den Querschnitten der Proben proportional wären. Praktisch sind aber leider die Untersuchungen dieser Art noch mit Schwierigkeiten bei der Durchführung verbunden, so daß sie augenblicklich für die Abnahme von Baustoffen noch nicht in Frage kommen. Nur für große Werke ist es möglich, dem Konstrukteur diese Daten ihrer Werkstoffe tatsächlich zur Verfügung zu stellen. Im ganzen muß gesagt werden, daß auf Grund der Versuche die Werkstoffe bisher ganz allgemein beurteilt werden können. Es ist aber eine der dringendsten Entwicklungen der Werkstoffprüfung, daß auf diesem Gebiete allgemein verwendbare Verfahren und Einrichtungen geschaffen werden.

### c) Die Kerbschlagbiegeprüfung.

Die Kerbschlagbiegeprobe stellt eine Verschärfung der Schlagbiegeprobe dar. Es ist eine bekannte Erscheinung, daß Baustoffe, die in unversehrtem Zustand sich so weit zusammenbiegen lassen, daß die Schenkel der Probe aufeinanderliegen, schon bei geringen Biegewinkeln zerbrechen, wenn sie durch Meißelhiebe an der Bruchstelle eingekerbt waren. Die Wirkung der Kerbe ist daher praktisch für die Ausbildung von Konstruktionsteilen von großer Bedeutung.

Schon bei der Besprechung der Form des Zerreißstabes ist auf S. 10 darauf hingewiesen, daß durch die Stoffanhäufung im Kopf des Probestabes der schwächere Teil des Stabes am Fließen gehindert wird. Zerrißt man z. B. mehrere dünne Stäbe, deren Querschnitt zusammen die eines Normalstabes ausmachen, so können sich in diesen Stäben die Stoffteile ungehinderter verschieben als in dem vollen Normalstab. Durch den Widerstand gegen das Verschieben der einzelnen Stoffteile ergibt sich für den Normalstab eine größere Festigkeit für  $1 \text{ mm}^2$  als beim Zerreißen der dünnen Stäbe. Bildet man nun andererseits den Probestab



nach Fig. 36 so aus, daß der schwächste Teil des Probestabes sehr kurz ist, werden die Stoffteilchen in diesem Stabteile, der die höchste Belastung auf  $1 \text{ mm}^2$  erfährt, durch die angrenzenden Teile des Probestabes, deren Spannung noch weit unter der Fließgrenze liegt, an einer Deformation gehindert. Infolgedessen wird die Querschnittsverminderung des Stabes kleiner und die Zerreißfestigkeit in  $\text{kg/mm}^2$  größer, und zwar wird die Differenz um so größer, je kleiner die Länge der Stabeinschnürung ist.

Ein Werkstoff, der beim Zerreißversuch in Form des Normalstabes eine Festigkeit von  $61,6 \text{ kg/mm}^2$  und  $55\%$  Querschnittsverminderung ergeben hatte, zeigte z. B. bei einer Einschnürung nach Fig. 36 von  $5 \text{ mm}$  Länge eine Festigkeit von  $93 \text{ kg/mm}^2$  bei nur  $11\%$  Querschnittsverminderung.

Die Dehnung ist, wie auf S. 6 erläutert ist, für diesen Vergleich nicht maßgebend.

Aus dieser Veränderung der Festigkeitsdaten könnte man nun schließen, daß die Einschnürungen eine zu erstrebende Form bei der Konstruktion von Werk-

stücken sei. Wie sich ergeben wird, ist dies aber nicht der Fall. Das angeführte Beispiel soll nur zeigen, wie durch die Kerbe die Formänderung gehindert wird. Dies bedingt aber, daß in den Kerben Zugkräfte im Werkstoff auftreten, die das Bestreben der Stoffteile, der Spannung auszuweichen, aufheben. Infolgedessen treten an diesen Stellen bedeutende Erhöhungen der Spannungen ein. Schon beim statischen Versuch zeigt sich nämlich, daß spröde Werkstoffe, in denen die hierdurch auftretenden Spannungen nicht an die benachbarten Querschnittsteile weitergegeben werden, in den Kerben früher einreißen, als es nach dem Normalzerreißversuch zu erwarten wäre, und infolgedessen dann auch sofort zu Bruch gehen. In Fig. 37 ist durch die Kurve der Spannungsverlauf in einem solchen spröden Stabe wiedergegeben, aus der deutlich hervorgeht, wie sich durch die Einwirkung der Kerbe die Spannungen ungleichmäßig verteilen. In der Kerbe wird in den Fasern an der Oberfläche die Bruchspannung des Werkstoffes schon erreicht, während in der Mitte und im Durchschnitt der Werkstoff noch weit unterhalb der Bruchlast beansprucht wird. Bei Metallen mit größerer Dehnung würde die Kurve infolge des besseren Spannungsausgleiches flacher verlaufen, und da die Teile oberhalb der Kerbe mit zur Aufnahme der Last herangezogen werden, erreichen diese Werkstoffe durch die Einwirkung der Kerbe scheinbar die größere Zugfestigkeit.

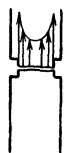


Fig. 37.  
Spannungen in einem spröden Zerreißstab mit Ein-schnürung.

Gefährlich wird die Wirkung der Kerbe bei allen Werkstoffen bei dynamischen Beanspruchungen. Man kann nämlich bei jedem Werkstoff von einer bestimmten Arbeitsschnelligkeit sprechen, d. h. von einer Fähigkeit, sich mit bestimmter Geschwindigkeit zu deformieren und dadurch die Spannungen auszugleichen. Diese Arbeitsschnelligkeit steht in keinem Zusammenhang mit der Dehnung. Bei schnellem Anwachsen der Spannung unter der Stoßwirkung kann infolgedessen die Spannungserhöhung in der Kerbe nicht so schnell verteilt werden wie sie anwächst. So wird auch bei Werkstoffen, die beim statischen Versuch eine größere Dehnung gezeigt haben, schon nach kurzer Deformation die Bruchspannung in den Fasern im Kerbgrund erreicht, während umgekehrt einige Werkstoffe, die beim Zerreißversuch eine geringe Dehnung gezeigt haben, sich bei der dynamischen Beanspruchung schneller deformieren und infolgedessen eine größere Energie zur Zerstörung erfordern.

Wie aus dem Gesagten schon hervorgeht, ist die Wirkung eines Kerbes in weitem Maße von der Form des Kerbes abhängig. Je scharfkantiger eine Kerbe ist, desto stärker wird das Material daran gehindert, sich zu deformieren und dadurch die Spannung an benachbarte Teile weiterzugeben. Bei großen Abrundungen dagegen werden auch die benachbarten Teile zur Aufnahme des Stoßes herangezogen. Für die Prüfung des Werkstoffes durch die Kerbschlagprobe ist daher die Innehaltung einer bestimmten Kerbform Hauptbedingung. Im Maschinenbau muß nahezu bei allen Werkstücken mit stoßweiser Beanspruchung gerechnet werden, infolgedessen bildet jede Kerbe oder Einschnürung eine Gefahr, die, wenn irgend möglich, zu vermeiden ist. Als Kerben sind hierbei aber nicht nur Gewinde oder Nuten, sondern alle plötzlichen Querschnittsveränderungen und selbst Bohrungen zu betrachten. Oft geht die Kerbwirkung aber auch schon von den Bestandteilen des Werkstoffes aus. Lunker, Schlacken oder spröde Gefügebestandteile, die den Zusammenhang im Stoff aufheben, können ebenfalls wie Kerben wirken. Je schärfer ein Riß im Stoff ist, so daß man ihn unter Umständen mit bloßem Auge überhaupt nicht erkennen kann, um so größer ist seine Wirkung, denn um so spitzer ist der Kerbgrund. Kleine, unbeobachtete Stoffverletzungen, wie mangelhaft geglättete Meißelhiebe oder eingeschlagene Stempel sind schon oft die Ursache von verhängnisvollen Brüchen geworden. Besonders gefährlich ist

die Wirkung des Kerbes, wenn die Teile häufigen Stößen ausgesetzt sind, wie es bei Maschinen gewöhnlich der Fall ist. Die einmalige Überschreitung der Bruchspannung im Kerbgrund führt dann lediglich zu einem Einreißen des Werkstoffes. Dadurch entsteht dann aber immer ein sehr scharfer Kerb, der beim nächsten Stoß zu einer weiteren Zerstörung führt, so daß schließlich der noch unversehrte Querschnitt den Stoß nicht mehr aushält und der Konstruktionsteil plötzlich bricht.

Auf diese Erscheinung der sog. Dauerbrüche ist später noch näher eingegangen.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Werkstoffe gegen Kerben bei dynamischer Beanspruchung sind verschiedene Verfahren vorgeschlagen, die aber fast alle davon ausgehen, daß die Probe hierbei durch Schlag auf Biegung beansprucht wird, weil hierbei gerade in den äußersten Fasern, die durch den Kerb getrennt werden die größten Spannungen auftreten. In Deutschland und den meisten europäischen Ländern hat sich die Kerbschlagbiegeprobe auf dem Pendelschlaghammer eingebürgert. Bei ihr wird die Kerbe auf der durch Zug beanspruchten Seite der Probe angeordnet und die Probe durch einen Schlag zerstört.

Der Einführung der Kerbschlagprobe als wissenschaftliches sowie als praktisches Prüfverfahren stehen aber heute noch mehrere Schwierigkeiten im Wege. Wie schon oben erwähnt, ist von großer Bedeutung für die Kerbwirkung zunächst die Kerbform. Der idealste Kerb wäre ein spitzer, scharfer Einschnitt. Praktisch ist aber die Herstellung dieses Einschnittes durch das Stumpfwerten des Werkzeuges

nur ungenähert möglich. Vom Deutschen Verbands für die Materialprüfungen der Technik wurden deshalb die in Fig. 38 und 39 wiedergegebenen Proben vorgeschrieben. Die normal zu verwendende Kerbschlagprobe soll einen Kerb mit einer Abrundung von 2 mm besitzen. Zur Herstellung des Kerbes wird ein Loch von 4 mm Durchmesser so in die Probe ge-

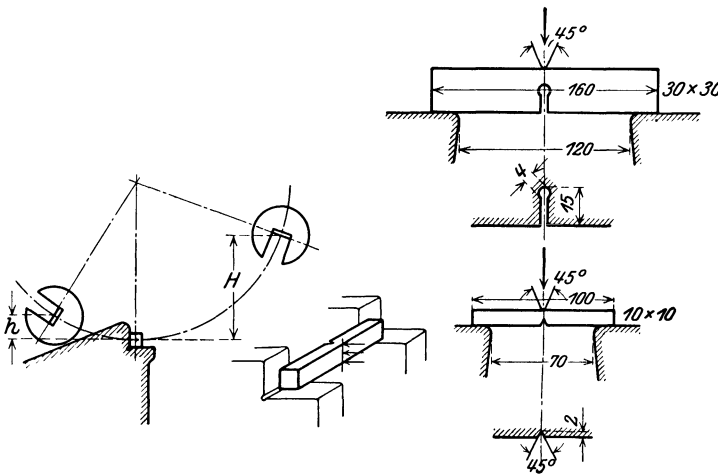


Fig. 38 u. 39. Kerbschlagprobe.

bohrt, daß eine Hälfte des Probequerschnittes unversehrt bleibt; auf der anderen Seite wird die Probe aufgesägt. Da ferner die Ergebnisse der Untersuchung von dem Querschnitt der Probe abhängen, wurde eine Probe von  $30 \times 30$  mm Querschnitt vorgeschrieben, die also einen unversehrten Querschnitt von  $15 \times 30$  mm an der eingekerbten Stelle besitzt. Nach den neueren Versuchen von Moser, auf die später eingegangen ist, empfiehlt es sich aber, eine Probenbreite von 15 mm zu wählen, da die sich hierbei ergebenden Werte mit größerer Berechtigung verglichen werden können. Als Prüfmaschinen sind die zwei großen Typen der Pendelschlaghämmer zu verwenden, die eine Energie von 250 und 75 mkg besitzen. Da das Ergebnis der Untersuchung von der Geschwindigkeit des Bären beim Auftreffen auf die Probe abhängt, ist zu empfehlen, stets mit gleicher, möglichst mit der für den Hammer vorgeschriebenen größten Fallhöhe zu arbeiten.

Die Entfernung der Auflager für die Probe ist 120 mm, so daß die 160 mm lange Probe auf beiden Seiten 20 mm aufliegt. Bei der Durchführung ist darauf zu achten, daß die Kerbe genau in der Mitte liegt, so daß die Schneide des Hammers, die einen Winkel von  $45^\circ$  haben soll, genau gegenüber dem Kerb aufschlägt.

Bei Verwendung des kleinen Pendelschlaghammers sind kleinere Proben von  $10 \times 10$  mm Querschnitt und 100 mm Länge vorgeschrieben bei 70 mm Auflageentfernung. Als Kerbe ist für die kleinen Proben ein 2 mm tiefer,  $45^\circ$  spitzer Einschnitt vorgesehen.

Als Maß für die Beurteilung der Werkstoffe nach der Kerbschlagprobe gilt im allgemeinen die spezifische Schlagarbeit, d. h. die für  $1 \text{ cm}^2$  des zerstörten Querschnitts verbrauchte Arbeit (DIN 1350). Die hiermit gekennzeichnete Eigenschaft bezeichnete man mit Kerbzähigkeit. Die spezifische Schlagarbeit  $K$  ergibt sich also aus der Formel:

$$K = A/b \cdot h \text{ mkg/cm}^2,$$

wenn  $A$  die verbrauchte Arbeit,  $b$  die Breite und  $h$  die Höhe des Querschnittes bedeuten.

Bei dieser Auswertung wurde also in keiner Weise der oben erwähnten Vorgänge im Werkstoff, auf denen die Wirkung der Kerbe beruht, Rechnung getragen, sondern die falsche Voraussetzung gemacht, daß die Arbeit lediglich zum Trennen des Querschnittes verbraucht würde. Die Unrichtigkeit dieser Auswertung ergibt sich schon daraus, daß die verbrauchte Arbeit in keinem gesetzmäßigen Verhältnis zum Querschnitt steht, denn sie nimmt keineswegs mit dem Querschnitt gleichmäßig zu, und verändert sich auch bedeutend, wenn das Verhältnis  $b/h$  verändert wird. Die Ungesetzmäßigkeit der Resultate war einer der Hauptgründe dafür, daß die Kerbschlagprobe als Abnahmeprüfung keinen Eingang finden konnte. Trotzdem hat aber die Bestimmung der

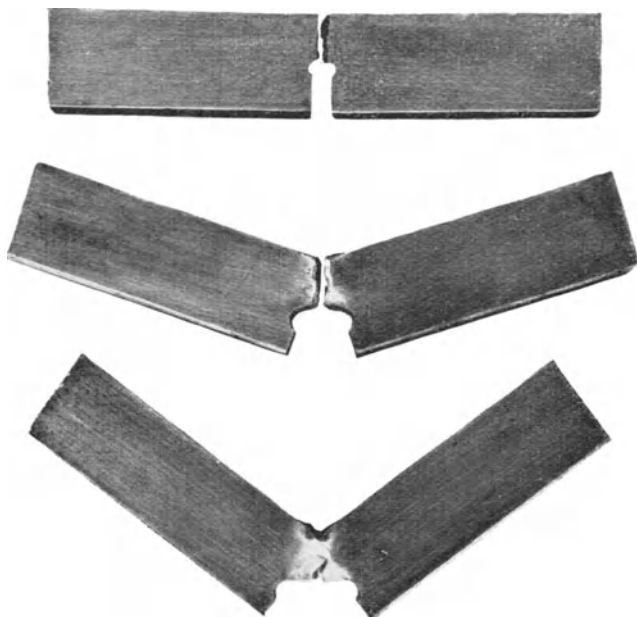


Fig. 40. Kerbschlagproben aus Kohlenstoff-, Mangan- und Chromnickelstahl.

Kerbzähigkeit praktisch schon eine große Bedeutung, denn wenn die Versuche immer unter gleichen Verhältnissen durchgeführt werden, kann man aus ihnen schon wichtige Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Baustoffe machen.

Die Stähle, deren Zerreißdiagramm nach Fig. 17 gleiche Bruchfestigkeit und Bruchdehnung zeigen, ergeben z. B. bei der einfachen Biegeprüfung das gleiche Resultat. Alle drei Proben lassen sich bis zum Aufliegen der Schenkel zusammenbiegen ohne zu brechen. Die Kerbschlagprobe dagegen ergab, daß der C-Stahl nur eine Kerbzähigkeit von  $4 \text{ mkg/cm}^2$ , der Mn-Stahl eine solche von  $12 \text{ mkg/cm}^2$  und der Chromnickelstahl sogar eine solche von mehr als  $25 \text{ mkg/cm}^2$  besaß, wobei

der C-Stahl ohne Durchbiegung und der Mn-Stahl mit geringer Durchbiegung zerbrachen (vgl. Fig. 40), der Chromnickelstahl aber auch hierbei noch nicht völlig zerbrach. Es zeigte sich also auf jeden Fall, die größere Widerstandsfähigkeit des hochlegierten Stahls gegen Stöße und Kerben, die aus den statischen Festigkeitseigenschaften nicht zu ersehen war. Wenn für die Bewertung die Grenzen nicht zu eng gezogen werden, und die Prüfung immer unter denselben Verhältnissen durchgeführt wird, kann also die Kerbzähigkeit schon gute Hinweise für die Verwendbarkeit der Baustoffe liefern.

In der Tabelle 10 sind eine Reihe von Untersuchungsergebnissen zusammengestellt, aus denen hervorgeht, daß auch die Dehnung in keiner Weise einen Rückschluß auf die Kerbzähigkeit erlaubt. Durch ungeeignete Warmbehandlung beim Schmieden oder Vergüten, durch Kaltreckung oder durch ungeeignete Zusammensetzung werden oft die statischen Festigkeitseigenschaften nicht wesentlich ungünstig beeinflusst, während die Kerbzähigkeit bis auf  $\frac{1}{10}$  ihres normalen Wertes sinken kann. Die Tabelle zeigt ferner bei den letzten drei Stählen, daß auch Werkstoffe mit geringer Dehnung, die man also als spröde anzusprechen geneigt wäre, genügende Kerbzähigkeit besitzen können.

Tabelle 10. Zugfestigkeit und Kerbzähigkeit.

	$\sigma_{Str}$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup>	$\delta$ %	$\varphi$ %	Kerbzähigkeit	
					gemessen kg/cm <sup>2</sup>	normal kg/cm <sup>2</sup>
Weicher Flußstahl geschmiedet . . . . .	{ 27,5 22,2	{ 53,5 36,8	{ 25,4 28,5	{ 45,5 64,1	{ 2,5 1,2	{ > 6 > 10
Stahlguß . . . . .	{ 25,7 20,2	{ 53,6 41,4	{ 16 22,5	{ 40,3 33,4	{ 1,67 1,24	{ > 6 > 10
Harter Flußstahl geschmiedet . . . . .	42,3	76,7	16,2	33	1,01	> 6
Gezogener Stahl . . . . .	59,7	62,1	8,9	51,3	11,7	—
Flußstahl geschmiedet . . . . .	34	60	7	9,95	5,59	—
Legierter Stahl . . . . .	40,5	58,4	12,5	27,7	16	—

Die in der Tabelle angegebenen normalen Kerbzähigkeiten können jedoch nicht ohne weiteres für jede Prüfung bei der Beurteilung zugrunde gelegt werden. Für derartige Versuche ist möglichst auf Grund eigener Untersuchungsergebnisse eine Übersicht zusammenzustellen, da die Ergebnisse von den jeweiligen Bedingungen, wie dem verwendeten Pendelschlagwerk, der Schlaggeschwindigkeit und der Probengröße abhängig sind.

Für den Konstrukteur bietet die Kerbschlagprobe allerdings keine Unterlage für seine Berechnung, denn es ist nicht möglich, aus den Versuchswerten die zulässigen Stöße bei anderen Querschnitten und anderen Kerben, sowie anderen Aufschlaggeschwindigkeiten zu berechnen oder auch nur zu schätzen. Der Konstrukteur bleibt bei der Dimensionierung bei stoßartigen Beanspruchungen noch auf seine praktischen Erfahrungen angewiesen. Die Bestimmung der Kerbzähigkeit in dieser einfachen Form ist also nur ein rohes, aber trotzdem sehr wertvolles Mittel zur Überwachung der Baustoffe.

Um dem Wesen der Kerbschlagprobe bei der Auswertung nahezukommen, ist es erforderlich, die Spannungsverteilung beim Schlag zu berücksichtigen, d. h. die durch den Schlag beanspruchten Raumteile zu erfassen; denn die verbrauchte Arbeit wird ja nicht von dem Bruchquerschnitt, sondern von dem verformten Werkstoffvolumen aufgenommen. In der zerschlagenen Probe läßt sich nun der nur elastisch verformte Raumteil nicht mehr bestimmen. Wohl aber angenähert der über die Streckgrenze beanspruchte. Denn dieser sog. Fließraum ist auf der

Oberfläche erkenntlich (vgl. Fig. 40). Bei C-Stählen genügt es, wenn die Probe vor dem Versuch mit feinem Schmirgelpapier blank gerieben wird, um diese Teile erkennen zu können. Andernfalls ist es nötig, die Kraftwirkungslinien durch das Frysche Ätzungsmittel kenntlich zu machen, worauf später noch näher eingegangen ist. Bei hochlegierten Stählen läßt sich dieser Raumanteil bei schwacher Vergrößerung daran erkennen, daß die Oberfläche dieser Teile aufgerauht ist und infolgedessen im Mikroskop dunkel erscheint.

Durch Versuche ist nun nachgewiesen, daß die für die Raumeinheit des beanspruchten Volumens verbrauchte Arbeit, nach Moser die „Raumteilcharakteristik“ bei den einzelnen Werkstoffen konstant ist, solange die Schlaggeschwindigkeit eine bestimmte Grenzgeschwindigkeit nicht überschreitet.

Bei größeren Geschwindigkeiten nimmt die verbrauchte Gesamtarbeit und auch die für die Raumeinheit aufgenommene Arbeit ab.

Bei den normalen Pendelschlagwerken erhält man bei einer 1,5 cm starken Probe von  $1,5 \times 1,5$  cm Bruchquerschnitt immer das größtmögliche beanspruchte Volumen, und durch Division die Raumteilcharakteristik  $k_v$  nach der Formel:

$$k_v = A/V \text{ (mkg/cm}^3\text{)}.$$

Ferner aber wurde von Moser der Begriff der Arbeitsschnelligkeit eingeführt, durch den die Geschwindigkeit erfaßt werden sollte, mit der ein Werkstoff eine Spannung aufnimmt. Als Maß für diese Stoffeigenschaft schlug er den Arbeitsschnelligkeitsgrad vor, der das Verhältnis des bei der Grenzgeschwindigkeit verformten Materialvolumens zu dem tatsächlich verformten Volumen einer 3 cm breiten Probe mit  $3 \cdot 1,5$  cm Bruchquerschnitt darstellt. Vgl. Fig. 41

$$a = \frac{V_3 \text{ tatsächl.}}{V_{3 \text{ max}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Auf die Gesetzmäßigkeiten und Veränderungen dieser Größe nach den bisherigen Untersuchungen näher einzugehen, erscheint verfrüht, da die vorliegenden Resultate nicht vollkommen eindeutig sind.

#### d) Die dynamische Härteprüfung.

Die weite Verbreitung, die heute die dynamische Härteprüfung gefunden hat, verdankt sie weniger dem Bedürfnis nach einer dynamischen Prüfung als dem Vorzug der schnelleren Durchführung der Untersuchung mit einfacheren Apparaten.

Bei den in der Praxis üblichen Apparaten für die dynamische Härteprüfung wird heute allgemein als eindringender Körper wie bei der Brinellprobe die Kugel verwandt. Zur Erzielung der dynamischen Belastung treibt man die Kugel entweder durch einen Schlag in das Probestück oder läßt sie aus bestimmter Höhe herabfallen. Bei der Auswertung der dynamischen Härteprüfung stößt man auf die Schwierigkeit, daß die Energie des Stoßes nicht voll zur Erzeugung des Eindruckes verbraucht wird, sondern durch einen Teil das Material elastisch verformt wird. Abgesehen von der am Schluß besprochenen Rücksprunghärte, bei der lediglich dieser Teil maßgebend ist, ist bei der dynamischen Härtebestimmung dieser Fehler nicht berücksichtigt. Zur Kennzeichnung der Werkstoffe wird vielmehr im allgemeinen die gesamte aufgewandte Arbeit entsprechend der Brinellhärte auf die Oberfläche des erzeugten Eindruckes bezogen.

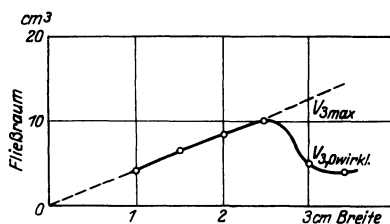


Fig. 41. Fließraum der Kerbschlagprobe in Abhängigkeit von der Probenbreite.

Nachdem sich durch Versuche ergeben hatte, daß zwischen den Ergebnissen des Kugelschlag- und des Kugeldruckversuches eine praktisch genügende Abhängigkeit besteht, so daß man auch durch die Kugelschlagprüfung die Brinellhärte bestimmen kann, haben die Kugelschlaghämmer in kurzer Zeit in die Praxis Eingang gefunden, da sie vor der Brinellpresse große Vorzüge besitzen. Sie stellen eine derartige Vereinfachung des Verfahrens gegenüber der Brinellprobe dar, daß man die Härteprüfung mit Hilfe eines Kugelschlaghammers in vielen Fällen angelernten Leuten anvertrauen kann. Die Apparate können leicht von einem Mann mitgenommen werden und gestatten ohne weiteres die Härtebestimmung an großen Werkstücken, was bei Verwendung der Brinellpresse besondere

Einrichtungen erfordert. Ferner sind die Anschaffungskosten eines Kugelschlaghammers bedeutend geringer als die einer Brinellpresse, und dabei

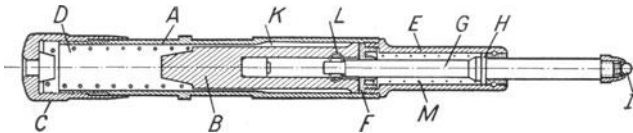


Fig. 42. Kugelschlaghammer. Bauart Graven.

sind in den meisten Fällen die Ergebnisse für die Praxis ausreichend genau. Für wissenschaftliche Untersuchungen sind allerdings die normalen Ausführungen der Kugelschlaghämmer nur nach besonderer Kontrolle verwendbar, weil hier gewöhnlich eine größere Genauigkeit erforderlich ist.

Der wohl verbreitetste Kugelschlaghammer ist der in Fig. 42 schematisch dargestellte Apparat, Bauart Graven. Die Kugel *I* ist an dem vorderen Ende eines Schlagbolzens *G* gefaßt. Beim Aufsetzen des Hammers auf das Probestück wird der Schlagbolzen *G* und der mit ihm gekuppelte Bolzen *B* gegen die Spiralfeder *D* in die Hülse *A-E* hineingeschoben. In einer bestimmten Stellung wird durch die Schräge der Hülse *A* die Kupplung zwischen dem Kolben *B* und dem Schlagbolzen *G* gelöst, und der Kolben schlägt mit der Federkraft auf den Bolzen *G* und treibt die Kugel in die Probe. Beim Abnehmen des Hammers wird der Schlagbolzen durch die Feder *M* wieder in die Kupplung gezogen, so daß der Hammer wieder betriebsfertig ist. Der Hammer leistet jedesmal dieselbe Schlagarbeit, da die Feder immer bei der gleichen Zusammendrückung gelöst wird. Der Apparat wird von der Firma geeicht und muß von Zeit zu Zeit (etwa alljährlich) an einem mitgelieferten Eichstab kontrolliert werden. Die Feder *D* läßt sich durch

Verstellen der Schlußmutter *C* leicht regulieren. Um einwandfreie Ergebnisse mit dem Hammer zu erhalten, muß lediglich darauf geachtet werden, daß der Schlag auch vollkommen von der Probe aufgenommen wird. Kleinere Stücke müssen deshalb so gelagert sein, daß sie dem Schlag nicht ausweichen können.

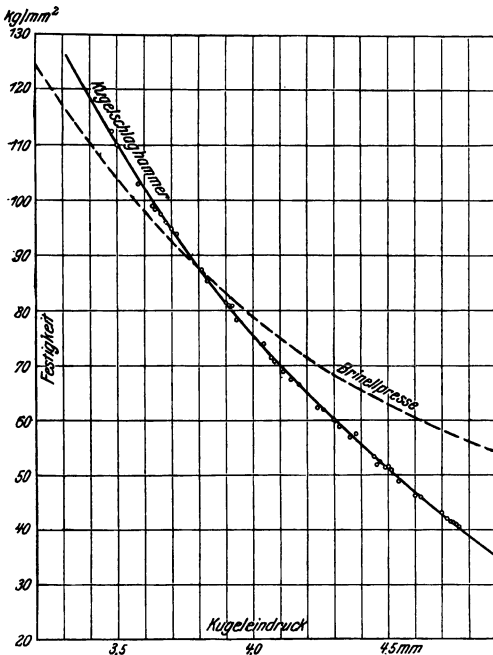


Fig. 43. Vergleich zwischen Kugelschlaghammer und Brinellpresse.

Um einwandfreie Ergebnisse mit dem Hammer zu erhalten, muß lediglich darauf geachtet werden, daß der Schlag auch vollkommen von der Probe aufgenommen wird. Kleinere Stücke müssen deshalb so gelagert sein, daß sie dem Schlag nicht ausweichen können.



Beim Vergleich der Kugeleindrücke bei der Prüfung auf der Brinellpresse, mit denen bei der Untersuchung mit dem Kugelschlaghammer zeigt sich die in der Kurve Fig. 43 für einen Hammer dargestellte Abhängigkeit. Der Kugelschlaghammer liefert bei Werkstoffen größerer Festigkeit, als für die er geeicht ist, größere Eindrücke und bei Werkstoffen mit geringerer Festigkeit kleinere Eindrücke als die Brinellpresse. Sollen also mit dem Kugelschlaghammer die Brinellhärtezahlen ziemlich genau bestimmt werden, müssen die Werte einer Kurve nach Fig. 43 entnommen werden, aus der man dann auch sofort angenähert die Zerreiβfestigkeit des Stahls bestimmen kann. Praktische Versuche haben dabei eine größte Abweichung um 2% von den mit der Brinellpresse ermittelten Werten ergeben, was für praktische Versuche bereits innerhalb der möglichen Fehlergrenzen liegt.

Eine andere Art der Schlaghärteprüfung ist die mit dem Kugelschlaghammer der Poldihütte nach Fig. 44. Bei diesem wird zwischen den Hammer *g* und die Kugel *f* ein Vergleichsstab *e* geschoben und der Hammer mit der Kugel auf das Probestück gesetzt. Durch einen kräftigen Hammerschlag mit der Hand wird dann gleichzeitig in der Probe und in dem Vergleichsstück ein Kugeleindruck erzeugt. Gemessen werden die beiden Eindruckdurchmesser. Da die Härte des Vergleichsstabes bekannt ist, kann die Härte des Probestückes einfach ermittelt werden. Zur Vereinfachung wird den Hämmerern eine Tabelle mitgegeben, aus der die Härte direkt entnommen werden kann. Diese Prüfung hat gegenüber der ersteren zwar den Nachteil, daß zwei Eindrücke gemessen werden müssen, dafür ist aber der Apparat noch kleiner, einfacher und billiger.

Beim Fallhärteprüfer nach M. v. Schwarz von Schuchardt & Schütte fällt ein auswechselbares Gewicht von 1 bzw. 0,25 kg aus 0,5 m Höhe durch ein Rohr auf eine Kugel herunter, die in dem Werkstück einen wie bei der Brinellprobe auszuwertenden Eindruck ergibt.

Eine besondere Art der dynamischen Härteprüfung bildet die Bestimmung der Rücksprunghärte mit dem Shoreschen Skleroskop. Bei dieser Prüfung wird im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren nur der durch die elastische Verformung aufgenommene Bruchteil der aufgewandten Arbeit bestimmt, der durch die Rücksprunghöhe erkennbar wird.

Fig. 45 zeigt das Skleroskop in der Bauart von Schuchardt & Schütte. Statt einer Stahlkugel wird ein 3 g schwerer zylindrischer Fallkörper benutzt, in den unten ein geschliffener Diamant eingelassen ist. Der Fallkörper fällt durch ein genau senkrecht stehendes Glasrohr, in das er luftdicht eingeschliffen ist, auf eine kleine ebene Fläche des zu prüfenden Stückes. Als Maß für die Härte gilt nach Shore die Höhe, bis zu der der Fallkörper zurückspringt. Bedingung für die Prüfung ist demgemäß, daß der Fallkörper immer genau senkrecht und aus derselben Höhe herabfällt, und daß zu Vergleichsprüfungen immer derselbe Apparat benutzt wird.

Die Rücksprunghärte ist lediglich abhängig von der Elastizität des Probestückes und des Fallkörpers, wovon letztere allerdings immer gleich bleibt. Sie entspricht also in keiner Weise der auf S. 21 gegebenen Definition der Härte und steht infolgedessen auch in keinem Verhältnis zu den Ergebnissen der übrigen Härteprüfungen. Die Messung der Rücksprunghöhe führt zu widersinnigen Er-

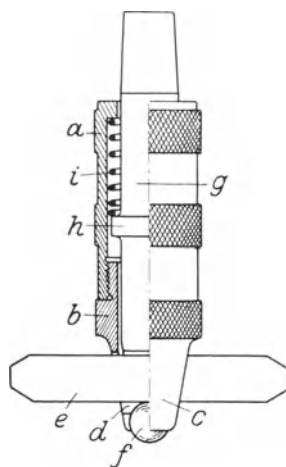


Fig. 44. Kugelschlaghammer der Poldihütte.

gebnissen, z. B. daß Gummi härter ist als Gußeisen. Das Verfahren kann also auf jeden Fall nur zur Untersuchung von sehr harten Stoffen mit ungefähr gleicher Elastizität angewandt werden. Es ist deshalb vorgeschlagen worden, die hierdurch bestimmten Werte nicht mit Härte, sondern als Rücksprungzahl zu bezeichnen. Daß die Bestimmung der Rücksprunghöhe trotzdem noch vielfach in der Praxis angewandt wird, hat seinen Grund darin, daß man in ihr ein sehr empfindliches Mittel besitzt, die Gleichmäßigkeit von Werkstoffen zu kontrollieren. Ferner hat sie den Vorteil, daß auch Stoffe mit sehr großer Härte geprüft werden können, was bei der Brinellprobe nicht möglich ist. Sie wird deshalb im Betriebe zur Auswahl von Baustoffen für hoch beanspruchte Teile, sowie zur Überwachung der Ergebnisse beim Härten, Vergüten usw. angewandt.

Ein Prüfverfahren, das sich ebenfalls von den anderen dynamischen Härteprüfungen grundsätzlich unterscheidet, ist die Härtebestimmung mit dem Pendelhärteprüfer von Herbert, die erst in den letzten Jahren bekanntgeworden ist.

Der in Fig. 46 dargestellte Apparat besteht aus einer nach unten gebogenen

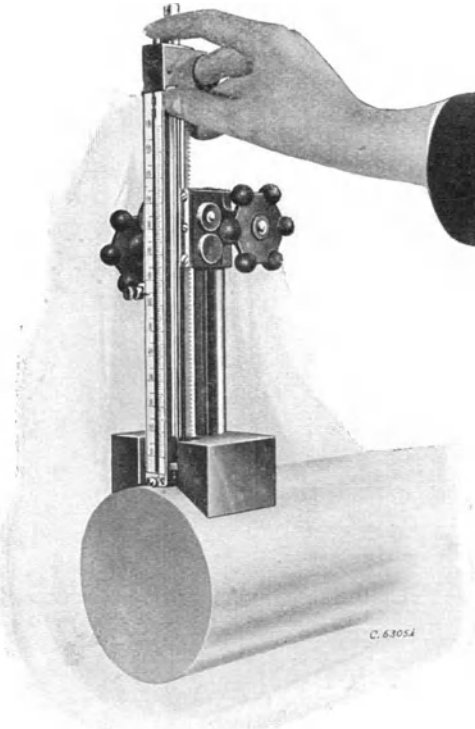


Fig. 45. Shoresches Skleroskop.



Fig. 46. Pendelhärteprüfer von Herbert.

Schwinge von 2 bzw. 4 kg Gewicht, die mit einer Stahlkugel oder einem Rubin von 1 mm Durchmesser auf das zu prüfende Werkstück gesetzt wird. Durch sechs einstellbare Gewichte wird die Schwinge genau ins indifferente Gleichgewicht gebracht. Die Kugel wird normalerweise durch eine Stellschraube so eingestellt, daß der Schwerpunkt des ganzen Systems ungefähr 0,1 mm unter dem Auflagepunkt liegt.

Mit diesem Apparat soll man zwei voneinander verschiedene Härtezahlen bestimmen können. Die sog. „Zeithärte“ bestimmt man dadurch, daß man die Schwinge durch eine leichte Feder anstößt und die Zeit für zehn Schwingungen mit der Stoppuhr bestimmt. Der hierbei in der Probe erzeugte Eindruck wird rund wie bei der Brinellprobe, und die sich hieraus ergebenden Zahlenwerte zeigen nach den Versuchen Herberts gute Übereinstimmungen mit der Brinellhärte.

Nach dem anderen Verfahren kann man mit dem Apparat die sog. „Bearbeitungshärtezah“ bestimmen. Hierzu wird die Schwinge um etwa  $45^\circ$  nach einer

Seite ausgeschwenkt und der Ausschlag nach der anderen Seite gemessen. Es ergibt sich hierbei ein länglicher Eindruck in den zu prüfenden Körper. Herbert vergleicht die Bildung des Eindruckes mit der Bearbeitung des Werkstoffes. Aus der Größe des Durchschwingungswinkels, der durch die Bewegung einer Luftblase in einem Flüssigkeitsrohr an einer Skala beobachtet wird, soll man maßgebende Rückschlüsse auf die Bearbeitbarkeit der Werkstoffe machen können. Die Ergebnisse zeigen keinen Zusammenhang mit der Brinellhärte, die wie im nächsten Abschnitt behandelt, tatsächlich in keiner einfachen Beziehung zur Bearbeitbarkeit steht. Da aber auch durch das vorliegende Prüfverfahren nicht alle Faktoren, die bei der Spanbildung maßgebend sind, erfaßt werden können, werden die Ergebnisse auch nur angenäherte Beurteilungsunterlagen darstellen.

Über die Brauchbarkeit dieser Härteprüfung läßt sich heute noch kein abschließendes Urteil fällen, da noch zu wenig Untersuchungsergebnisse vorliegen, und es muß abgewartet werden, ob sie den Anforderungen der Praxis entspricht.

#### e) Die Untersuchung der Bearbeitbarkeit.

Bereits an früherer Stelle war darauf hingewiesen, daß die statische sowohl wie die dynamische Härteprüfung gut dazu geeignet sind, gleichartige Werkstoffe zu bestimmen. Sie bieten somit dem Betriebe eine gute Handhabe zur Überwachung der Ausgangswerkstoffe, was zur Erzielung einer störungsfreien Verarbeitung von größter Wichtigkeit ist. Für die spanabhebende Bearbeitung von Stahl ist es nun noch eine bekannte Tatsache, daß er sich um so schwerer bearbeiten läßt, je härter er ist. Dies gilt jedoch nicht allgemein für alle Werkstoffe. Von der Herbertschen Bearbeitungshärtezahls sei aus dem oben erwähnten Grunde hier noch abgesehen.

Die Spanbildung ist von mehreren Faktoren abhängig, die durch keine der verschiedenen Härteuntersuchungen allein erfaßt werden. Bei der Spanbildung tritt ja nicht nur eine Verformung des Werkstoffes ein, sondern der Vorgang besteht vielmehr aus dem

Stauen eines Materialteils an der Brust des Schneidstahls, dem Einreißen, dem Abbiegen des sog. Spanelementes und dem Abbiegen der je nach der Zähigkeit des Werkstoffes größeren oder kleineren Spanlocke, die sich aus den Spanelementen zusammensetzt. Der Vorgang läßt sich ohne weiteres aus dem Verlauf der Schnittdruckkurve in Fig. 47 erkennen. Dieser Druckverlauf ist natürlich nur bei sehr geringen Schnittgeschwindigkeiten so deutlich zu erkennen, während man normalerweise lediglich einen schwingenden Verlauf der Kurve beobachtet. Jeder der einzelnen Abschnitte bei der Spanbildung hängt von einer anderen Eigenschaft des Werkstoffes ab, und auf jeden entfällt ein maßgebender Teil der verbrauchten Gesamtarbeit. Von den hierfür maßgebenden Eigenschaften steht besonders die Kerbzähigkeit in keinem Verhältnis zur Härte.

Ein Beispiel dafür, daß tatsächlich Härte und Bearbeitbarkeit sich nicht gleichmäßig verändern, bietet die Untersuchung Heyns von Messing mit verschiedenen Bleizusätzen, deren Ergebnis in Fig. 48 graphisch wiedergegeben ist. Es sind hier

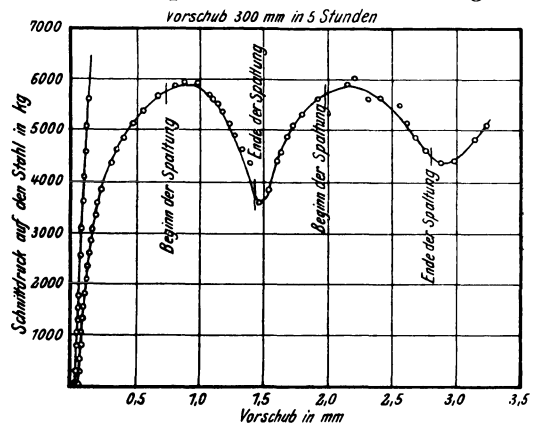


Fig. 47. Schnittdruckkurve nach Nicolson.

als Ordinaten die Härten und die Lochtiefen nach 100 Umdrehungen eines Bohrers bei gleicher Belastung bei steigenden Bleizusätzen gegenübergestellt. Während die Härte nahezu unverändert bleibt, nehmen die Lochtiefen bei gleicher Bohrleistung bedeutend zu. Es ist also bei Messing die Härte kein Maß für die Bearbeitbarkeit. Trotz solcher Erkenntnisse ist noch in neuester Zeit durch Zusammenfassung der bisher vorliegenden Untersuchungen über die Bearbeitbarkeit versucht worden, den Schnittdruck verschiedener Werkstoffe in bestimmte Abhängigkeit zur Härte zu stellen. Hiernach soll der Schnittdruck  $P$  bei Stahl für einen Spanquerschnitt von  $1 \text{ mm}^2$  folgender einfachen Formel entsprechen:

$$P = 2,5 \div 3 \sqrt{H \cdot \beta} \quad (\beta = \text{Meißelwinkel}).$$

Die Formel für den Gesamtschnittdruck ist jedoch bereits eine ziemlich komplizierte Exponentialgleichung mit fünf vom Werkstoff abhängigen Konstanten.

Um sich ein wirklich einwandfreies Bild von der Bearbeitbarkeit der Werkstoffe zu verschaffen, ist die Durchführung von Bearbeitungsversuchen zu empfehlen. Schon lange bekannt ist hierfür der Härtebohrversuch. Bei diesem läßt man einen bestimmt geschliffenen Bohrer mit konstanter Belastung in das Probestück eindringen und nimmt im Diagramm die Eindringtiefe des Bohrers in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl auf (vgl. Fig. 49). Als Vergleichsmaß gilt entweder die Bohrtiefe nach 100 Umdrehungen bei gleichem Bohrer und gleicher Belastung oder der Neigungswinkel der Kurve. Der Versuch kann auf einer besonderen Maschine oder mit Hilfe einer Vorrichtung auf jeder beliebigen Bohrmaschine durchgeführt werden.

Genauer sind die Untersuchungen mit den in neuerer Zeit auf den Markt gekommenen Meßsupporten. Fig. 50 zeigt z. B. ein so erhaltenes Diagramm des Schnittdruckes beim Durchbohren einer 30 mm starken Holzplatte. Mit dem Versuchsbohr Tisch nach Fig. 51, der auf jeder Bohrmaschine verwandt werden kann,

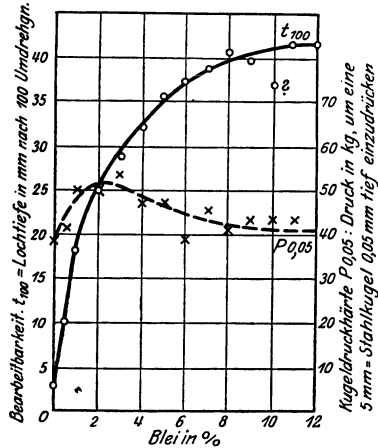


Fig. 48. Bearbeitbarkeit und Härte bei Messing mit verschiedenen Bleizusätzen.

werden sogar gleichzeitig Bohrdruck und Drehmoment selbsttätig aufgezeichnet. Bei der Durchführung von Drehversuchen sind jedoch drei Druckkomponenten zu beachten, wie aus Fig. 52 zu ersehen ist. Solange der Schneidstahl scharf ist, sind die wagerechten Druckkomponenten  $P_2$  und  $P_3$  erheblich kleiner als der Hauptschnittdruck  $P_1$ . Sie wachsen aber stark an, sobald der Stahl stumpf wird. Für die Untersuchung der Bearbeitbarkeit eines Materials genügt es daher in den meisten Fällen, den Hauptschnittdruck  $P_1$  zu bestimmen. Um jedoch die Lebensdauer von Schneidstählen zu prüfen, genügt es andererseits, die Komponenten  $P_2$  und  $P_3$  zu beobachten und den Zeit-

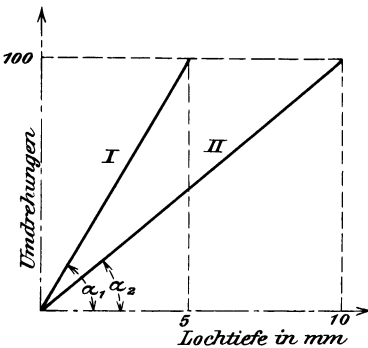


Fig. 49.

werden sogar gleichzeitig Bohrdruck und Drehmoment selbsttätig aufgezeichnet.

Bei der Durchführung von Drehversuchen sind jedoch drei Druckkomponenten zu beachten, wie aus Fig. 52 zu ersehen ist.

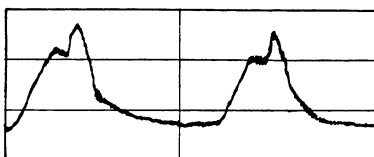


Fig. 50. Schnittdruck bei einem Bohrversuch in Holz.

zu bestimmen. Um jedoch die Lebensdauer von Schneidstählen zu prüfen, genügt es andererseits, die Komponenten  $P_2$  und  $P_3$  zu beobachten und den Zeit-

punkt zu bestimmen, bei dem diese stark anwachsen, das sog. Schlesingersche Kriterium. Für derartige Untersuchungen benutzt man Meßsupporte, bei denen die Drucke sowohl registriert als auch durch Meßdosens jederzeit angezeigt werden.

Derartige Bearbeitungsversuche ermöglichen es einmal, den Schneidwiderstand der Werkstoffe zu bestimmen, ferner kann man nach ihnen die Werkstoffe und Formen der Werkzeuge sowie die Beanspruchung der Maschine beurteilen. Sie ermöglichen es, die günstigsten Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe sowie die Wirtschaftlichkeit von Werkzeugen und Maschinen zu berechnen.

#### f) Die dynamischen Dauerversuche.

In Konstruktionsteilen tritt die Art der Beanspruchung, der der Werkstoff bei den bisher beschriebenen Prüfungsverfahren unterworfen wird, fast nie auf. So wohl statische Belastung, wie einmalige Stöße sind praktisch sehr selten. Bei allen Konstruktionsteilen muß man mit Verschiebungen der Spannung oder Schwingungen rechnen. Bei Maschinen sind diese Erscheinungen überhaupt unvermeidbar, denn die Kräfte der Maschine werden ja nicht allein von den sich drehenden Teilen aufgenommen, sondern von diesen auf die festen Teile, wie Rahmen und Fundamente, übertragen.

Für die Auswahl von Werkstoffen und die Dimensionierung der Konstruktionsteile ist es daher von größter Bedeutung, über das Verhalten der verschiedenen Werkstoffe bei derartigen Spannungsänderungen Aufklärung zu erhalten.

Wenn man einen Probestab in der Zerreißmaschine bis über seine Streckgrenze

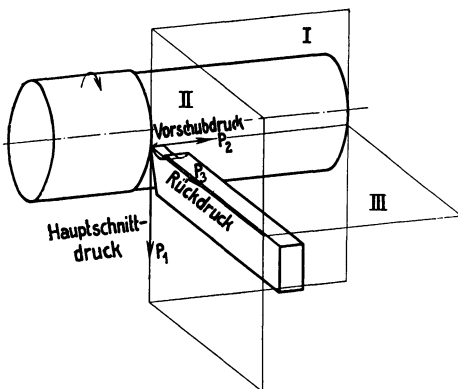


Fig. 52. Komponenten des Schnittdruckes.



Fig. 51. Versuchsbohrtisch (Losenhausen).

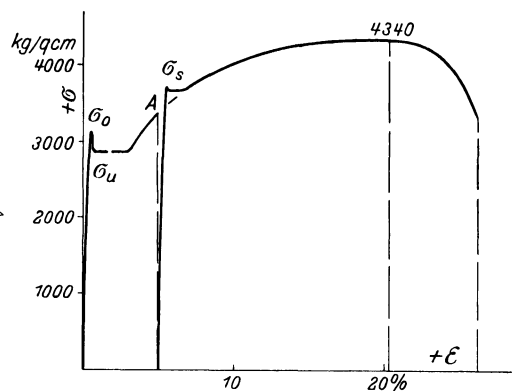


Fig. 53. Zerreißdiagramm mit einer Entlastung.

beispielsweise mit der Spannung  $A$  (Fig. 53) belastet und dann den Stab wieder entlastet, so nimmt der Probestab nicht wieder seine ursprüngliche Länge an, sondern er verkürzt sich beim Entlasten nur um einen geringen Bruchteil der gesamten Dehnung, die er während der Belastung erfahren hat, um die sog. elastische

Dehnung. Man bezeichnet derartige Formänderungen, wie sie praktisch beim Ziehen, Pressen, Biegen usw. vorkommen, mit Kaltreckungen. Belastet man jetzt den Probestab wieder, so tritt die Streckgrenze  $\sigma_p$  bei einer Spannung auf, die höher liegt als die vorige Streckgrenze und höher als die Spannung  $A$ , mit der der Stab vorher belastet war.

Durch derartige Versuche ist nachgewiesen, daß eine Belastung von Stahlstäben über die Streckgrenze und darauf folgendes Entlasten eine Steigerung der Proportionalitätsgrenze, Streckgrenze und Bruchspannung zur Folge hat. Belastet man dagegen einen Probestab bis zu einer Spannung, die unter der Proportionalitätsgrenze liegt und entlastet wieder, so zeigt der Stab beim folgenden Zerreißversuch eine tieferliegende Proportionalitäts- und Streckgrenze als zu Beginn. Die Proportionalitätsgrenze sinkt oft sogar bis auf Null. Läßt man jedoch den Stab nach der Belastung längere Zeit im entlasteten Zustande ruhen, so erholt sich der Werkstoff und die Proportionalitätsgrenze erreicht allmählich wieder ihren normalen Wert. Dasselbe kann man erreichen, wenn man den Werkstoff starken Erschütterungen aussetzt.

Von Bedeutung für Spannungsänderungen im Werkstoff ist ferner die damit verbundene Veränderung der Dehnung. Wenn ein Stab beim Zerreißversuch belastet wird, so stellt sich nicht sofort ein Gleichgewichtszustand ein, sondern der Stab dehnt sich noch längere Zeit nach der Belastung um geringe Beträge. Ebenso beobachtet man, daß beim plötzlichen Entlasten eines belasteten Stabes die elastische Dehnung nicht plötzlich mit der Kraft zurückgeht, sondern ein Rest der Dehnung geht erst sehr allmählich zurück, die sog. elastische Nachwirkung. Man kann diese Nachwirkung der Belastung noch nach Stunden und selbst nach Tagen nachweisen. Bei der Entlastung eines Stabes kann man also drei Arten von Dehnung feststellen:

1. Die rein elastische Dehnung, um die der Stab bei der Entlastung sofort zurückgeht.
2. Die elastische Nachwirkung, die im Laufe längerer Zeit in Erscheinung tritt.
3. Die bleibende Verlängerung.

Bei der Beobachtung des Werkstoffes bei wechselnden Belastungen sind die elastische Nachwirkung und die bleibende Dehnung von Bedeutung. Z. B. für den Fall, daß ein auf Zug beanspruchter Stahl entlastet wird und sofort auf Druck

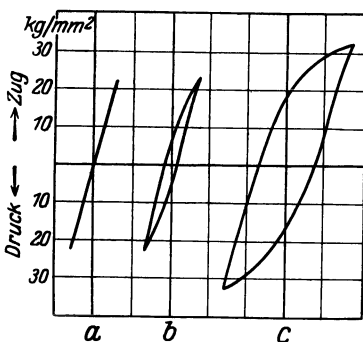


Fig. 54. Hysteresisschleifen bei Belastungswechseln (Lehr).

beansprucht wird, oder daß ein Stab wechselnd nach links oder rechts verdreht wird. Die sich bei wechselnden Zug- und Druckbeanspruchungen ergebenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme zeigt Fig. 54a ; c. Im Falle a ist nur rein elastische Deformation eingetreten. Es ergibt sich infolgedessen beim Belastungswechsel ein gerader Verlauf der Spannungs-Dehnungskurve. Im Falle b hat der Stab bei der Entlastung nicht mehr die ursprüngliche Länge erreicht und im Falle c ist die noch vorhandene Deformation beim Belastungswechsel noch größer. Durch die erste Spannung in entgegengesetzter Richtung muß infolgedessen bei diesen Versuchen zunächst die gebliebene Deformation der vorhergehenden Beanspruchung aufgehoben werden. Im Diagramm bildet sich dadurch eine Schleife, die der Magnetisierungskurve ähnlich sieht, und die man deshalb auch mit Hysteresis-Schleife bezeichnet. Je nachdem, ob hierbei die Breite der Fläche nur durch die elastische Nachwirkung oder durch die plastische Deformation des Werk-

stoffes entsteht, unterscheidet man hierbei zwischen einer elastischen und einer plastischen Hysteresis-Schleife. Da sich bei der Belastung die volle Dehnung erst nach einiger Zeit einstellt, und da die elastische Nachwirkung nach der Entlastung ebenfalls Zeit erfordert, hängt die Fläche der Schleife natürlich stark von der Geschwindigkeit der Belastungswechsel ab.

Bei den dynamischen Dauerversuchen wird der Werkstoff bei Änderungen der Zug-, Druck-, Biegungs- oder Drehungsbeanspruchung geprüft. Die Spannungen können hierbei entweder von einem Höchstwert auf Null sinken und wieder wachsen, oder sie können von einem Höchstwert über Null auf einen entgegengesetzten Höchstwert steigen und wieder umkehren. Ferner können sich hierbei die Spannungen entweder stoßartig oder allmählich ändern.

Das Ziel aller Untersuchungen ist die Bestimmung des Spannungshöchstwertes, auf den die Spannung unendlich oft anwachsen kann, ohne daß der Werkstoff zerbricht, die sog. „Arbeitsfestigkeit“. Nach den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen genügt es hierzu bei Stoffen, wie Stahl, Messing und vielen anderen, zu bestimmen, bei welchen Spannungsänderungen die Probe 10 Mill. Wechsel aushält.

Als „Schwingungsfestigkeit“ oder „Dauerfestigkeit“ bezeichnet man die größte Spannung, mit der der Werkstoff dauernd wechselweise auf Zug und Druck beansprucht werden kann. Der Spannungshöchstwert, auf den die Spannung von Null unendlich oft anwachsen kann, ohne daß die Probe zerbricht, heißt Ursprungsfestigkeit.

Die ältere Art der Bestimmung der Dauerschlagfestigkeit wurde auf dem Dauerschlagwerk durchgeführt. Eine solche Maschine der Bauart Krupp zeigt Fig. 55. Sie besteht im wesentlichen aus einem Hammer von 4,185 kg Gewicht, der von einer Nockenscheibe um etwa 30 mm gehoben wird und auf die Probe herabfällt. Die Anzahl der Schläge kann zwischen 60 und 120 in der Minute reguliert werden. Mit der Nockenwelle ist ein Zählwerk verbunden. Da beim Zerbrechen der Proben die Maschine automatisch stillgesetzt wird, ist für die Prüfung keine besondere Beobachtung erforderlich.

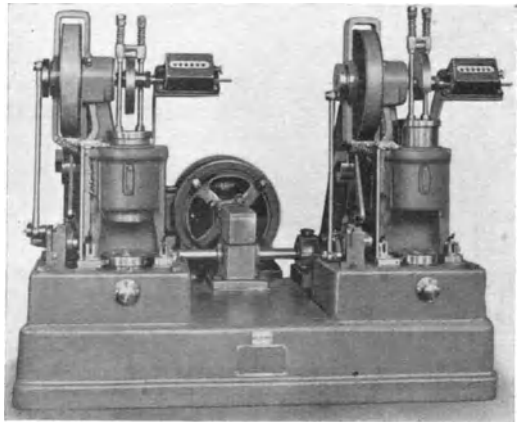


Fig. 55. Doppeldauerschlagwerk, Bauart Krupp (Mohr & Federhaff).

Um die zylindrischen Proben in wechselnden Richtungen zu beanspruchen, kann die Probe nach jedem Schlag durch eine besondere Vorrichtung ruckweise um einen einstellbaren Winkel gedreht werden. Die für die Prüfung vorgeschriebenen zylindrischen Proben besitzen in der Mitte einen einfachen Rundkerb, wodurch eine Verschärfung der Prüfung erzielt wird.

Der durch diese Beanspruchung erhaltene Bruch entspricht in seinem Aussehen dem Bruch von Wellen, die ohne vorher merkliche Formänderung zu zeigen, im Betriebe gebrochen sind. In Fig. 56 ist z. B. die Bruchfläche einer Automobilachse wiedergegeben. Die Bruchfläche hat auf dem größten Teil ein feinkörniges, fast glattes Aussehen, und nur in der Mitte einen Streifen mit normalem Bruchkorn. Die Entstehung dieses verschiedenen Aussehens der Bruchfläche ist folgendermaßen zu erklären: Durch die Stoßbeanspruchung ist die Welle zunächst oben und

unten am Rande, wo sie am stärksten beansprucht wird, eingerissen. Von hier aus ist dann der Bruch allmählich infolge der Kerbwirkung dieser Stelle fortgeschritten. Durch die mit jedem Schlag verbundene Formänderung sind die bereits entstandenen Bruchflächen bei jedem Schlag aufeinandergedrückt, und die Spitzen der Flächen dabei aneinander abgeschliffen, so daß sie das glatte Aussehen bekamen. Die rauhe Bruchfläche entspricht dann dem Teil des Werkstoffes, der schließlich beim letzten Schlag zerstört ist. Der vorliegende Bruch ist gleichzeitig ein Beispiel für die Kerbwirkung von Absätzen ohne genügende Abrundung. Aus der Verteilung der beiden Bruchflächen läßt sich sofort der Ausgangspunkt des Bruches und die Richtung der Stöße erkennen. Die Art der Beanspruchung bei der Dauerschlagprüfung entspricht aber nur ganz bestimmten praktischen Verhältnissen. Ferner sind die Ergebnisse stark abhängig von der gewählten Kerbform. Infolgedessen können die hierdurch erhaltenen Werte für die Beurteilung der Werkstoffe und die Berechnung von Konstruktionsteilen nur selten benutzt werden.

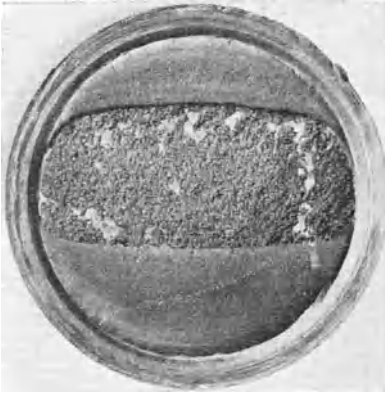


Fig. 56. Bruchfläche einer Automobilachse.

Zur Bestimmung der Arbeitsfestigkeit wird die Probe einer gleichmäßig wechselnden Belastung bei verschiedenen Spannungshöchstwerten unterworfen. Nach Wöhler werden die Anzahl der Lastwechsel, die eine Probe bei verschiedenen Spannungen bis zum Bruch ausgehalten hat, in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung in ein Koordinatensfeld eingetragen. Es ergibt sich dann eine Kurve, wie sie in Fig. 57 dargestellt ist. Aus den bisher vorliegenden

Nach Wöhler werden die Anzahl der Lastwechsel, die eine Probe bei verschiedenen Spannungen bis zum Bruch ausgehalten hat, in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung in ein Koordinatensfeld eingetragen. Es ergibt sich dann eine Kurve, wie sie in Fig. 57 dargestellt ist. Aus den bisher vorliegenden

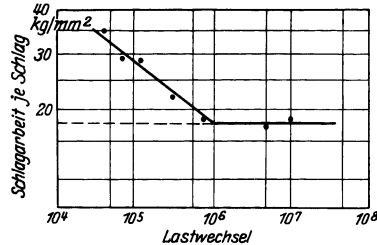
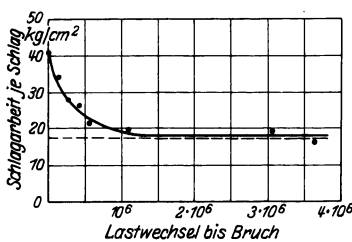


Fig. 57 u. 58. Bestimmung der Arbeitsfestigkeit.

Versuchsergebnissen läßt sich schließen, daß die Kurven der Metalle sich vor 10 Mill. Lastwechsel asymptotisch der Wagerechten nähern, d. h. daß die Metalle die Spannung, die sie während 10 Mill. Lastwechsel ausgehalten haben, auch unendlich oft aushalten. Die Spannung, die dieser Tangente in Richtung der Abszisse an die Kurve entspricht, ist also die Arbeitsfestigkeit. Deutlicher wird das Abbiegen der Kurve, wenn man die Werte in ein logarithmisches Koordinatensystem einträgt. Hier tritt ein deutlicher Knick im Verlauf der Kurven auf, wie Fig. 58 zeigt.

Nach den bisherigen, bereits ziemlich zahlreichen Versuchen ist der gerade Verlauf der Kurven über 10 Mill. Lastwechsel nur bei Leichtmetallen und Cu, die keine ausgeprägte Elastizitätsgrenze besitzen, nicht bestätigt worden.

Diese Art der Prüfung hat für praktische Untersuchungen den großen Nachteil, daß für jede Materialprüfung 8 : 10 Probestäbe bis zum Bruch untersucht werden müssen. Bei Verwendung der älteren Prüfmaschinen, auf die hier nicht weiter



eingegangen ist, war hierzu eine Zeit von mindestens einer Woche nötig. Für Abnahme- und Kontrolluntersuchungen kam die Prüfung also gar nicht in Frage.

Von verschiedenen Seiten ist deshalb der Versuch gemacht worden, aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen einen gewissen Zusammenhang der Arbeitsfestigkeit mit den Werten des Zerreißversuches zu finden. Stribeck stellte z. B. die Beziehung auf,  $\sigma_{\text{Dauer}} = 0,57^{1/2} (\sigma_{\text{Str}} + \sigma_B)$ .

Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der Untersuchungen zeigt sich aber, daß das Verhältnis zwischen den Werten nach dieser Formel und den wahren Spannungen ebenso wie das Verhältnis zu der Streck- oder Bruchspannung allein um etwa 40% schwankt.

Die neuen Verfahren zur Bestimmung der Dauerfestigkeit beruhen darauf, daß bei der Belastung eines an den Enden gelagerten Prfstabes die unteren Fasern auf Zug, und die oberen auf Druck beansprucht werden. Rotiert nun der Stab unter der Belastung, so werden nach einer Drehung um  $180^\circ$  die vorher auf Zug beanspruchten Fasern auf Druck beansprucht. Während der Drehung ist also in den Fasern ein allmählicher Spannungswechsel eingetreten. Durch die Anzahl der Umdrehungen läßt sich somit auf einfache Weise die Anzahl der Spannungswechsel in den Fasern regulieren. Der Unterschied zwischen der Zugdruckbelastung und der wechselnden Biegungsbeanspruchung liegt darin, daß bei der ersteren die Spannung gleichmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt ist, während bei der Biegebeanspruchung die Spannung in den Fasern zur Oberfläche hin größer wird. Die Art des Spannungswechsels durch Umlaufen einer auf Biegung beanspruchten Probe tritt praktisch in jeder belasteten Welle und jedem Zapfen auf.

Nach einem neuen Verfahren von Lehr brauchen jetzt auch nicht mehr mehrere Probestäbe mit verschiedenen Belastungen bis zum Bruch untersucht zu werden, sondern die Arbeitsfestigkeit kann bereits mit großer Annäherung an einem Probestab bestimmt werden. Man mißt bei der Durchführung des Versuches die von dem Probestab aufgenommene Leistung, die der Hysteresis-Arbeit entspricht. Die Leistungskurve steigt, wie in Fig. 59, anfangs sehr langsam und proportional der Belastung. Bei einer bestimmten Spannung steigt sie dann aber schneller und ergibt ungefähr parabolischen Verlauf. Ferner bestimmt man durch Thermoelemente und empfindliche Millivoltmeter die Temperaturen der Probe bei verschiedenen Belastungen. Man geht hierbei von einer auch beim Zerreißversuch gemachten Erfahrung aus: Beim Belasten des Stabes sinkt zunächst die Temperatur des Werkstoffes unter die Anfangstemperatur, solange die Spannung unter der Elastizitätsgrenze liegt, bei Belastungen oberhalb der Streckgrenze dagegen erwärmt sich der Stab wieder und nimmt schließlich eine höhere Temperatur an als seine Umgebung. Bei Dauerbiegeprfungen beobachtet man ebenfalls, daß

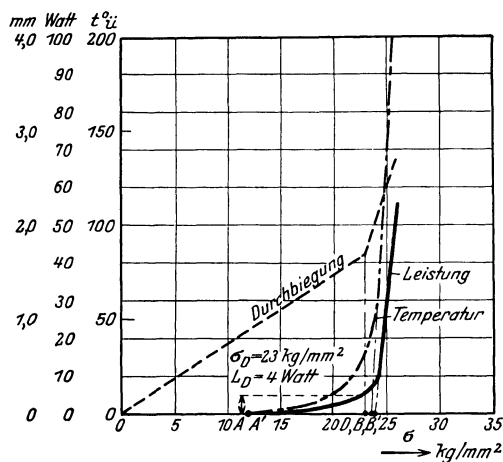


Fig. 59. Diagramm-Charakteristik eines gehärteten S. M. Stahls ( $\sigma_B = 55 \text{ kg/mm}^2$ ); Dauerbiegefestigkeit  $\sigma_D = 23 \text{ kg/mm}^2$ .

von einer bestimmten Spannung an die Temperatur zuerst allmählich und dann immer stärker steigt. Bei Stahl verläuft die Temperaturkurve schließlich in gerader Richtung steil nach oben, wie es aus Fig. 59 zu ersehen ist. Schließlich bestimmt man bei diesem Verfahren noch die Durchbiegungen bei verschiedenen Belastungen. In der graphischen Darstellung dieser Werte ergibt sich bei den meisten Metallen bei einer bestimmten Biegungsspannung ein deutlicher Knick in dem Verlauf der Kurve, nach dem die Durchbiegungen bei höheren Belastungen stärker anwachsen als vorher. Legt man nun an die Temperatur- und Leistungskurve Tangenten, so zeigt sich bei den meisten Metallen, daß die Schnittpunkte mit der Abszisse und die Ordinate, von der ab die Durchbiegung stärker anwächst, ungefähr die gleiche Spannung angeben. Diese Spannung kann praktisch als Ermüdungsfestigkeit betrachtet werden.

Bis diese abgekürzte Prüfung als wissenschaftliches Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Dauerfestigkeit allgemein anerkannt wird, bedarf es zwar noch vielseitiger Untersuchungen, die die bisherigen Resultate bestätigen. Dies gilt besonders für die Prüfung von Nichteisenermetallen, wo in verschiedenen Fällen Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Kurven festgestellt sind. Für die Praxis kann aber schon jetzt, insbesondere für die Untersuchung von Stahl, dieses verkürzte Prüfverfahren als sehr aussichtsreich und maßgebend bezeichnet werden. Denn der Konstrukteur muß auch bei höchstbeanspruchten Teilen immer mit einem Sicherheitsfaktor rechnen, um den Einfluß von Werkstoffehlern, Querschnittsänderungen usw. zu berücksichtigen, die sich rechnerisch nicht erfassen lassen. Infolgedessen wird die den Konstruktionen zugrunde liegende zulässige Beanspruchung immer noch außerhalb der Fehlergrenzen des Prüfverfahrens liegen, so daß es eine nutzlose Verteuerung der Werkstoffuntersuchung bedeuten würde, wenn man die Dauerfestigkeit durch langwierige Versuche aufs genaueste bestimmen wollte.

In der Tabelle 11 sind einige Ergebnisse solcher Dauerfestigkeitsuntersuchungen zusammengestellt:

Tabelle 11. Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit.

	$\sigma_B$	$\sigma_{St}$	$\delta$	$\sigma_{Dauer}$
Siemens-Martin-Stahl 0,25 : 0,32% C vergütet . . . . .	61,5	47,4	23	31,5
Chromnickelstahl 0,15 C, 0,29 Mn, 0,66 Cr, 3,86 Ni vergütet	72	66	12	42
Chromnickelstahl 0,12 : 0,16 C, 4,3 : 5 Ni, 0, : 81,2 Cr vergütet . . . . .	90,8	84,7	19,5	60
Kupfer hart gezogen . . . . .	31,5	29	10	9
Messing 70 Cu, 30 Zn gezogen . . . . .	47	33	13	16
Aluminium BT 728 Anlieferung . . . . .	13,3	11	10,5	5,5
Dural BT 699 Anlieferung . . . . .	38	22	35	14,5
Elektron . . . . .	23	—	18	9

Die angegebenen Werte lassen erkennen, daß zwischen der Streckgrenze und Dehnung nach dem statischen Versuch und der Dauerfestigkeit kein Zusammenhang besteht. Durch andere Versuche ist aber auch festgestellt, daß sie keinen Zusammenhang besitzt mit der Kerbzähigkeit. Die Bestimmung der Dauerfestigkeit erübrigt also keineswegs die Durchführung der Kerbschlagprobe. Für Baustoffe, die im Betriebe derartigen Beanspruchungen unterworfen sind, ist es also nötig, beide Untersuchungen durchzuführen, und es ist deshalb nach wie vor eine dringende Forderung, daß die Untersuchung der Kerbzähigkeit einwandfrei geklärt wird.

## B. Technologische Prüfungen.

Bei den bisher besprochenen wissenschaftlichen Werkstoffuntersuchungen war es das Ziel, die Größe der Beanspruchungen und den Widerstand der Werkstoffe bei den verschiedenen Beanspruchungsarten zahlenmäßig gegenüberzustellen. Zur Beurteilung wurden dann die so festgestellten Eigenschaften auf Längen-, Flächen- oder Volumeneinheit bezogen. Die Werte hatten infolgedessen, wie angegeben, auch mehr oder minder große Bedeutung für den Konstrukteur als Unterlagen für die Berechnung der erforderlichen Dimension seiner Werkstücke. Dieses Ziel der Untersuchungen erforderte bei der Prüfung der Werkstoffe mechanisch möglichst einfache Spannungsverhältnisse und stets gleiche Bedingungen für Probestück und Prüfeinrichtungen.

In vielen Fällen, besonders bei vielen Bearbeitungsverfahren sind jedoch die Beanspruchungen des Werkstoffes derart kompliziert, daß sich die dabei auftretenden Spannungen teilweise gar nicht bestimmen lassen oder aber, daß eine wissenschaftliche Untersuchung derart umfangreich und schwierig sein würde, daß ihre Durchführung für die Praxis höchst unwirtschaftlich wäre. Ferner benötigt die Praxis Verfahren, nach denen man die Baustoffe beurteilen kann, ohne daß Probestäbe hergestellt und auf Prüfmaschinen zerbrochen werden. Man verzichtet infolgedessen in diesen Fällen auf die zahlenmäßige Feststellung mechanisch genau definierter Eigenschaften und begnügt sich bei der Beurteilung mit der Beobachtung des Verhaltens der Stücke.

Diese Prüfverfahren sind unter dem Namen technologische Prüfungen zusammengefaßt. Sie haben größtenteils als Hauptziel, den Werkstoff bei den Beanspruchungen zu beobachten, denen er später bei der Verarbeitung unterworfen werden soll. Auf Grund dieser Prüfungen hat man dann eine Gewähr dafür, daß er ohne unerwartete Betriebsstörungen den verlangten Beanspruchungen ausgesetzt werden kann. Ferner gehören hierzu noch eine Reihe einfacher Verfahren, nach denen man auf die Eigenschaften der Werkstoffe schließen kann, ohne daß diese Eigenschaften irgendwie bei der Prüfung berücksichtigt werden. Sie beruhen also auf den beobachteten Zusammenhängen zwischen äußeren Erscheinungen und den Werkstoffeigenschaften.

Da bei den technologischen Prüfungen kein Wert auf bestimmte zahlenmäßig erfaßbare Ergebnisse gelegt wird, ist es natürlich auch nicht nötig, bestimmte Verhältnisse innezuhalten. Die Prüfungen können je nach dem Verwendungszweck des Werkstoffes beliebig ausgesucht werden. Es ergeben sich infolgedessen eine unbegrenzte Zahl von technologischen Untersuchungsmöglichkeiten. Um nun aber den Verkehr zwischen Abnehmer und Lieferanten zu erleichtern, sind für die wichtigsten Verarbeitungsverfahren der verschiedenen Werkstoffe bestimmte Arten von Prüfungen üblich geworden. Wenn solche technologischen Prüfungen als Lieferbedingungen aufgestellt werden, ist darauf zu achten, daß die Untersuchungsbedingungen und die geforderten Ergebnisse genau festgelegt werden.

Entsprechend der Verarbeitung der Werkstoffe in kaltem oder warmem Zustand lassen sich die technologischen Prüfungen in Kalt- und Warmproben unterteilen.

### 1. Warmproben.

Die Warmproben werden also angewandt bei der Untersuchung von Werkstoffen, die durch Warmrecken verformt werden sollen. Die Prüfverfahren bestehen in einer probeweisen Durchführung der wichtigsten Schmiedeooperationen. Von besonderer Bedeutung sind diese Proben für in Massen herzustellende Artikel, bei denen eine Schwierigkeit der Fabrikation infolge mangelhaften Werk-

stoffes eine erhebliche Störung des Betriebes zur Folge hätte. Es sei hierbei an die Herstellung von Gesenkschmiedearbeiten oder Arbeiten auf der Schmiedemaschine erinnert.

Die Warmbiegeprobe stellt die einfachste Art der Prüfung dar. Bei ihr werden die Probestücke auf normale Schmiedetemperatur erhitzt und entweder von Hand auf dem Amboß mit dem Vorschlaghammer oder Handhammer gebogen oder aber unter Maschinen geprüft. Die Biegung geschieht entweder so, daß die Schenkel des Probestücks bis zum Aufeinanderliegen zusammengeschlagen werden, oder indem die Probestücke um einen Dorn mit bestimmtem Durchmesser vorgebogen und später, eventuell unter der Presse, zusammengedrückt werden. Nach der Beanspruchung ist das Stück auf Risse zu untersuchen. Für Unkundige besteht bei der Beobachtung der Proben die Gefahr, daß Risse in der verzünderten Oberfläche für Beschädigungen des Werkstoffs gehalten werden und feine Risse im Werkstoff selber übersehen werden. Es muß für solche Fälle empfohlen werden, die erkalteten Probestücke vor der Beobachtung von der Zunderschicht zu befreien.

Soll die Warmbiegeprobe als Abnahmebedingung ausgeführt werden, muß der Querschnitt der zu untersuchenden Probe angegeben werden. Es kann unter Umständen jedes beliebige Profil des angelieferten Werkstoffs für die Untersuchung gewählt werden. Ferner ist in diesem Falle festzulegen, ob die Prüfung von Hand oder unter der Maschine ausgeführt werden soll, und bis zu welchem Winkel sich der Werkstoff biegen lassen muß. Für die Erwärmung ist, wenn irgend möglich, ein geschlossener Ofen zu verwenden, um die Oberfläche des Probestückes durch unvorsichtiges Erhitzen im offenen Feuer nicht zu beeinträchtigen.

Die Warmbiegeprobe wird bei Rot- oder Blauwärme durchgeführt. In ersterem Falle wird der Werkstoff bis zum Dunkelkirschrot-Leuchten erwärmt. Dies entspricht einer Temperatur von über 700°. Bei der Blaubruchprobe läuft die Probe nach dem Abschrecken gerade noch blau an. Verschwindet die blaue Farbe wieder, ist die Probe zu hoch erwärmt worden. Erscheint die blaue Anlaßfarbe nicht, so ist die Temperatur noch zu niedrig. Es entspricht die blaue Anlaßfarbe einer Temperatur von etwa 300°.

Bei Rotbrüchigkeit ist der Werkstoff zum Schmieden unbrauchbar. Es kann dies seinen Grund in zu hohem Schwefel- oder Sauerstoffgehalt haben oder kann auf größere Fremdeinschlüsse zurückzuführen sein. Im letzteren Falle bezeichnet man den Werkstoff als faulbrüchig. Blaubrüchigkeit weist darauf hin, daß der Werkstoff bei tiefen Temperaturen nicht mehr formgebend bearbeitet oder beansprucht werden darf. Einige Richtlinien für die Durchführung der Warmbiegeprobe sind vom Normenausschuß der deutschen Industrie im DIN-Normenblatt 1605 herausgegeben.

Die Ausbreitprobe entspricht der allgemeinsten Schmiedeooperation. Man schmiedet hierbei ein Probestück, dessen Querschnittsseiten sich etwa wie 1:3 verhalten sollen, entweder mit der Hammerfinne eines Handhammers oder unter dem Krafthammer aus. Entweder wird die Probe soweit durchgeführt, bis das ausgeschmiedete Stück um ein im Lieferungsvertrage vorgeschriebenes Maß verbreitet ist oder bis in der Probe Risse auftreten. Als Vergleichsgrößen gelten die Längung:

$$\Delta l = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100\% \quad \text{und die Breitung:} \quad \Delta b = \frac{b_1 - b}{b} \cdot 100\%$$

(vgl. Fig. 60). Diese Probe kann für sämtliche Schmiedewerkstoffe verwandt werden, da die hierbei vorkommende Beanspruchung des Werkstoffs bei jedem Schmieden unumgänglich ist.

Durch die Stauchprobe werden Werkstoffe beansprucht, wie bei Gesenkschmiedearbeiten oder bei der Fabrikation in den Schmiedemaschinen, z. B. beim Anstauchen eines Kopfes oder Bundes. Man prüft nach dieser Probe insbesondere Werkstoffe für Schraubenbolzen, Nieten usw.

Für die Prüfung verwendet man zylindrische Probekörper, deren Höhe man ungefähr gleich dem doppelten Durchmesser wählt. Die Beanspruchung geschieht bei normaler Schmiedetemperatur. Im allgemeinen verlangt man, daß sich gutes Schmiedeeisen bis auf ein Drittel der Ausgangshöhe des Probekörpers zusammenstauchen läßt, ohne daß Risse auf dem Umfange des Probekörpers eintreten (vgl. Fig 61). Als Vergleich wird die Stauchung in Prozenten der Ausgangslänge angegeben.

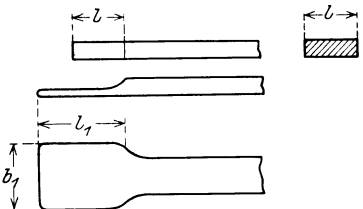


Fig. 60. Ausbreitprobe.

Bei der Aufornprobe wird der übliche Vorgang des Lochens beim Schmieden durchgeführt. Aus einem Stück Flacheisen oder einem Blechstreifen wird in rot-warmem Zustand ein Loch, dessen Durchmesser etwa gleich der doppelten Probenstärke ist, ausgeschlagen. Im allgemeinen wählt man die Breite des Probestreifens gleich der 5fachen Stärke. Das vorgeschlagene Loch wird dann durch einen Dorn mit einer Steigung 1:10 auf den doppelten Durchmesser geweitet. Es tritt hierbei eine starke Beanspruchung des Werkstoffs zwischen dem Lochrand und der Außenkante der Probe auf. Bei guten Schmiedematerialien kann man aber verlangen, daß hierbei keine Risse am Rande des Loches eintreten.

Bei der Polterprobe wird der Werkstoff beansprucht wie bei vielen Gesenkpräparbeiten. Die Durchführung besteht darin, daß eine glühende runde Blechscheibe, deren Durchmesser man mit 500 : 700 mm wählt, in ein halbkugelförmiges Gesenk, nach Fig. 62, gehämmert wird. Es darf hierbei der Werkstoff keine Risse bekommen und auch die Oberfläche nicht abblättern. Ob der Werkstoff ein oder mehrere Male erwärmt werden soll, hängt von seiner Stärke ab und muß in dem Liefervertrag festgelegt werden. Ebenso ist für die Prüfung das Verhältnis zwischen der Stärke des Werkstoffs und dem Radius der Wölbung des Gesenkes maßgebend.

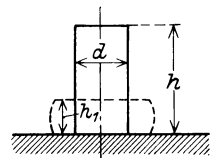


Fig. 61. Stauchprobe.

Die Bördelprobe dient zur Untersuchung von Rohren und Blechen. Rohre erfahren dabei eine Beanspruchung, wie sie beim Aufwalzen von losen Flanschen üblich ist. Sie werden hierzu in einen Ring geschoben und der überstehende Rand des Rohres um 90° nach außen umgebogen. Eine Verschärfung besteht noch darin, daß der umgebogene Rand darauf bis zum Anliegen an die Rohrwandung herumgebogen wird. Für dünnwandige und viele nichteiserne Rohre wird die Probe auch in kaltem Zustand ausgeführt, wobei dann das Probestück, je nach der Stärke, unter Umständen ein oder mehrere Male ausgeglüht werden muß.

Für die Prüfung von Blechen wird ein Blechring auf einen Ring mit größerem Innendurchmesser gelegt und der überstehende Rand des Bleches um 90° in den Ring hineingebogen.

Für die Untersuchung von Schmiedewerkstoffen, die später geschweißt werden müssen, ist ferner die Schweißprobe zu erwähnen. Zu ihrer Durchführung

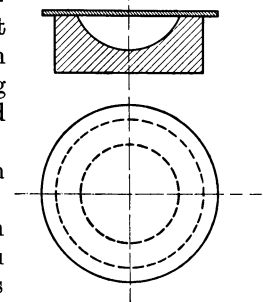


Fig. 62. Gesenk für die Polterprobe.

Für die Prüfung von Blechen wird ein Blechring auf einen Ring mit größerem Innendurchmesser gelegt und der überstehende Rand des Bleches um 90° in den Ring hineingebogen.

Für die Untersuchung von Schmiedewerkstoffen, die später geschweißt werden müssen, ist ferner die Schweißprobe zu erwähnen. Zu ihrer Durchführung

werden zwei Probestäbe ohne Verwendung irgendwelcher Schweißmittel in der Hitze überlappt geschweißt und dann der Probestab in kaltem oder warmem Zustand auf Biegung oder Zug beansprucht. Bei gutem Schweißmaterial, ordnungsgemäße Schweißung vorausgesetzt, darf dann kein Aufreißen in der Schweißnaht eintreten. Die Schweißstelle muß mindestens 80% der Festigkeit des Ausgangswerkstoffes besitzen.

## 2. Kaltproben.

Von den Kaltproben unterscheiden sich die Kaltbiege- (Falt) Probe, die Kaltstauchprobe und die Bördelprobe von den entsprechenden Warmproben nur durch die Versuchstemperatur.

Die Gewindebiegeprobe, nach Fig. 63, stellt eine Verschärfung der normalen Kaltbiegeprobe dar. Bei ihr wird ein Probestab, auf den ein spitzgängiges Gewinde geschnitten ist, bis zum Zusammenliegen der beiden Schenkel gebogen. Durch die Kerbwirkung des Gewindes wird die Formänderung der äußersten Fasern der Probe behindert und dadurch die Neigung zum Einreißen bedeutend erhöht.

Für die Prüfung von Drähten verwendet man die Hin- und Herbiegeprobe, die Verwindeprobe und die Wickelprobe.

Bei der Hin- und Her-

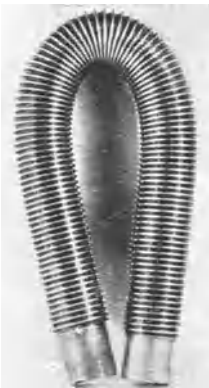


Fig. 63. Gewindebiegeprobe.

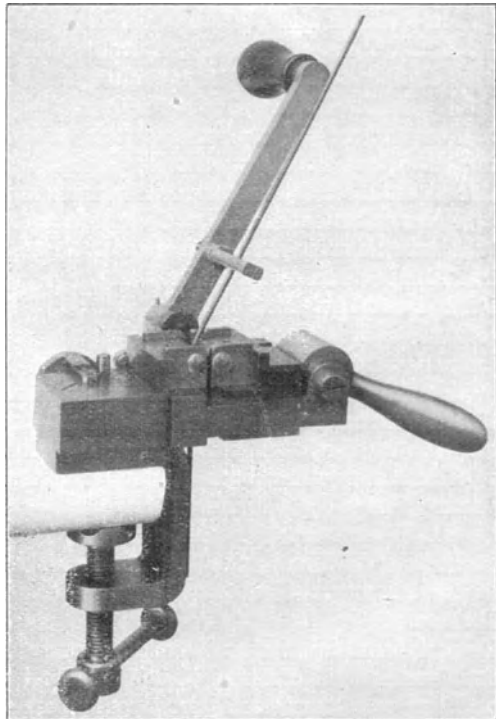


Fig. 64. Vorrichtung für die Hin- und Herbiegeprobe.

biegeprobe wird ein Draht zwischen zwei Backen eingeklemmt und die Anzahl der Biegungen bis zum Bruch bestimmt. Als eine Biegung zählt hierbei ein Umbiegen um  $90^\circ$  und wieder zurück. Für die Prüfung von Drähten nach diesem Verfahren bei Werkstoffabnahmen muß eine bestimmte Abrundung der Einspannbacken vorgeschrieben sein, da hierdurch natürlich die Bruchbiegezahl beeinflußt wird.

Man verwendet für diese Prüfung im allgemeinen eine kleine Vorrichtung nach Fig. 64, deren Backen ausgewechselt werden können, und in der der Draht direkt mit dem Handhebel verbunden ist. Die Prüfung ist von besonderer Wichtigkeit,

bei der Untersuchung von Werkstoff für Drahtseile, Kabel und ähnliche Zwecke. Von normalen Flußeisendrähten kann man ungefähr folgende Werte verlangen.

Durchmesser	6	5	4	3	2,5	2	1,7	mm
Biegezahl . . . . .	6	7	8	8	10	14	16	
Backenrundung . . .	10			5				mm

Für die Verwindeprobe wird ein Draht in einen Apparat, nach Fig. 65, eingespannt. Die freie Länge des Drahtes wird ungefähr gleich dem 75fachen des Durchmessers, mindestens aber gleich 15 cm gewählt. In dem Apparat wird der Draht auf einem Ende durch ein Gewicht gleichmäßig gespannt und auf dem anderen mit einer Handkurbel verbunden. Für die Beurteilung des Werkstoffs gilt die Anzahl der Drehungen bis zum Bruch, die von einer Zahlenscheibe direkt abgelesen werden kann. Für Flußeisendrähte können folgende Verwindungszahlen gefordert werden:

Durchmesser . . . . .	6	5	4	3	2,5	2	1,7	mm
Verwindungszahl . .	16	19	23	28	30	32	38	mm.

Die Wickelprobe kann auf demselben Apparat, nach Fig. 65, ausgeführt werden. Sie besteht darin, daß ein Draht um einen anderen gleichen Durchmessers

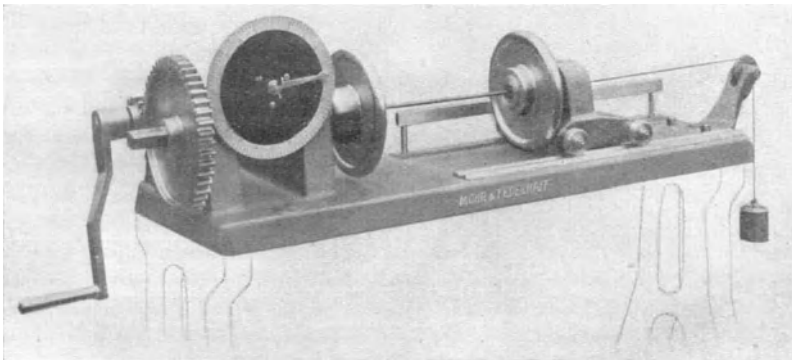


Fig. 65. Apparat für die Verwindeprobe.

spiralförmig auf- und abgewickelt wird. Für die Beurteilung ist die Anzahl der Wicklungen bis zum Bruch maßgebend.

Die praktisch größte Bedeutung unter den technologischen Kaltproben hat die Treibprobe erlangt. Beim Ziehen tiefer Hohlkörper wird von dem Blech eine große Dehnung bei genügender Festigkeit verlangt. Die Werte des Zerreißversuches geben hier jedoch schlechte Anhaltspunkte, denn bei dieser Beanspruchung wird eine Dehnung des Materials verlangt, wie sie beim Zerreißversuch lediglich in der Nähe der späteren Bruchstelle vorliegt, und aus dem Durchschnittswert, der beim Zerreißversuch als Bruchdehnung angegeben wird, läßt sich dieser Teil der Dehnung nicht mehr erkennen. Die Prüfung besteht deshalb darin, daß aus einem Blech mit einem bestimmten Ziehwerkzeug ein Hohlkörper gezogen wird. Man verwendet hierzu den in Fig. 66 wiedergegebenen Apparat. Er enthält eine auswechselbare runde Matrize und einen dazugehörigen Stempel, der mittels einer Spindel durch das Handrad vorgetrieben wird. Das Blech kann während des Hineinziehens in die Matrize durch einen an dem Apparat befestigten Spiegel beobachtet werden. Man führt den Versuch durch bis zum Eintreten der ersten Risse, die sich beim Führen des Handrades durch einen Ruck bemerkbar machen

und durchweg im Spiegel zu beobachten sind. Für die Beurteilung der Werkstoffe wird die Tiefe der erzeugten Nüpfchen gewählt, die mit Tiefungswert bezeichnet wird. Außerdem ist für die Beurteilung die Beschaffenheit der Oberfläche maßgebend, die möglichst glatt und ohne Falten sein muß. Der Apparat für diese Prüfung kann noch dahin vervollständigt werden, daß mit ihm gleichzeitig die Kraft während des Ziehens gemessen werden kann.

Verschiedene Verfahren. Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle noch einige allgemeine Möglichkeiten der Werkstoffbeurteilung erwähnt, die in der Praxis oft ausgenutzt werden. Da sie jedoch gewisse Erfahrung voraussetzen, die sich durch Abbildungen und Worte nicht wiedergeben lassen, ist es zwecklos, diese Verfahren ausführlich zu beschreiben.

Ein bekanntes Mittel, einen angenäherten Aufschluß über die Zusammensetzung und Beschaffenheit des vorliegenden Werkstoffes zu erhalten, bildet die Betrachtung der Bruchfläche. Die Bruchfläche des Flußstahls z. B. ist körnig, die des Schweißeisens sehnig. Bei größerer Erfahrung kann man aus dem Bruch von verschiedenen Flußstahlproben, die unter gleichen Bedingungen zerbrochen sind, auch ungefähr auf den C-Gehalt des Werkstoffes schließen. Bekannt ist ferner die Bestimmung der Einsatztiefe, der richtigen Härte-temperatur sowie der Tiefe der harten Oberflächenschicht beim Hartguß aus der Beschaffenheit der Bruchfläche.

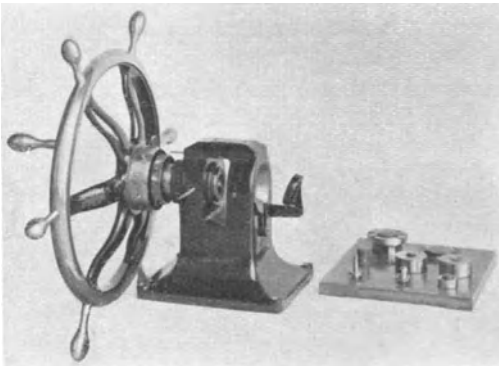


Fig. 66. Apparat für die Treibprobe.

Beachtenswert ist ferner bei der Beurteilung von Werkstoffen die Oberfläche. Wie aus dem über die Kerbschlagprobe Gesagten hervorgeht, sind kleine Fehlstellen an der Oberfläche von großer Wirkung beim Auftreten stoßweiser Beanspruchung. Bei Schmiedestücken läßt sich ferner bereits durch das Aussehen der Oberfläche erkennen, ob der Werkstoff bei der Wärmebehandlung verbrannt ist.

Eine dem Schmied wohlbekanntere Erscheinung ist der verschiedene Klang von Stahl je nach der Härte beim Anschlagen auf ein anderes Stahlstück. Ebenso beurteilt man große Gußstücke sehr leicht nach dem Klang, den sie beim Anschlagen mit einem Stahlstück geben, wenn sie frei aufgehängt sind. Man kann aus dem Klang in den meisten Fällen ohne weiteres das Vorhandensein von Lun- kern erkennen.

Schließlich sei noch auf die Prüfung ganzer Werkstücke hingewiesen. So prüft man z. B. Radbandagen einfach so, daß man sie unter einer Presse vollkommen zusammenbiegt. Rohre prüft man durch die hydraulische Druckprobe oder bei spiralgeschweißten Rohren, indem man Rohrenden zusammendrückt, um die Festigkeit der Schweißnähte zu prüfen. Andere Hohlkörper werden durch Wasser- oder Luftdruck auf Dichtigkeit und Festigkeit geprüft. Die Formänderungen werden dabei mit Hilfe von Spiegeln bestimmt. Um gehärtete Werkstücke zu prüfen, bietet die Feilprobe eine sehr gute und oft die einzige Möglichkeit. Man bestimmt die Härte je nachdem, ob eine Feile anfaßt oder nicht. Um Stahlkugeln auf ihre Elastizität hin zu prüfen, läßt man sie aus gleicher Höhe auf eine harte Stahlplatte fallen und beobachtet die Rücksprunghöhe. Man sortiert die Kugeln



einfach dadurch, daß man sie über eine Trennwand springen läßt, wobei Kugeln mit geringer Elastizität oder mit Härterissen an der Trennwand herunterfallen.

## II. Metallographische Materialuntersuchung.

Wenn sich Metalle oder allgemein Metallegierungen ohne Formbehinderung aus dem flüssigen oder gasförmigen Aggregatzustand als feste Körper abscheiden können, so entstehen Kristalle, deren Formen die Orientierung nach bestimmten Gesetzen erkennen lassen. Solche Kristalle sind z. B. an den Wänden von Behältern mit vergasten Metallen und am Lunkerrand von Gußblöcken zu beobachten. Man bezeichnet sie allgemein als Wachstumskristalle. Ein Beispiel zeigt Fig. 67.

Da nun aber die Kristalle praktisch beim Erstarren der Schmelze nicht in einen freien Raum hineinwachsen, sondern ihre Ausbildung nach den bestimmten Orientierungen durch nebenliegende Kristalle verhindert ist, und oft die Kristalle bei der Verarbeitung des Stoffes mancherlei Formänderungen erleiden, ist in den technisch verwendeten Metallen keine bestimmte Orientierung der Kristallform zu erkennen, sondern sie bestehen aus einem Haufwerk von Kristallen, deren Formen durch die Begrenzung erzwingen sind. Man bezeichnet sie daher mit dem besonderen Namen *Kristallite*.



Fig. 67. Wachstumskristall.

Die Aufgabe der metallographischen Untersuchung ist die Bestimmung des Aufbaues der Metalle bis zur Anordnung dieses Haufwerks von Kristalliten. Die Metallographie sagt uns also nur mittelbar etwas über die Eigenschaften der Metalle insofern, als sie uns ihren Aufbau angibt und man aus der Art der Anordnung und den Eigenschaften der einzelnen Gefügebestandteile auf die Eigenschaften der Metalle schließen kann. Sie bietet aber dadurch andererseits in sehr vielen Fällen eine Erklärung für das Verhalten der Werkstoffe.

### A. Die praktische Ausführung der Untersuchung.

Wenn durch das Bruchaussehen oder durch sonstige äußere Merkmale die Untersuchung nicht schon auf kleinere Stellen begrenzt werden kann, muß man für die metallographische Untersuchung zunächst eine möglichst große Fläche hinsichtlich ihres Aufbaues betrachten, da die technisch verwendeten Metalle selten, eigentlich nie, über den ganzen Querschnitt und die ganze Länge gleichen Aufbau besitzen. Die Bruch- oder Schnittfläche läßt aber nur große Unregelmäßigkeiten erkennen. Gewöhnlich ist es nötig, hierzu die Stücke zu schleifen, da in der glatten Fläche kleinere Unterschiede bemerkbar werden, und da die glatte Fläche auch mit schwacher Vergrößerung beobachtet werden kann. Sollen nach dieser Voruntersuchung kleinere Stellen genauer untersucht werden, so schneidet man nötigenfalls diese Stellen heraus und stellt einen metallographischen Schliff her.

Der Schliff läßt bereits gröbere Einschlüsse und Lunker beim Betrachten mit dem bloßen Auge erkennen. Gasblasen sind besonders gefährlich bei Stoffen, die

bei höheren Temperaturen verarbeitet oder später beansprucht werden. Beim Erwärmen tritt eine starke Erhöhung des Gasdrucks ein, der beim Walzen von gegossenen Blöcken, bei Kesselblechen und in vielen anderen Fällen zur Zerstörung führt. Bei Vergrößerung unter dem Mikroskop sind daneben auch Gefügebestandteile, die eine deutlich andere Färbung besitzen, erkennbar. Im Schliff eines Graugusses, ist z. B. der Graphit als dunkle Ader zu sehen.

Es sei an dieser Stelle auch auf die Bedeutung der Schlackenuntersuchung hingewiesen. Sie erfordert eine weitgehende Erfahrung oder zahlreiche Vergleiche, denn es gibt unter unseren praktisch verwendeten Metallen keine vollkommen schlackenfreien Stücke, weil sich diese auf wirtschaftliche Weise praktisch nicht erreichen lassen. Zur Beanstandung kann also die Feststellung von Schlackeneinschlüssen nur führen, wenn der Schliff unzulässig viel Schlacke enthält. Für die Eigenschaften des Werkstoffes ist es ferner von Bedeutung, in welcher Form die Schlacke im Stoff vorhanden ist. Hierzu sind Querschliff und Längsschliff durch eine Probe erforderlich, d. h. je ein Schliff parallel und quer zur Faserrichtung des Werkstoffes.

Aus diesen kann man dann ersehen, ob es sich um zusammenhängende Schlackenfasern handelt, die womöglich den Kern von der Randzone trennen und so eine gefährliche Verminderung der Festigkeitseigenschaften des Materials zur Folge haben, oder ob die Schlacken als kleine, Einschlüsse vorhanden sind, die natürlich weit ungefährlicher sind. Vor einer übereiligen Beurteilung des Materials allein auf Grund der Feststellung von Schlacken muß dringend gewarnt werden.

Die meisten Untersuchungen erfordern einen weiteren Einblick in den Aufbau des Werkstoffes. Die theoretisch einfachste Art, verschiedene Gefügebestandteile kenntlich zu machen, ist das Reliefpolieren. Hierzu wird der Schliff mit sehr feiner Tonerde und wenig Wasser auf Pergament so lange geschliffen, bis man im Mikroskop die härteren Teile erhaben erkennen kann, da diese beim Schleifen weniger angegriffen werden als die weichen. Heute wird diese Art der Schliffbehandlung jedoch nur noch in Sonderfällen angewandt, weil sie sehr umständlich und zeitraubend ist. Man macht den Aufbau des Stoffes durch geeignete Ätzungen sichtbar, die die verschiedenen Gefügebestandteile erkenntlich machen. Man unterscheidet hierbei zwei Arten von Ätzmitteln für die makroskopischen und die mikroskopischen Ätzungen.

Durch die makroskopische Ätzung erhält man mit dem Auge oder bei schwacher Vergrößerung wahrnehmbare Unterschiede des Werkstoffes. Man erzielt dies durch verschiedene Färbung. Das bekannteste Ätzmittel hierfür ist Kupferammoniumchlorid, das für die Feststellung von Phosphorseigerungen im Eisen verwandt wird. Beim Eintauchen des Schliffes in eine Lösung von Kupferammoniumchlorid wird auf dem Schliff rotes Kupfer ausgeschieden. Dieses wäscht man unter kräftigem Abspülen ab, dann bleiben auf dem Schliff an den phosphorreichen Stellen dunkelbraune Flecken bzw. Streifen zurück. Da nun jedes Metall Seigerungen enthält, ist auch für die Beurteilung des Untersuchungsergebnisses Erfahrung nötig, zumal die kohlenstoffreichen Stellen hierbei gleichfalls als graue Stellen im Schliff erscheinen. Das Aussehen eines Schliffes nach einer solchen Ätzung zeigt Fig. 22, in dem die Seigerungsstellen in einem gestauchten Schweißseisenzylinder zu erkennen sind. Die Figur zeigt gleichzeitig, daß man durch die Ätzung einen guten Einblick in den Faserverlauf eines Werkstückes bekommt, und somit durch die Ätzung gute Aufschlüsse über die Verformungsvorgänge geboten werden. Die Bestimmung der Phosphorseigerungen ist praktisch sehr wichtig, weil stark phosphorhaltiges Material sehr empfindlich ist gegen Stöße trotz guter statischer Festigkeitseigenschaften. Auf die Ätzmittel im einzelnen einzugehen, ist hier

zwecklos, da ihre Anwendung doch eine eingehende Beschäftigung mit dem Gebiet verlangt.

Besondere Erwähnung verdient in diesem Zusammenhange das Frysche Ätzmittel, durch dessen Wirkung im Schliiff eines kalt gereckten Werkstoffes der vor der Ätzung eine halbe Stunde bei 200° angelassen wurde, Kraftwirkungslinien erkennbar werden, wie in Fig. 68.

Bei der mikroskopischen Ätzung, durch die die Kristallite für die mikroskopische Betrachtung erkennbar gemacht werden, unterscheidet man Korngrenzen- und Kornflächenätzung. Im ersten Falle sind die Grenzen der einzelnen Kristallite in der Schliifffläche als schwarze Linien zu erkennen, im anderen werden die einzelnen Kristallite, deren Hauptorientierungsachsen zur Schliifffläche verschieden gerichtet sind, verschieden angegriffen, so daß sie im Mikroskop verschieden hell erscheinen. Fig. 69 und 70 zeigen z. B. das Gefüge von reinem Eisen nach den beiden Ätzverfahren. Verschiedene Gefügebestandteile unterscheiden sich im Schliiff außer durch verschiedene Färbung dadurch, daß sie vom Ätzmittel verschieden stark angegriffen werden und dementsprechend erhaben oder tieferliegend erscheinen.

Aus der Form und dem Aufbau der Gefügebestandteile läßt sich bereits auf die Eigenschaften des Metalles schließen. Ein Metall mit großen Kristalliten, ein grobkristalliner Stoff, ist gegen Verformungen, die mit einer Verschiebung der Kristallite verbunden sind, empfindlicher als ein feinkörniger. Er ist spröde, der feinkörnige zäh. Grobe Graphitblätter stören den Zusammenhang der Eisenteile des Graugusses stärker als feinverteilte kleine Graphitteile. Je gröber die Graphitausbildung, um so geringer die



Fig. 68. Kraftwirkungslinien durch Frysche Ätzung.

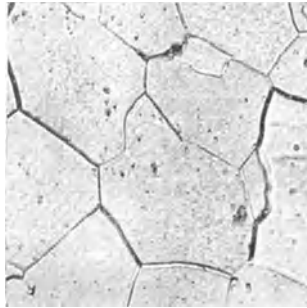


Fig. 69. Reines Eisen, Korngrenzenätzung.

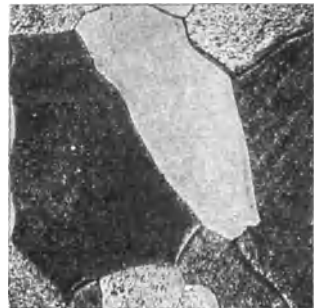


Fig. 70. Reines Eisen, Kornflächenätzung.

**Festigkeit des Gußeisens.** Zementitstreifen im Schliiff, die räumlich Eisenkarbidblättern entsprechen, versteifen die ferritische Grundmasse und geben dem Material größere Härte und Festigkeit, aber geringere Dehnung. Da der Zementit härter ist als gehärteter Stahl, ist Stahl mit streifigem Zementit schlecht spanabhebend zu bearbeiten; er neigt zum Ausbrechen und ergibt unsaubere Schnittflächen. Stahl mit körnigem Zementit besitzt geringere Härte und Festigkeit, aber größere Dehnung.

Werden Metalle erhitzt, so treten bei bestimmten Temperaturen Veränderungen des Gefüges ein. Sie kristallisieren in festem Zustande um. Beobachtet man die Eigenschaften der Proben direkt beim Erhitzen, so bemerkt man auch, daß viele

Metalle bei bestimmten Temperaturen ihre Eigenschaften mehr oder minder schnell ändern. Sie nehmen ein anderes Volumen ein, bekommen andere elektrische Leitfähigkeit, verändern ihre magnetischen Eigenschaften oder zeigen andere Veränderungen, die beim Abkühlen dann meistens in der Nähe derselben Temperatur in umgekehrter Richtung wieder auftreten. Beobachtet man z. B. einen Kupfer- und einen Eisenwürfel, die beide gleichmäßig auf  $950^{\circ}$  erhitzt sind, während der Abkühlung, so bemerkt man, daß anfangs beide gleichmäßig dunkler werden. Bei etwa  $700^{\circ}$  aber behält der Eisenwürfel für einige Zeit seine Helligkeit, während der Kupferwürfel weiter gleichmäßig dunkler wird. Das Eisen erleidet nämlich bei dieser Temperatur eine Umkristallisation, bei der Wärme frei wird, und hierdurch wird die Temperatur des Eisenwürfels für die Zeit der Umwandlung höher gehalten als die des Kupferwürfels, der diese Umwandlung nicht erfährt. Diese Erscheinungen, die umgekehrt beim Erhitzen auftreten, lassen sich deutlich aus den Temperaturzeitkurven, nach Fig. 71, ansehen. Da die Wärmeeffekte ein deutliches Merkmal innerer Umwandlungen sind, lassen sich die Umwandlungstempera-

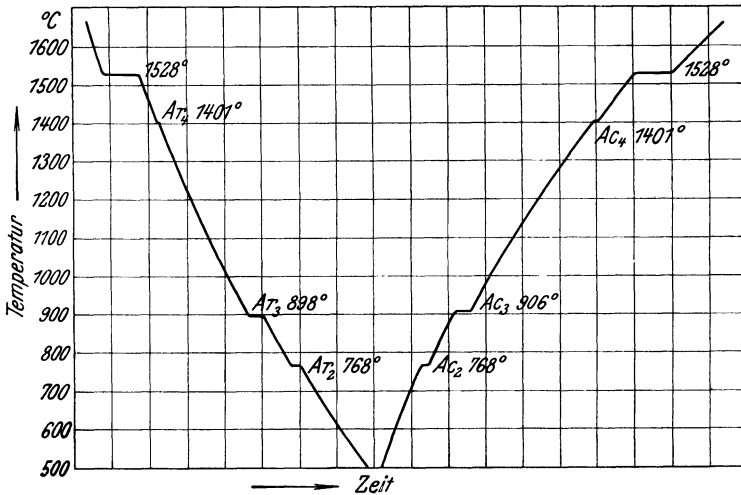


Fig. 71. Haltepunktcurven des reinen Eisens.

turen durch Temperaturmessung genau bestimmen. Man macht dies entweder einfach mit einem Thermoelement, mit dem man die Temperaturänderung in bestimmten Zeitabständen mißt, oder man verwendet hierzu selbsttätig arbeitende Registrierapparate. Sehr genau und empfindlich ist der bekannte Saladin-Apparat, bei dem die Temperaturdifferenz zwischen dem Probekörper und einem Vergleichskörper ohne Umwandlung mit Thermoelementen und einem Doppelspiegelgalvanometer bestimmt wird. Die sich in diesem Apparat hierbei ergebende Wanderung eines Lichtstrahls wird auf einer photographischen Platte oder Registrierscheibe festgehalten. Für Eisen ergibt sich dann z. B. eine Kurve nach Fig. 72. Das Eisen erfährt hiernach bei  $700^{\circ}$  eine Umkristallisation. Solche Feststellungen sind für die Wärmebehandlung der Metalle von großer Wichtigkeit, denn z. B. beim Härten ist es nötig, daß das Material vor dem Abschrecken bis über diese Umwandlungstemperatur erhitzt wird.

Für die Behandlung einer Legierung und ihre Beurteilung muß man einmal die Gefügebestandteile kennen, aus denen sie zusammengesetzt ist, und zweitens die Umkristallisationstemperaturen. Beide Angaben werden in der Metallographie im Zustandsdiagramm vereinigt. In einer erstarrten Legierung verhalten sich die

Bestandteile genau so, wie zwei Flüssigkeiten, die zusammengegossen werden. Es gibt drei Möglichkeiten: Zwei Flüssigkeiten, wie Wasser und Alkohol, kann man in jedem Verhältnis zusammengießen; es tritt immer eine vollständige Mischung ein. Die Flüssigkeiten sind vollkommen ineinander löslich.

Wasser und Öl dagegen bilden zwei Schichten, ohne sich irgendwie ineinander zu lösen. Werden sie mechanisch durcheinander gerührt, so bekommt man ein Gemenge, aus dem sich aber im Ruhezustand Öl und Wasser wieder voneinander trennen.

Wasser und Äther schließlich bilden ebenfalls zwei Schichten. Bei einer Untersuchung ergibt sich aber, daß sich nicht reiner Äther von reinem Wasser getrennt hat, sondern der Äther hat etwas Wasser gelöst und das Wasser etwas Äther. Man bezeichnet die Flüssigkeiten als beschränkt löslich.

Dieselben Erscheinungen liegen bei festen Legierungen vor. Silizium und Mangan bilden z. B. mit Eisen feste, vollkommene Lösungen, d. h. sie bilden mit Eisen zusammen eine Kristallart, in der Silizium bzw. Mangan und Eisen enthalten sind, die Mischkristalle. Daneben kennt man beschränkte Löslichkeit und mechanische Gemenge.

Der einfachste Fall der Kristallbildung liegt vor, wenn die beiden Bestandteile in jedem Mischungsverhältnis vollständig ineinander löslich sind, also Mischkristalle bilden. Diesen Fall

zeigt Fig. 73 im Zustandschaubild. Das Zustandsdiagramm erhält man aus den Haltepunktskurven verschiedener Mischungsverhältnisse. In der Fig. 73 sind nur drei dargestellt. Der reine Bestandteil *A* ergibt auf der Kurve einen Haltepunkt bei der Temperatur  $T_1$ . Die Legierung *a* z. B. besitzt keinen Haltepunkt, sondern zwei deutliche Knicke im Verlauf der Abkühlungskurve. Der dazwischenliegende Teil entspricht dem Temperaturintervall, in dem die Erstarrung vor sich geht.

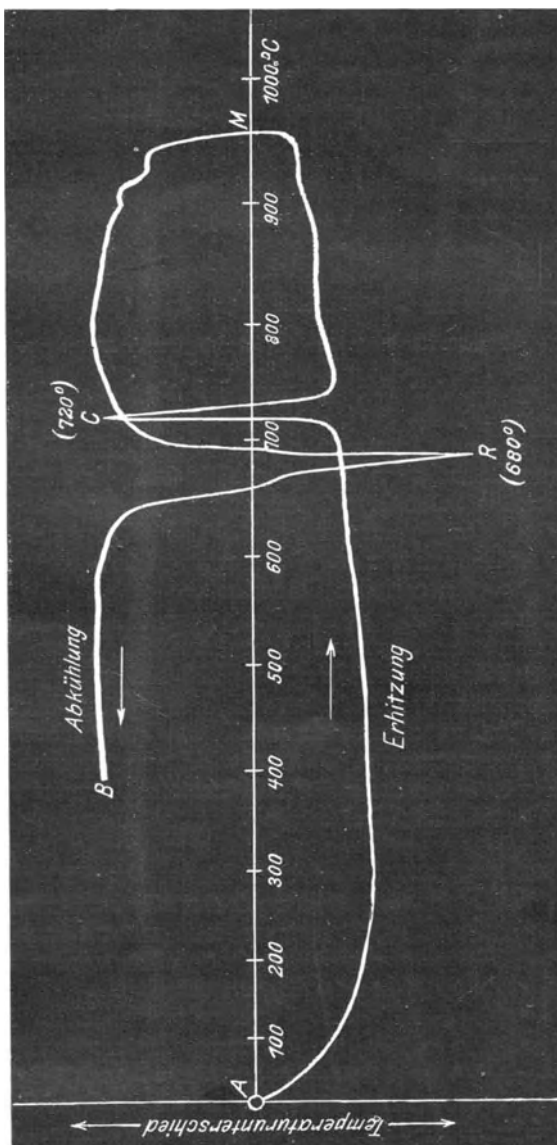


Fig. 72. Saladin-Kurve von reinem Eisen.

Beim reinen  $B$  zeigt die Kurve wieder einen deutlichen Haltepunkt bei der Temperatur  $T_2$ . Die Erstarrung erfolgt also wieder bei einer bestimmten Temperatur im Gegensatz zu den Legierungen. Im Zustandsschaubild sind nun für die untersuchten Zusammensetzungen die Temperaturen, bei denen Knicke im Verlauf der

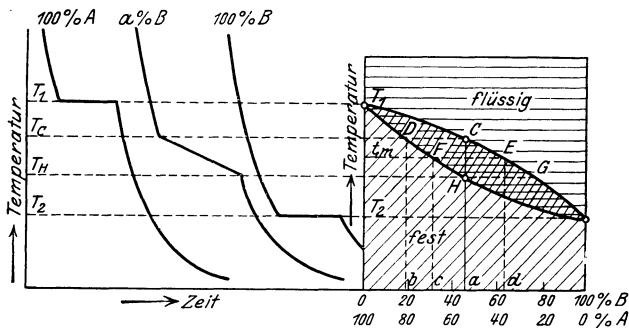


Fig. 73. Zustandsschaubild bei unbegrenzter Löslichkeit.

Abkühlungskurven auftreten, auf der zugehörigen Ordinate angegeben und diese dann verbunden. Der obere Punkt entspricht immer dem Beginn der Kristallisation und der untere dem Ende der Erstarrung. Über der oberen Linie sind also alle Legierungen flüssig; man bezeichnet sie deshalb mit Liquiduslinie (liquidus = flüssig). Unter der unteren sind sie fest. Die Linie heißt deshalb Soliduslinie (solidus = fest).

Wie das Diagramm zeigt, besitzen alle Legierungen in diesem Diagramm keinen Schmelzpunkt, sondern ein Schmelz-, bzw. Erstarrungsintervall, das zwischen den Schmelzpunkten der reinen Metalle liegt. Eine Legierung mit der Zusammensetzung  $a$  erstarrt z. B. bei der Temperatur  $C$  und beendet die Erstarrung bei der Temperatur  $H$ . Der Vorgang ist hierbei folgender: Bei der Temperatur  $C$  scheiden sich aus der Schmelze die ersten festen Kristalle aus. Diese besitzen aber nicht die Zusammensetzung der Schmelze, sondern die Zusammensetzung  $b$ , die man erhält, wenn man von Punkt  $C$  wagerecht bis zum Schnittpunkt  $D$  mit der Soliduslinie herübergeht. Mit sinkender Temperatur steigt dann die Zusammensetzung der festen Kristalle, die noch von flüssiger Schmelze umgeben sind. Und zwar erhält man z. B. bei der Temperatur  $t_m$  feste Kristalle von einer Zusammensetzung  $c$ , die man wiederum aus dem Schnittpunkt der Wagerechten im Punkt  $F$  mit der unteren Kurve des Diagramms erhält. Die Zusammensetzung der Restschmelze bei dieser Temperatur erhält man durch den Schnittpunkt  $E$

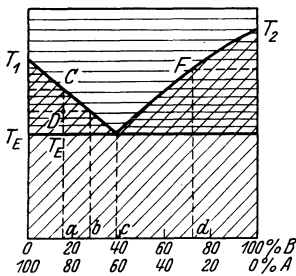


Fig. 74. Zustandsschaubild von Elementen ohne Löslichkeit.

der Wagerechten mit der Liquiduslinie des Diagramms. Die Menge der festen und flüssigen Teile lassen sich nach der Mischungsregel einfach berechnen. Bei Temperatur  $H$  erstarrt dann die Restschmelze, und die feste Legierung hat wieder die Zusammensetzung der Ausgangsschmelze.

Eine andere Kristallbildung ergibt sich bei der Erstarrung eines mechanischen Gemenges aus zwei Kristallarten. Fig. 74 zeigt das Diagramm zweier Elemente  $A$  und  $B$ , die sich nicht ineinander lösen, also keine Mischkristalle bilden. Der Beginn der Erstarrung wird für beide Elemente durch Zusatz des anderen Elements erniedrigt bis zu einer Mindesttemperatur  $T_E$  und einem bestimmten Legierungsverhältnis  $c$ . Der Vorgang bei der Kristallisation einer Schmelze mit der Zusammensetzung  $a$  ist nun folgender:

Bei der Temperatur  $C$  scheiden sich auch hier die ersten festen Kristalle aus, die aber in diesem Falle die Zusammensetzung von 100% besitzen, wie es durch die Wagerechte angegeben wird. Die Zusammensetzung der Schmelze wird also

reicher an  $B$ . Bei der Temperatur  $D$  haben wir also reine  $A$ -Kristalle und eine Schmelze mit der Zusammensetzung  $b$ , wie es sich wieder aus der Wagerechten (s. oben) ergibt. Erreicht nun die Restschmelze bei der Temperatur  $T_E$  eine Zusammensetzung  $c$ , so kristallisieren plötzlich beide Metalle: der Rest des Metalles  $A$  und die in der Schmelze bis zum Schluß gebliebenen Bestandteile von  $B$ . Bei der Legierung mit der Zusammensetzung  $d$  ist der Erstarrungsvorgang nun umgekehrt. Hier scheiden sich zuerst reine  $B$ -Kristalle aus, wie sich aus den Schnittpunkten der Wagerechten ergibt, damit sinkt während des Abkühlens der Anteil des Metalles  $B$  an der Schmelze und steigt das Verhältnis zugunsten des Metalles  $A$ , bis bei der Temperatur  $T_E$  wieder die Zusammensetzung  $c$  entsteht, und diese wieder plötzlich kristallisiert.

Während also die Flüssigkeit einheitlich war, homogen, besteht das feste Metall aus nebeneinander gelagerten Kristallen  $A$  und  $B$ . Es ist heterogen.

In dem Schlibbild ist der Vorgang der Erstarrung später noch zu erkennen. Denn die Kristalle  $A$  und  $B$ , die sich am Schluß zu gleicher Zeit ausgeschieden haben, sind natürlich äußerst fein ausgebildet und unterscheiden sich infolgedessen auffallend von den Kristallen, die sich anfangs von Schmelze umgeben, gebildet haben. Diese sind größer und regelmäßiger angeordnet. In der Metallographie hat deshalb das Haufwerk von kleinen Kristallen, das bei einer bestimmten Temperatur plötzlich entsteht, die besondere Bezeichnung Eutektikum erhalten, womit also keine besondere Kristallart bezeichnet wird, sondern lediglich die bestimmte Anordnung zweier Kristalle. Eine Schmelze mit der eutektischen Zusammensetzung  $c$  kristallisiert also wieder bei einer Temperatur, im Gegensatz zu den übrigen Legierungen mit Erstarrungsintervall.

Der häufigere Fall des Zustandsdiagramms ist jedoch weder der, daß die Metalle nur mechanische Gemenge bilden, noch der, daß sie in jeder Zusammensetzung homogene Kristalle liefern. Meist bilden die Metalle in bestimmten Legierungsbereichen homogene Kristalle und in den dazwischenliegenden Bereichen mechanische Gemenge. Ein solches Zustandsschaubild zeigt Fig. 75. Die Schmelzen mit einer Zusammensetzung zwischen  $O$  und  $a$  sowie  $b$  und  $100\%$   $B$  kristallisieren wie Legierungen mit homogenen Mischkristallen. In dem Bereich zwischen  $a$  und  $b$  beginnt die Erstarrung genau so, bei der Temperatur  $T_E$  aber bildet sich ein mechanisches Gemenge, das in diesem Fall jedoch nicht aus den Kristallen  $A$  und  $B$  besteht, sondern, wie die Schnittpunkte der Wagerechten ergeben, ein Eutektikum aus Kristallen mit der Zusammensetzung  $a$  und  $b$  darstellt.

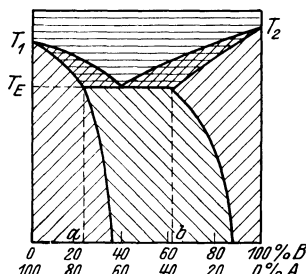


Fig. 75. Zustandsschaubild bei begrenzter Löslichkeit.

Während hier an Hand der Schaubilder immer der Übergang aus der Schmelze in den festen Zustand besprochen wurde, ist dies für die praktische Metallographie meistens von geringerer Bedeutung als das Schaubild über die Vorgänge im festen Zustand. Viele Metalle besitzen nämlich die Eigenschaft, mit der Temperatur ihre Mischbarkeit zu ändern und umzukristallisieren. Es gelten dann aber dieselben Verhältnisse wie bei der Kristallisation aus der flüssigen Schmelze. Ein einfaches Beispiel der Löslichkeitsänderung bietet Fig. 75. Die Kristalle mit der Zusammensetzung  $a$  und der Zusammensetzung  $b$  bei der Temperatur  $T_E$  verändern nämlich beim Abkühlen ihre Lösungsfähigkeit. Die Kristallart  $a$  bekommt mit fallender Temperatur eine größere Lösungsfähigkeit für das Metall  $B$  und nimmt dieses beim Abkühlen aus dem mechanischen Gemenge auf. Die Kristallart  $b$  dagegen vermindert ihre Lösungsfähigkeit für das Metall  $A$  und scheidet dieses





der Fe-C-Legierungen tritt nun eine Verschiebung der Sättigungsgrenzen ein. Die Lösungsfähigkeit nimmt von 1,7% C auf 0,9% C beim Abkühlen von 1120° auf 710° ab. Es müssen sich also beim Abkühlen aus den Mischkristallen Eisenkarbidkristalle ausscheiden. In dem Mischungsbereich von 0 : 0,9% treten dagegen zwischen 900 und 700° reine Eisenkristalle aus, derart, daß die Zusammensetzung der Mischkristalle dieses Bereiches ebenfalls der Konzentration von 0,9% C bis 710° zustrebt. Bei 710° tritt nun bei allen Legierungen zwischen 0 und 1,7% C eine plötzliche Umkristallisation der noch vorhandenen Mischkristalle ein, wobei ein dichtes Haufwerk von Eisen- und Eisenkarbidkristallen gebildet wird. Diese bleiben dann bis Zimmertemperatur konstant. Die Konzentration von 0,9% C würde also beim Erstarren einer Schmelze als Eutektikum bezeichnet werden. Bei den Vorgängen in festem Zustand bezeichnet man deshalb diese Konzentration als Eutektoid, d. h. kleines Eutektikum. Die Mischkristalle in dem Bereich AESG des Diagramms bezeichnet man auch als feste Lösung, weil die Kristallisationsvorgänge beim Sinken der Temperatur genau den Erscheinungen beim Erstarren einer Lösung entsprechen, die aus den Bestandteilen Eisen und Eisenkarbid besteht.

Die bei der Kristallisation entstehenden Gefügebestandteile lassen sich bei der metallographischen Untersuchung noch bei Zimmertemperatur erkennen. Sie werden im Schlibfbild mit besonderen Namen bezeichnet. Die Mischkristalle, oder mit anderen Worten die feste Lösung, bezeichnet man als *Austenit*. Das Eisen besitzt in diesen Kristallen eine bestimmte Atomanordnung. Man bezeichnet es als  $\gamma$ -Eisen. Das Eutektikum bei 1120° mit 4,2% C, im Schlibf also das Kristallhaufwerk aus Mischkristallen und Eisenkarbidkristallen bezeichnet man als *Ledeburit*. Die reinen Eisenkristalle haben den Namen *Ferrit*, die reinen Eisenkarbidkristalle den Namen *Zementit*. Das Haufwerk von Eisenkristallen und Eisenkarbidkristallen, das dem Eutektoid entspricht, bezeichnet man im Schlibf als *Perlit*. Das Eisen nach der Umkristallisation bezeichnet man als  $\alpha$ -Eisen.

Die Zusammenfassung der Zustandsänderungen bestimmter Legierungen durch das Zustandsschaubild stößt aber auf Schwierigkeiten, wenn eine Legierung aus mehreren Komponenten besteht, wie es bei technischen Metallen meistens der Fall ist. In den legierten Stählen z. B. ist gleichzeitig der Kohlenstoff und ein Legierungsbestandteil, wie Mangan, Wolfram, Chrom, Vanadin usw., von Bedeutung. Diese drei Komponenten zusammen mit der Temperatur lassen sich nicht mehr in einem ebenen Schaubild zusammenfassen. Die einfachste Folgerung wäre deshalb, die Schaffung räumlicher Diagramme, die aber praktisch nicht verwendbar sind, da sie nicht leicht vervielfältigt werden können. Außerdem ist die Form der Flächen, die teilweise zu drei und vier übereinanderliegen müßten, derartig kompliziert, daß schon die Herstellung eines Originalschaustückes Schwierigkeiten macht. Eine Vereinfachung ist es nun, daß man lediglich die drei der Ebene um ein Dreieck herum-

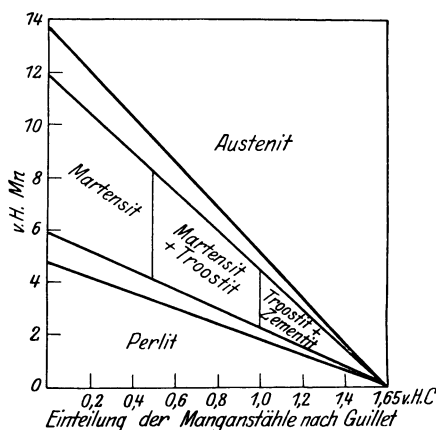


Fig. 77. Guillet-Diagramm der Manganstähle.

die drei der Ebene um ein Dreieck herum- Verschiebung der charakteristischen

Konzentration, wie z. B. der eutektischen und eutektoidischen Punkte durch Linien kenntlich macht. Immerhin erfordert aber auch das Lesen eines solchen Diagramms noch erhebliche Erfahrung. Für praktische Zwecke ist deshalb heute allgemein die Darstellung im sog. Guillet-Diagramm üblich, wie Fig. 77 als Beispiel das Diagramm der Manganstähle wiedergibt. Bei dieser Darstellung verzichtet man zunächst auf die eine Komponente, in diesem Falle auf das Eisen, dessen Menge sich aus dem Verhältnis der beiden andern ergibt, und gibt für die übrigen Zusammensetzungen nur das sich bildende Gefüge des Stahls bei normaler Behandlung an. Diese Diagramme genügen vollauf, um der Praxis mit großer Annäherung Aufschluß zu geben über die Behandlung und die Eigenschaften des Metalles. Dies Verfahren versagt jedoch, wenn statt des ternären Systems ein quaternäres System vorliegt, wie es z. B. bei Chromnickelstählen der Fall ist. Hier ist bisher der einzige Ausweg gewesen, in der Darstellung auch den Kohlenstoff unberücksichtigt zu lassen und dann ein Guillet-Diagramm für die beiden anderen Komponenten aufzustellen. Es erfordert dies natürlich eine große Anzahl von Diagrammen, da jedes Diagramm nur für einen Kohlenstoffgehalt gilt.

## B. Die Bedeutung der Gefügebilder.

Wie schon erwähnt, läßt der Aufbau der Gefügebestandteile im Schlibbild noch den Vorgang der letzten Kristallisation erkennen. Fig. 78 zeigt z. B. die Verteilung der Gefügebestandteile in den Schlibbildern von Legierungen, die neben reinen Kristallen ein eutektisches Gemenge bilden, wie es das obere Zustandschaubild angibt. Die Ordinaten in dem Diagramm geben für jede Zusammen-

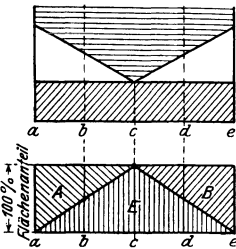


Fig. 78. Flächenanteile der Gefügebestandteile im Schlibbild.

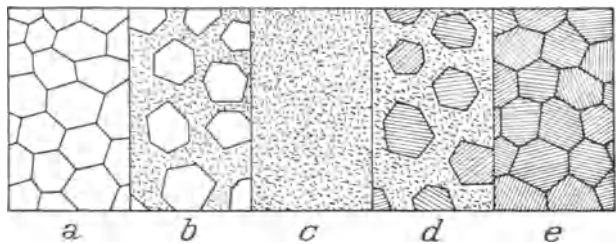


Fig. 79. Schematische Darstellung der Schlibbilder eines mechanischen Gemenges.

setzung durch ihre einzelnen Abschnitte in Prozenten den Flächenanteil der betreffenden Gefügebestandteile im Schlibbild. Der Schliff einer Legierung mit  $b\%$  B enthält also etwa  $50\%$  der Fläche Eutektikum und etwa  $50\%$  reine A-Kristalle. Der Schliff einer Legierung mit  $c\%$  B, die der eutektischen Zusammensetzung entspricht, besteht zu  $100\%$  aus Eutektikum. Bei  $d\%$  B liegen B-Kristalle im Eutektikum eingebettet, und zwar werden etwa  $50\%$  von B-Kristallen und  $50\%$  von Eutektikum eingenommen. Das Aussehen der Schlibbilder geht aus den schematisch dargestellten Schlibbildern, Fig. 79, hervor.

Ähnlich so liegen die Verhältnisse beim technischen Eisen im geglühten Zustande. Die Schlibbilder zeigen bis  $0,9\%$  mit steigendem C-Gehalt eine Zunahme des Flächenanteils des schwarz erscheinenden Perlits und eine Abnahme der hellen Ferritkristalle, wie dies aus den Fig. 80–82 hervorgeht. Über  $0,9\%$  C treten dann im Perlit weiße Zementitkristalle auf, wie es Fig. 83 und 84 zeigen. Der Perlit erscheint bei schwacher Vergrößerung als dunkle Fläche. Erst bei stärkerer

Vergrößerung erkennt man, daß hier noch ein Haufwerk von Perlit und Zementkristallen vorliegt. Diese können nun noch verschieden gelagert sein, entweder liegen sie lamellenartig nebeneinander oder der Zementit ist in Form von kleinen Kugeln eingebettet, wie es Fig. 85 und 86 zeigen. Man unterscheidet danach lamellaren Perlit und kugelige Perlit.

Die Verteilung und Ausbildung der Gefügebestandteile in einem Werkstück hängt nun von verschiedenen Bedingungen ab. Beim Erstarren eines Stoffs aus der Schmelze sinken die zuerst erstarrten Kristalle infolge ihres Gewichtes entweder nach unten oder sie scheiden sich an den kälteren Wänden ab. Hierdurch treten die unvermeidlichen Seigerungen im Metall auf, die eine Verschiedenheit zwischen den Rand- und Kernzonen des Werkstoffes zur Folge haben. Glüht man dieses Material nun bei einer Temperatur etwas unterhalb der nächsten

Umkristallisationslinie, so tritt eine Wanderung auf, die eine gleichmäßige Zusammensetzung der Mischkristalle bewirkt.

Will man aber vorliegende grobe Kristallkörner, wie sie beim langsamen Erstarren eines Gußkörpers entstehen, die ein sprödes Material bilden, in kleinere Kristalle verwandeln, muß man das Metall bis über die Kristallisationslinie erwärmen, damit die Kristalle zerfallen und sich beim Abkühlen neue Kristalle bilden. Aus dem Aufbau der Kristalle kann man

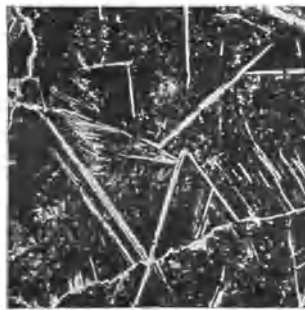
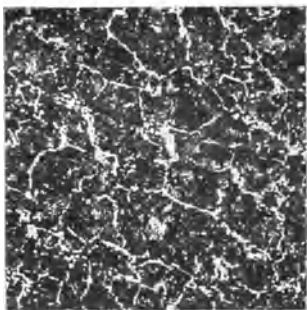
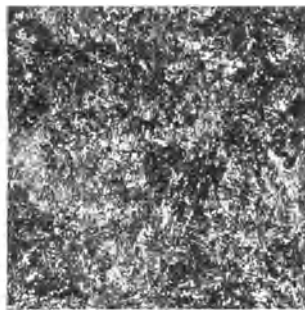
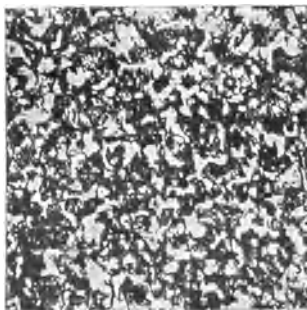
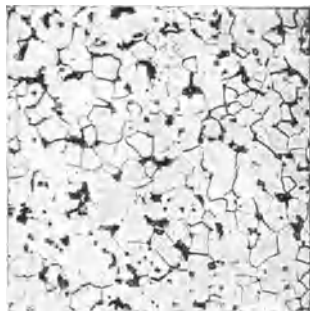


Fig. 80—84. Schliffbilder von Eisenproben mit steigendem Kohlenstoffgehalt.  $V = 200$ . 0,05% C, 0,55% C, 0,98% C, 1,23% C, 1,54% C.

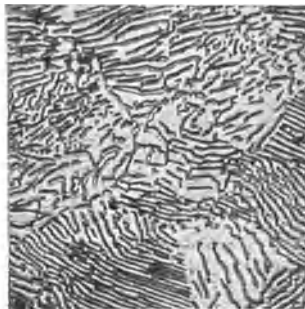
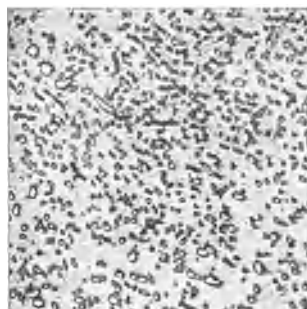


Fig. 85 u. 86. Körniger und lamellarer Perlit.

deshalb erkennen, ob ein Gußstück gegläht ist oder nicht. An der Verteilung der Schlacke kann man ferner sehen, ob ein Werkstoff geschmiedet ist oder nicht. Beim Schmieden und Walzen tritt ein Durchkneten des Werkstoffes ein, das eine Steigerung der Festigkeitseigenschaften bewirkt, weil dadurch der grobe Aufbau des Gußstückes zerstört wird. Die weichere Schlacke wird hierbei zwischen die Körner gepreßt und erscheint im Schliff als feine Schlackenfäden. An der Form der Kristalle selber kann man ferner sehen, ob der Werkstoff im kaltgereckten Zustand vorliegt. Durch das Kaltrecken entstehen in den Kristallen Gleitlinien und werden die Kristalle in gleicher Richtung deformiert.

### III. Die Röntgenuntersuchung.

#### A. Röntgendurchleuchtung.

Bei der Durchleuchtung von Metallen verwendet man besonders harte und kurzwellige Röntgenstrahlen, die je nach dem Widerstand auf ihrem Wege einen hinter der Probe angeordneten Film mehr oder weniger stark schwärzen. Nach Überwindung großer Schwierigkeiten lassen heute die neueren Erfolge auf diesem Gebiete die Hoffnung berechtigt erscheinen, daß diese Untersuchungsmethode insbesondere für die Guß- und Schweißtechnik praktische Bedeutung erhalten wird<sup>1</sup>.

Der Vorteil dieser Untersuchung liegt darin, daß man ohne Zerstörung des Werkstückes innere Fehler erkennen kann. Fig. 87 zeigt z. B. die Röntgenaufnahme einer schlechten Schweißstelle. Gasblasen und Hohlräume erscheinen in der Aufnahme als scharfrandige helle Stellen, Schlacken u. dgl. erscheinen als Zusammenballungen oder Streifen. Der Verlauf von kleinen

Schlackeneinflüssen ist an helleren Streifen zu erkennen.

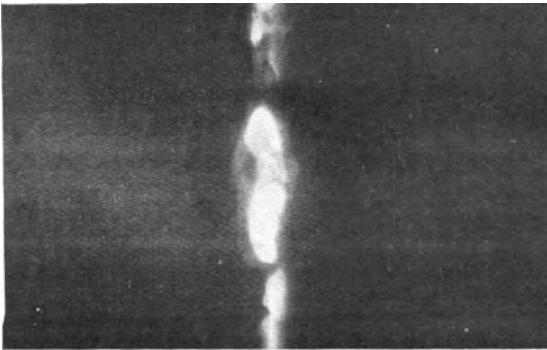


Fig. 87. Röntgenaufnahme einer schlechten Schweißnaht.

Die Belichtungszeiten liegen bei den bisherigen Versuchen zwischen 10 und 270 min, doch sind sie durch Verwendung stärkerer Röhren in letzter Zeit stark vermindert. Die größte Stärke der zu durchleuchtenden Stücke hängt von dem Stoff ab. 1921 galt als Höchstwert bei Blei 5 mm, bei Zinn 12 mm, bei Kohlenstoffeisen 75 mm, bei Aluminium und dessen Legierungen 150 mm.

Infolge des begrenzten Anwendungsgebietes hat deshalb dieses Untersuchungsverfahren bisher keinen rechten Eingang in die Praxis gefunden.

#### B. Spektroskopische Untersuchung.

##### 1. Das Raumgitter.

Von größerer Bedeutung für die wissenschaftliche Untersuchung ist die Anwendung der Röntgenstrahlen durch die Erfolge geworden, die man mit ihnen bei der Untersuchung des Feinaufbaues der Metalle erzielt hat. Durch die metallo-

<sup>1</sup> Schweißtechnische Versuchsanstalt zu Wittenberge.

graphische Untersuchung können wir die Anordnung der Kristallite erkennen. Damit ist aber dem Verfahren die Grenze gesetzt. Viele Eigenschaften und insbesondere viele chemische Vorgänge lassen sich jedoch darauf hin noch nicht erklären. Die Röntgenuntersuchung nach den Verfahren von v. Laue und Deby-Scherrer bildet nun ein Mittel, um auch über den Aufbau der Atome innerhalb der Kristallite Aufschluß zu erhalten.

Die Ausbildung der Kristallite ist, wie wir gesehen haben, von den äußeren Einflüssen bei ihrer Bildung abhängig. Eine Regelmäßigkeit der Form wie bei Einzelkristallen läßt sich bei den technischen Metallen nicht mehr erkennen. Bei der Untersuchung der

Atomanordnung hat man nun aber gefunden, daß innerhalb der Kristallite eine vom Werkstoff abhängige bestimmte Regelmäßigkeit vorliegt. Hiernach sind die Atome der Metalle in einem Kristall in Form eines

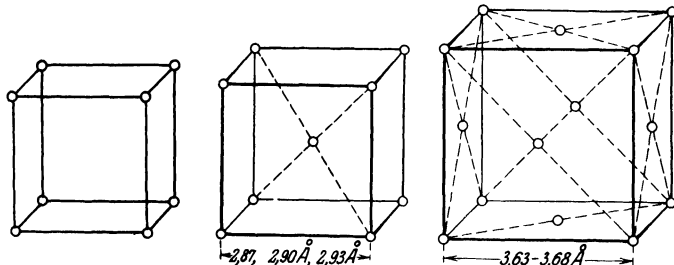


Fig. 88—90. Elementarkörper der Raumgitter.

bestimmten räumlichen Gitters angeordnet. Zur Darstellung dieser Raumgitterform gibt man für die einzelnen Stoffe die Form des Elementarkörpers an, d. h. des kleinsten möglichen Ausschnittes, aus dem durch paralleles Aneinandersetzen das Raumgitter aufgebaut werden kann.

Die Metalle besitzen im allgemeinen eine einfache, regelmäßige Anordnung ihrer Atome. Die häufigsten Formen der Elementarkörper sind in Fig. 88, 89 und 90 dargestellt. Die einfachste Form des Elementarkörpers ist die des kubischen Gitters, bei dem die Atome die acht Ecken eines Würfels bilden. Beim kubisch raumzentrierten Gitter befindet sich noch ein Atom im Schnittpunkt der Raumdiagonalen. Es ist dieses z. B. die Anordnung des  $\alpha$ -Eisens. Beim kubisch flächenzentrierten Gitter befindet sich noch je ein Atom in den sechs Schnittpunkten der Flächendiagonalen. Es ist dies z. B. das Raumgitter des  $\gamma$ -Eisens.

## 2. Das Laue-Verfahren.

Bei dem Untersuchungsverfahren, das zuerst von M. v. Laue zusammen mit Knipping und W. Friedrich in München mit Erfolg benutzt wurde, werden die Kristalle als Beugungsgitter für die Röntgenstrahlen benutzt. Hierbei gliedert sich das polychromatische Strahlenbündel durch Beugung an den Gitterteilen des Kristalls in ein Spektrum monochromatischer Strahlen, die dann auf einem sehr empfindlichen Film aufgefangen werden und dort das Laue-Diagramm ergeben. Ein Beispiel eines solchen Diagramms zeigt Fig. 91. Zum leichteren Verständnis der Entstehung eines Laue-Diagramms kann man von der Vorstellung ausgehen, daß das Röntgenlicht an den Kristallflächen reflektiert

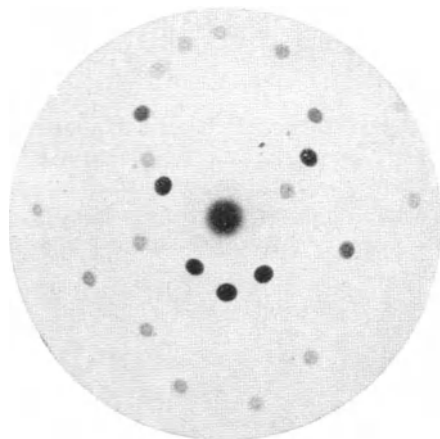


Fig. 91. Laue-Diagramm von kaltgerecktem Aluminium.

wird und die austretenden Strahlen auf einem Kegelmantel liegen, so daß auf dem Film die beleuchteten Punkte auf Kegelschnitten liegen. Ein jeder „Interferenzpunkt“ der Aufnahme verdankt also sein Entstehen der Reflexion der Röntgenstrahlen an einer Schar paralleler Gitterflächen. Durch ein ziemlich kompliziertes Rechenverfahren läßt sich aus einer solchen Laue-Aufnahme bei bekanntem Gitter die Lage des Kristalls der Versuchsprobe bestimmen.

### 3. Das Deby-Scherrer-Verfahren.

Während in festen Materialstücken die Kristalle eine geordnetere Lage ihrer Hauptorientierungsrichtung besitzen und so beim Laue-Verfahren durch die Wirkung paralleler Flächen bestimmte Röntgenstrahlen zustandekommen, wird beim Deby-Scherrer-Verfahren die Probe im pulverförmigen Zustand untersucht. Hierbei entstehen bei der Beugung nicht nur einzelne Strahlen, wie beim ersten Verfahren, die auf einem Kegelmantel liegen, sondern volle Kegelmäntel. Um die

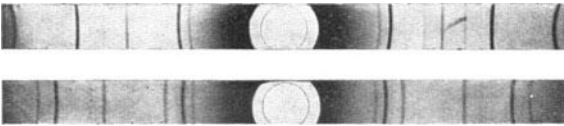


Fig. 92. Deby-Scherrer-Aufnahmen von  $\alpha$ -Eisen und von  $\gamma$ -Eisen.

Zahl der Kegel zu verringern, verwendet man bei diesem Verfahren monochromatisches Licht. Ein Beispiel einer solchen Aufnahme zeigt Fig. 92. In Wirklichkeit entstehen die Kegelmäntel auch hier nicht

durch Reflexion an den Kristallflächen, sondern durch Beugung durch die mit einer größeren Anzahl von Atomen besetzten Flächen. Wie die Figur zeigt, nimmt man bei diesem Verfahren nicht ganze Kreise auf, sondern beschränkt sich auf Sektoren.

Durch die Röntgenuntersuchung ist es nun möglich, einmal die Bestandteile des Materials zu erkennen, indem man die auftretenden Ringsysteme einer Aufnahme mit den vorliegenden bekannten Ringsystemen, die in Frage kommen, vergleicht. Man soll auf diese Weise Bestandteile erkennen können, die man auf andere Weise nur schwierig nachweisen kann. Ferner gestattet aber die Röntgenuntersuchung die Bestimmung der Orientierung der einzelnen Kristalle, wie sie besonders beim Walzen und Ziehen der Metalle von Bedeutung ist.

In vielen komplizierten Fällen hat die Röntgenuntersuchung bereits wichtige Aufschlüsse geliefert. Die Hauptarbeit auf diesem Gebiete bestand aber bisher darin, bereits bekannte Tatsachen zu bestätigen. Die großen Fortschritte der Untersuchungen und der Entwicklung der Versuchseinrichtungen lassen aber die Hoffnung berechtigt erscheinen, daß durch dieses Verfahren auch der Praxis einmal eine wichtige Handhabe gegeben wird.

# WERKSTATTBÜCHER

## FÜR BETRIEBSBEAMTE, VOR- UND FACHARBEITER

### HERAUSGEGEBEN VON EUGEN SIMON, BERLIN

In Vorbereitung bzw. unter der Presse befinden sich:

- Vorrichtungsbau II. Von Ing. Fritz Grünhagen.  
Stanztechnik I und II. Von Dipl.-Ing. Erich Krabbe.  
Stanztechnik III. Von Dr.-Ing. Walter Sellin.  
Gesensschmiede II. Von Ing. Walter Gott.  
Die Getriebe der Werkzeugmaschinen I. Von Dr.-Ing. W. Pockrandt.  
Fellen. Von Dr.-Ing. Bertold Buxbaum.
- 

**Die Brinellsche Kugeldruckprobe** und ihre praktische Anwendung bei der Werkstoffprüfung in Industriebetrieben. Von Ing. P. Wilh. Döhmer, Schweinfurt. Mit 147 Abbildungen im Text und 42 Zahlentafeln. VI, 186 Seiten. 1925. Gebunden RM 18.—

---

**Werkstoffprüfung für Maschinen- und Eisenbau.** Von Dr. G. Schulse, Ständiges Mitglied am Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem, und Studienrat Dipl.-Ing. E. Vollhardt. Mit 213 Textabbildungen. VIII, 185 Seiten. 1923. RM 7.—; gebunden RM 8.50

---

**Materialprüfung mit Röntgenstrahlen** unter besonderer Berücksichtigung der Röntgenmetallographie. Von Dr. Richard Gloeker, Professor für Röntgentechnik und Vorstand des Röntgenlaboratoriums an der Technischen Hochschule Stuttgart. Mit 256 Textabbildungen. VI, 377 Seiten. 1927. Gebunden RM 31.50

---

**Handbuch des Materialprüfungswesens für Maschinen- und Bauingenieure.** Von Prof. Dipl.-Ing. Otto Wawrzyniak, Dresden. Zweite, vermehrte und vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 641 Textabbildungen. XX, 700 Seiten. 1923. Gebunden RM 24.—

---

**Die praktische Nutzenanwendung der Prüfung des Eisens durch Ätzverfahren und mit Hilfe des Mikroskopes.** Für Ingenieure, insbesondere Betriebsbeamte. Von Dr.-Ing. E. Preuß. Bearbeitet von Professor Dr. G. Berndt-Dresden und Professor Dr.-Ing. M. v. Schwarz-München. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 204 Figuren im Text und auf einer Tafel. VIII, 198 Seiten. 1927. RM 7.80; gebunden RM 9.20

---

**Die Werkstoffe für den Dampfkesselbau.** Eigenschaften und Verhalten bei der Herstellung, Weiterverarbeitung und im Betriebe. Von Oberingenieur Dr.-Ing. K. Meerbach. Mit 53 Textabbildungen. VIII, 198 Seiten. 1922. RM 7.50; gebunden RM 9.—