

WERKSTATTBÜCHER

HEFT 34

**RIEBENSÄHM-
TRÄGER**

**WERKSTOFF-
PRÜFUNG**

METALLE



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 vorwärtsstrebenden Facharbeiter bis zum leitenden Ingenieur, Nutzen aus ihnen ziehen können.

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

Bisher sind erschienen:

- Heft 1: Gewindegewinde. 2. Aufl.
Von Oberingenieur O. M. Müller.
- Heft 2: Meßtechnik. 3. Aufl. (15.—21. Tausend.)
Von Professor Dr. techn. M. Kurrein.
- Heft 3: Das Anreißen in Maschinenbauwerkstätten. 2. Aufl. (13.—18. Tausend.)
Von Ing. Fr. Klautke.
- Heft 4: Wechselräderberechnung für Drehbänke. 3. Aufl. (13.—18. Tausend.)
Von Betriebsdirektor G. Knappe.
- Heft 5: Das Schleifen der Metalle. 2. Aufl.
Von Dr.-Ing. B. Buxbaum.
- Heft 6: Teilkopfarbeiten. 2. Aufl. (13. bis 18. Tausend.)
Von Dr.-Ing. W. Pockrandt.
- Heft 7: Härten und Vergüten.
1. Teil: Stahl und sein Verhalten. 3. Aufl. (18.—24. Tausend.)
Von Dr.-Ing. Eugen Simon.
- Heft 8: Härten und Vergüten.
2. Teil: Praxis der Warmbehandlung. 3. Aufl. (18.—24. Tausend.)
Von Dr.-Ing. Eugen Simon.
- Heft 9: Rezepte für die Werkstatt. 3. Aufl. (17.—22. Tausend.)
Von Dr. Fritz Spitzer.
- Heft 10: Kupolofenbetrieb. 2. Aufl.
Von Gießereidirektor C. Irresberger.
- Heft 11: Freiformschmiede. 1. Teil: Grundlagen, Werkstoff der Schmiede. — Technologie des Schmiedens. 2. Aufl. (7. bis 12. Tausend.)
Von F. W. Duesing und A. Stodt.
- Heft 12: Freiformschmiede. 2. Teil: Schmiedebispiele. 2. Aufl. (7.—11. Tausend.)
Von B. Preuß und A. Stodt.
- Heft 13: Die neueren Schweißverfahren. 3. Aufl. (13.—18. Tausend.)
Von Prof. Dr.-Ing. P. Schimpke.
- Heft 14: Modelltischlerei. 1. Teil: Allgemeines. Einfachere Modelle. 2. Aufl. (7. bis 12. Tausend.)
Von R. Löwer.
- Heft 15: Bohren. 2. Aufl. (8.—14. Tausend.)
Von Ing. J. Dinnebier und Dr.-Ing. H. J. Stöwer.
- Heft 16: Senken und Reiben. 2. Aufl. (8.—13. Tausend.)
Von Ing. J. Dinnebier.
- Heft 17: Modelltischlerei.
2. Teil: Beispiele von Modellen und Schablonen zum Formen. Von R. Löwer.
- Heft 18: Technische Winkelmessungen.
Von Prof. Dr. G. Berndt. 2. Aufl. (5.—9. Tausend.)
- Heft 19: Das Gußelsen. 2. Aufl.
Von Obering. Chr. Gilles.
- Heft 20: Festigkeit und Formänderung.
1. Teil: Die einfachen Fälle der Festigkeit.
Von Dr.-Ing. Kurt Lachmann.
- Heft 21: Einrichten von Automaten.
1. Teil: Die Systeme Spencer und Brown & Sharpe. Von Ing. Karl Sachse.
- Heft 22: Die Fräser. 2. Aufl. (8.—14. Tausend.)
Von Dr.-Ing. Ernst Brödner und Ing. Paul Zieting.
- Heft 23: Einrichten von Automaten.
2. Teil: Die Automaten System Gridley (Einspindel) und Cleveland und die Offenbacher Automaten.
Von Ph. Kelle, E. Gothe, A. Kreil.
- Heft 24: Stahl- und Temperguß.
Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.
- Heft 25: Die Ziehtchnik in der Blechbearbeitung. 2. Aufl. (8.—13. Tausend.)
Von Dr.-Ing. Walter Sellin.
- Heft 26: Räumen.
Von Ing. Leonhard Knoll.
- Heft 27: Einrichten von Automaten.
3. Teil: Die Mehrspindel-Automaten.
Von E. Gothe, Ph. Kelle, A. Kreil.
- Heft 28: Das Löten.
Von Dr. W. Burstyn.
- Heft 29: Kugel- und Rollenlager. (Wälzlager.)
Von Hans Behr.
- Heft 30: Gesunder Guß.
Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.
- Heft 31: Gesenkschmiede. 1. Teil: Arbeitsweise und Konstruktion der Gesenke.
Von Ph. Schweißguth.

Fortsetzung des Verzeichnisses der bisher erschienenen sowie Aufstellung der in Vorbereitung befindlichen Hefte siehe 2. Umschlagseite.

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

Preis: RM 2.— oder, wenn vor dem 1. Juli 1931 erschienen, RM 1.80 (10% Notnachlaß).

Bei Bezug von wenigstens 25 beliebigen Heften je RM 1.50.

WERKSTATTBÜCHER
FÜR BETRIEBSBEAMTE, KONSTRUKTEURE
UND FACHARBEITER

HEFT 34

Riebensahm-Traeger

Werkstoffprüfung
(Metalle)

Zweite, erweiterte Auflage

von

Dr.-Ing. P. Riebensahm

Professor an der Technischen Hochschule Berlin

Mit 97 Abbildungen im Text



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1936

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	3
Einleitung und Übersicht	3
I. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften	5
A. Wissenschaftliche Untersuchungen	5
1. Statische Untersuchungen	6
Zugversuch	6
Dauerstandversuch	18
Druckversuch	21
Biegeversuch	23
Verdrehungsversuch	24
Scher- und Lochversuch	24
Härteprüfung	25
2. Dynamische Untersuchungen	30
Schlagzug- und Schlagdruckversuch	32
Schlagbiegeversuch	33
Härteprüfung	36
3. Dynamische Daueruntersuchungen	39
Die Versuchsmaschinen und ihre Arbeitsweise	40
Ergebnisse der Dauerprüfungen	44
Beziehungen zwischen statischen und Schwingungs-Festigkeitswerten	48
4. Übersicht: Mechanische Prüfverfahren und Kennziffern	47
B. Technologische Prüfungen	48
Warmproben	49
Kaltproben	51
Funkenprobe	53
Verschiedene	53
II. Untersuchung der Feinstruktur	54
A. Metallographische Untersuchung	54
B. Röntgenuntersuchung	57
III. Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	59
A. Durchstrahlungsverfahren	59
B. Spannungsmessung	61
C. Magnetpulververfahren	62
D. Magnet-akustisches Verfahren	63
IV. Anhang	64
A. Prüfung von Schweißnähten	64
B. Probenentnahme	64
C. Prüfkosten	66

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Die Darstellung der Werkstoffprüfung aus dem Jahre 1928 bedurfte, um der Wissenschaft und Praxis gerecht zu werden, einer weitgehenden Umarbeitung und Erweiterung. Um ihr Raum zu geben, sind die Ausführungen über Metallographie und Röntgentechnik auf eine kurze grundsätzliche Darstellung beschränkt worden. So wurde es möglich, die inzwischen zu erhöhter Bedeutung gelangten Dauerversuche ausführlich genug zu behandeln. Ferner konnte die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung neu aufgenommen werden. Der Anhang: Schweißnahtprüfungen, Probenentnahme und Prüfkosten soll praktischen Bedürfnissen entgegenkommen.

Für die sorgfältige Durcharbeitung des umfangreichen und schwer in die Beschränkung eines Werkstattbuches zu fassenden Stoffes sei an dieser Stelle meinem Oberingenieur Dr.-Ing. W. Vandersee und meinem ersten Assistenten Dipl.-Ing. O. Fischer besonderer Dank ausgesprochen.

Einleitung und Übersicht.

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 Fertigung 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 Fertigung bei der spanlosen und spangebenden Formgebung, wie bei Wärmebehandlungen, als auch im fertigen Werkstück bei Belastungen oder unter dem Einfluß magnetischer, chemischer oder elektrischer Energien.

Soll die Werkstoffuntersuchung nur einzelne Angaben 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 Fertigung 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 Werkstofffachmann verlangt werden muß, daß er mit den Verhältnissen im Betriebe vertraut ist, so ist es auch

Übersicht.

	Prüfart	Ergebnis bzw. Erkenntnis
I	Mechanische Prüfungen	
	Festigkeitsprüfungen	Wissenschaftliche Zahlenwerte
	Härte- und Verschleißprüfungen	Vergleichswerte, Gebrauchseignung
	Technologische Prüfungen	Vergleichswerte, Gebrauchseignung
II	Metallographische Untersuchung: Bild des Kristallgefüges	
		Aufschluß über vorangegangene Beanspruchung oder Behandlung Vergleichswerte für mechanische Festigkeit und Gebrauchseignung
III	Röntgenuntersuchung: Molekularer Kristallaufbau und seine Veränderungen	
IV	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	
	Durchstrahlung	Fehlstellen: Risse, Lunker u. a. m.
	Magnetische Verfahren	Desgl.
	Spannungsmessungen	Innere und Betriebsspannungen
V	Physikalische Untersuchungen	
	Elektrizität	} Physikalische Eigenschaften
	Wärme	
	Licht	
	Schall	
Spektralanalyse	Art und Menge der Zusammensetzung	
VI	Chemische Untersuchungen	
	Analyse	Art und Menge der Zusammensetzung
	Widerstandsfähigkeit	Gebrauchseignung

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 Stoffe 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 Stoffe 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.

Bei der Auswahl von Baustoffen sind im allgemeinen die mechanischen Eigenschaften von ausschlaggebender Bedeutung. Dementsprechend steht auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung die mechanische Untersuchung 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 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 Fertigung oder am fertigen Werkstück auftreten, um seine Verwendbarkeit festzustellen. Es wird aber kein Wert darauf gelegt, das Ergebnis der Untersuchung zahlenmäßig zu erfassen.

Der mechanischen Werkstoffprüfung gelten daher in erster Linie die Ausführungen des vorliegenden Heftes. Die metallographische und Röntgenuntersuchung haben sich zu Sonderwissenschaften entwickelt, die im Rahmen der Werkstoffprüfung gleich vollständig zu behandeln, nicht ohne weiteres möglich ist. Die physikalischen und chemischen Untersuchungen sind aus demselben Grunde nicht Gegenstand des vorliegenden Heftes. Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung beginnt eine besondere Bedeutung zu bekommen. Die Überwachung der Fertigung lebenswichtiger Maschinenteile und ihre fortlaufende Überwachung im Dienst sind heute eine unerläßliche Forderung. Die verhältnismäßig kurze Behandlung dieses Abschnittes im vorliegenden Heft ist darin begründet, daß dieses Gebiet erst im Anfang seiner Entwicklung steht.

I. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften.

A. Wissenschaftliche Prüfverfahren.

Die einem Werkstück zugemuteten Beanspruchungen lassen sich grundsätzlich in statische und dynamische trennen. Bei der statischen Beanspruchung unterliegt das Werkstück einer gleichmäßigen ruhenden Last, durch die der Werkstoff 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.

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 Stoff 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.

Das Zerreischaubild. Die Darstellung der Verlängerung des Probestabes in Abhängigkeit von der Belastung stellt das Zerreischaubild dar, in dem normalerweise die Verlängerung 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 Werkstoffprüfungstechnik wird diese Größe als Spannung bezeichnet und im allgemeinen in der Dimension kg/mm^2 angegeben. Nur in einigen

Fällen ist hierfür noch kg/cm^2 üblich. Die Verlängerung des Probestabes wird zur Auswertung des Versuches in Hunderteln ausgedrückt, wobei, wie später erläutert wird, die Ausgangslänge des Probestabes berücksichtigt werden muß.

Der Verlauf der Zerreikurve ist bei den Metallen sehr verschieden. Abb. 1 zeigt die typische Form des Bildes bei weichem Flußstahl. Das Bild besagt, daß der Stoff 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 der Stoff wieder in einen Gleichgewichtszustand 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

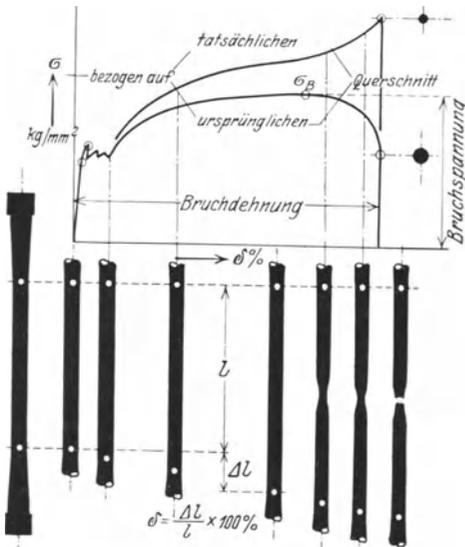


Abb. 2. Reduziertes Zerreischaubild und Stabformänderungen.

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

¹ Nach DIN 1602 wird die Dehnung mit ϵ , die Bruchdehnung mit δ bezeichnet.

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

Um aus dem Schaubild der Belastungen in kg und Verlängerungen in mm das Zerreischaubild 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 Belastungsschaubildes dahin, daß man nur die Belastungen durch den ursprünglichen Querschnitt und die Verlängerung durch die ursprüngliche Versuchslänge zu dividieren braucht, entsprechend den Formeln:

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

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

Wie wenig dieses praktische Schaubild, 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 Abb. 2. Besonders groß wird der Unterschied nach Überschreiten der Höchstlast P_B . Während das praktische Zerreischaubild eine Abnahme der Tragfähigkeit des Werkstoffes anzeigt, ergibt sich aus dem reduzierten Zerreischaubild, daß auch in diesem Bereich die Spannung im Werkstoff wächst.

Die Dehnung bzw. die Verlängerung im Zerreischaubild entspricht der Dehnung der ganzen Probestablänge, wenn man zunächst von den Fehlern bei der Aufnahme eines Zerreischaubildes absieht. Abb. 3 dagegen zeigt die Dehnungen der einzelnen Teile eines 20fach unterteilten Probestabes.

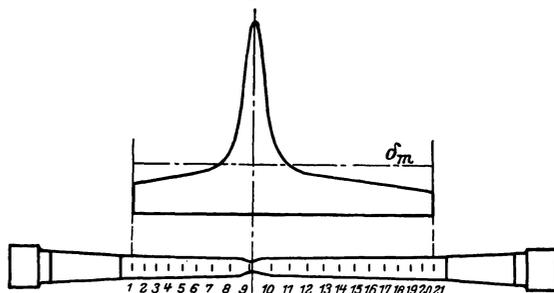


Abb. 3. Die Dehnung der einzelnen Teile eines Zerreißstabes.

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.

Es ergibt sich hieraus zunächst, daß für die Dehnungsbestimmung unbedingt eine bestimmte Probestablänge 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 sein muß. Die praktische Bestimmung der Dehnung beim Zerreißversuch ist deshalb durch DIN 1605 festgelegt. Für genauere Untersuchungen wird die Meßlänge des Probestabes in 20 Teile unterteilt. Nach dem Bruch wird die Länge l' (Abb. 4) von der Endmarke der Meßlänge bis zur

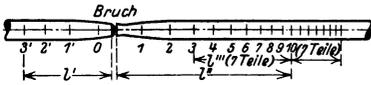


Abb. 4. Genaue Bestimmung der Dehnung (DIN 1605).

Bruchstelle des kurzen Stabteils und die Länge l'' von der Bruchfläche bis zur zehnten Marke auf dem anderen Stabteil bestimmt. Die restlichen Teile auf dem größeren Stabteil geben die nicht meßbaren 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 mit. Die Verlängerung Δl 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 dem Unterschied der Melngen nach und vor dem Versuch die Dehnung zu berechnen.

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

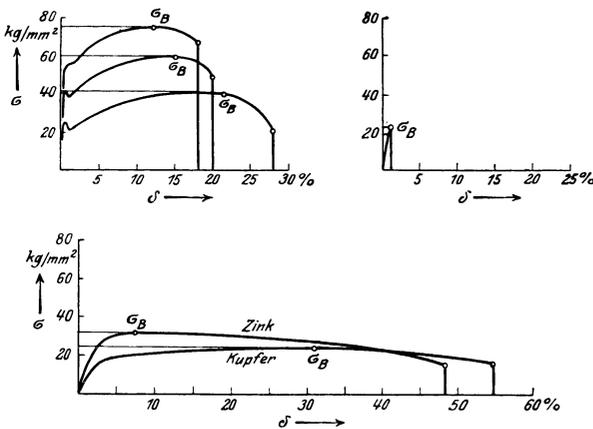


Abb. 5. Zerreidiagramme verschiedener Metalle.

Bei Sthlen wird mit zunehmender Zugfestigkeit die Bruchdehnung geringer und gleichzeitig die Streckgrenze schwächer ausgeprägt. Gußeisen, das geringe Festigkeit und sehr geringe Dehnung besitzt, zeigt im Schaubild 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 Schaubilder von dem des Stahls meistens dadurch, daß sie bereits bei geringen Belastungen verhältnismäßig große Verlängerungen zeigen, und daß die Kurve anfangs nicht gerade verläuft, d. h. daß Dehnung und Spannung nicht verhältnisgleich sind.

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

Von den äußeren Erscheinungen an den Versuchsstoffen während des Zerreiversuches seien hier nur die Fließlinien und die charakteristischen Formen der Bruchflächen erwähnt. Die Fließlinien, auch Ldersche oder Hartmannsche Linien genannt, erscheinen als dunkle Linien auf den polierten Probestäben, wenn die Spannung über die Streckgrenze σ_{ZF} (vgl. Abb. 1: S_0) steigt. Sie verlaufen, sich gegenseitig schneidend, unter $45^\circ \dots 60^\circ$ gegen die Stabachse geneigt (Abb. 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 der Oberflächenschicht auf diesen Linien deutlich. Sie bieten infolgedessen ein Mittel, um bei Brüchen in der Praxis festzustellen, ob der Stoff 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.

Der ideale Bruch eines Zerreißstabes ergibt drei Teile (Abbildung 8a): An der Bruchstelle ziehen sich zwei kegelförmige Spitzen aus einem am

Umfang stehengebliebenen 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 Abb. 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 Kegelform 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 Stoffes 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.

Es sei deshalb nur auf die durchweg maßgebende Erscheinung der Einschnürung an der Bruchstelle hingewiesen. Sie bietet in vielen Fällen einen besseren Anhalt zur Beurteilung der Zähigkeit als die Bruchdehnung. Es geht dies aus Abb. 6 hervor, in der neben den Zerreißschaubildern die Bruchstellen dargestellt sind. Die Bruchfläche eines zähen Stahls besitzt einen großen Trichterrand, während ein

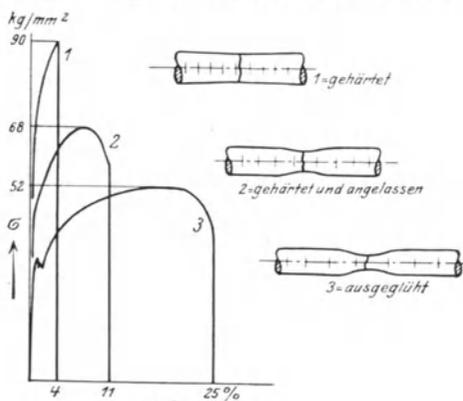


Abb. 6. Zerreißdiagramme eines Stahls gehärtet, angelassen und ausgeglüht.

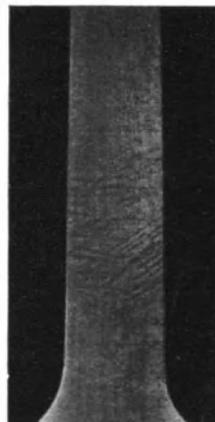


Abb. 7. Fließlinien auf einem Flachstab.

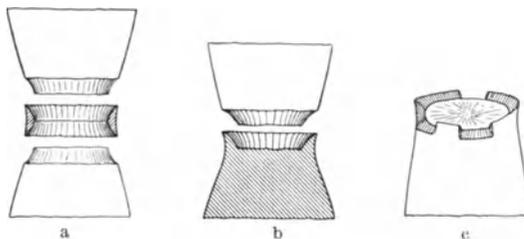


Abb. 8. Bruchformen des Zerreißstabes.

harter Werkzeugstahl ohne Einschnürung und ohne Trichterrand zerreißt. Gehärtete Werkzeugstähle ergeben oft ein fräserartiges Bruchaussehen.

Bei normalen Flustahlproben 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 perlchnurartige Aufrauung an der Oberfläche des Stabes.

Die charakteristischen Werte des Zerreischaubildes. Die Zugfestigkeit σ_{zB} ist die höchste Spannung, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt, die der Werkstoff vor dem Bruch ausgehalten hat. Sie entspricht also, wie Abb. 2 zeigt, nicht der Spannung im Augenblick des Bruches.

Die Bruchdehnung δ ist die mittlere Dehnung der Stablänge nach dem Bruch, bezogen auf die ursprüngliche Länge. Sie fällt also im Zerreischaubild nicht mit der Zugfestigkeit zusammen.

Die obere Streckgrenze σ_{zF_o} ist die Spannung, bei der der Stab ohne Vergrößerung der Belastung eine Längung erfährt.

Die untere Streckgrenze σ_{zF_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 σ_{zP} ist die Spannung, bis zu der der Stab bei gleichen Laststeigerungen gleiche Längenänderungen zeigt.

Elastizitätsgrenze σ_{zE} 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 (0,003...0,01%).

Einschnürung (Kontraktion) ψ ist die Querschnittsverminderung an der Bruchstelle in Hundertteilen des ursprünglichen Querschnittes.

Arbeitsvermögen ist der Inhalt der Fläche des Zerreischaubildes 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 Zerreischaubildes und dem Inhalt des Rechteckes, dessen Seiten parallel zu den Koordinatenachsen die Schaubildfläche begrenzen.

Die Stabformen. Das Ziel der wissenschaftlichen Untersuchung ist, wie anfangs erwähnt, ein zahlenmäßig fabares Ergebnis mit bestimmter Dimension, das mit anderen verglichen werden kann. Die Untersuchung erfordert daher genau festgelegte Versuchsbedingungen. Von größter Bedeutung ist-zunächst die Form des Probestabes. Abb. 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 Werkstofflängen 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. Abb. 9) gewahrt bleiben. Auf Grund dieser Beziehung 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 Abb. 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.

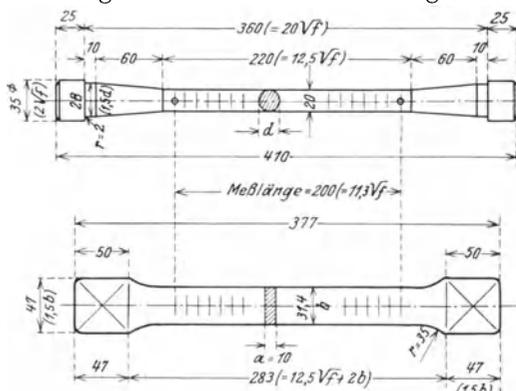


Abb. 9. Normal- und Proportional-Zerreißstab.

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 dessen Stabformen von den deutschen oft beträchtlich abweichen. Die durch DIN 1605 festgelegten Stabformen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Zerreißstäbe.

Bezeichnung der Probestabform	Abmessungen in mm			Dehnungsbezeichnung
	kleinste Versuchslänge	Meßlänge l	\varnothing^1	
Langer } Normalstab	220	$(10d) = 200$	20	δ_{10}
Kurzer }		$(5d) = 100$		
Langer } Proportionalstab	$l + d$	$10d = 11,3\sqrt{F_0}$	beliebig	δ_{10}
Kurzer }		$5d = 5,65\sqrt{F_0}$		
Langstab		200		δ_l
Kurzstab		100		δ_k

Die Differenz in den Dehnungswerten bei kurzen und langen Proportionalstben erhellt aus den Normvorschriften für Schmiedestahl DIN 1611.

Es zeigt sich aus diesen Werten gleichzeitig, daß bei härteren Sthlen, 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 Stoffanhufung im Kopf wird die Bewegung der anschließenden Stoffteile behindert und infolgedessen die Dehnung der Teile in der Nähe des Kopfes ver-

¹ Bei nicht kreisförmigen Querschnitten gilt der Durchmesser des dem Stabquerschnitt flächengleichen Kreises.

Tabelle 2.

σ_{zB} kg/mm ²	δ_5 %	δ_{10} %
34...42	30	25
60...70	17	14

kleinert. Für wissenschaftliche Versuche ist es deshalb notwendig, sich genau an die 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 Werkstoffdicken. Abb. 10 zeigt die üblichen Kopfformen und Einspannungen für praktische Versuche. Bei der Kopfform

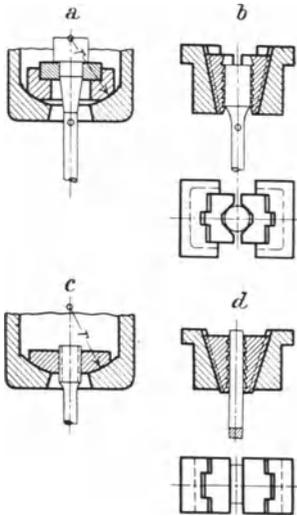


Abb. 10. Stabeinspannungen beim Zerreißversuch.

Abb. 10 a des Normalstabes ruht der zylindrische Ansatz auf einer kugelig gewölbten Unterlage, so daß eine gute Ausrichtung des Stabes und eine geringe Beeinflussung der Stoffbewegung gewährleistet ist. Bei der einfacheren Einspannung Abb. 10 b 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 Abb. 10 c, bei der der Kopf des Probestabes mit Gewinde versehen ist und in eine kugelschalenfrmige Unterlage eingeschraubt wird. Diese Einspannung ist der vorigen vorzuziehen, weil der Probestab sich ausrichten kann und infolgedessen die Gefahr einer zusätzlichen Biegebbeanspruchung fortfällt. Da bei ihr auch die vorliegende Dicke 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 (Abb. 10 d) blicher 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.

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 Zerreißmaschinen angeben, da es hauptsächlich immer auf den Zweck und die Bedienung der Maschine ankommt. Als Kraftmesser sind Pendelwaagen, Laufgewichtswaagen und Medosen mit Manometer gleich üblich. Bei der Laufgewichtswaage 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 Dezimalwaagen. 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 kg/cm^2 und der Größe der Kolbenfläche ergibt sich die Gesamtbelastung (Abb. 11). Bei den neuerlichen Ausführungen der Medosen ist die Genauigkeit der Anzeige kaum geringer als bei guten Laufgewichtswaagen. Im all-

gemeinen braucht für die Benutzung der Kraftmesser nur darauf hingewiesen zu werden, daß die Belastung auf Grund einer von Zeit zu Zeit zu prüfenden Eichkurve bestimmt werden soll und nicht nach den auf den Apparaten selbst angegebenen 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 prüfen, da durch die Abnutzung und verschiedene äußere Einflüsse die Empfindlichkeit der Maschine stark beeinflußt wird. Zur Eichung benutzt man besondere Eichstäbe, die die Form großer Proportionalstäbe haben und die bei der Höchstbelastung der Maschine nicht über ihre Elastizitätsgrenze 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 Verformung zweier gebogener geeichter Federn durch Meßuhren angezeigt und aus der Größe der Verformung die Belastung bestimmt wird, oder bei denen der Druck auf in einem Hohlgefäß eingeschlossenes Quecksilber übertragen und durch genaue Manometer bestimmt wird.

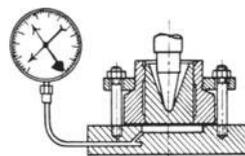


Abb. 11. Schema einer Meßdose.

Abb. 12 zeigt als Beispiel die Wirkungsweise einer Zerreißmaschine mit mechanischem Antrieb und mit Kraftbestimmung durch Laufgewichtswaage. Für die Untersuchung langer Probestäbe bzw. Seile, Ketten usw., sind Maschinen mit waagerechter Anordnung der Krafrichtung der leichteren Zugänglichkeit wegen vorzuziehen. In ihrer Wirkungsweise unterscheiden sich diese Maschinen jedoch nicht von den senkrechten Zerreißmaschinen. Bei kleinen Stäben oder Werkstoffen geringer Festigkeit wie Papier, Gewebe usw., sind als Kraftmesser Pendelgewichte üblich. Die Belastung ergibt sich hierbei aus dem Ausschlag des Pendels, mit dem der wirksame Hebelarm des Gewichtes sich vergrößert.

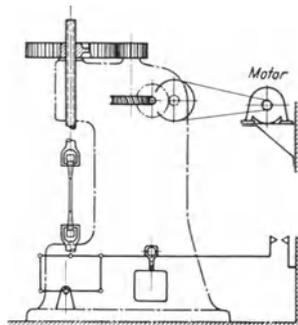


Abb. 12. Schema einer Zerreißmaschine mit mechanischem Antrieb und Laufgewichtswaage.

Wie später erwähnt ist, kann fast jede Zerreißmaschine mit Hilfe leicht einzubauender Vorrichtungen zu Druck- und Biegeprüfungen verwandt werden. Viele neuzeitliche Zerreißmaschinen besitzen bereits derartige Einrichtungen fest eingebaut. Eine solche Universalprüfmaschine für Zug, Druck und Biegung zeigt Abb. 13.

Besondere Beachtung erfordert beim Zerreißversuch die Bestimmung der Dehnung. Die mittlere Gesamtdehnung kann nach dem Versuch an dem gebrochenen Stab bestimmt werden, wie bereits auf S. 7 angegeben wurde. Sie ist aber nicht aus dem von der Maschine aufgezeichneten Schaubild zu entnehmen, da hierin gewöhnlich das Spiel der Maschine und der Einspannvorrichtung sowie die Formänderung der Probe außerhalb der Meßlänge enthalten sind. Während die Zugfestigkeit unabhängig von der Dehnung aus der Höchstbelastung bestimmt wird, muß zur Bestimmung 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 Schaubild 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 Elasti-

zitätsgrenze müssen sogar Längenänderungen von nur 0,006...0,02 mm bzw. 0,003...0,01 mm beobachtet werden. Die Bestimmung dieser geringen Längenänderungen erfordert besondere Feinmeßinstrumente.

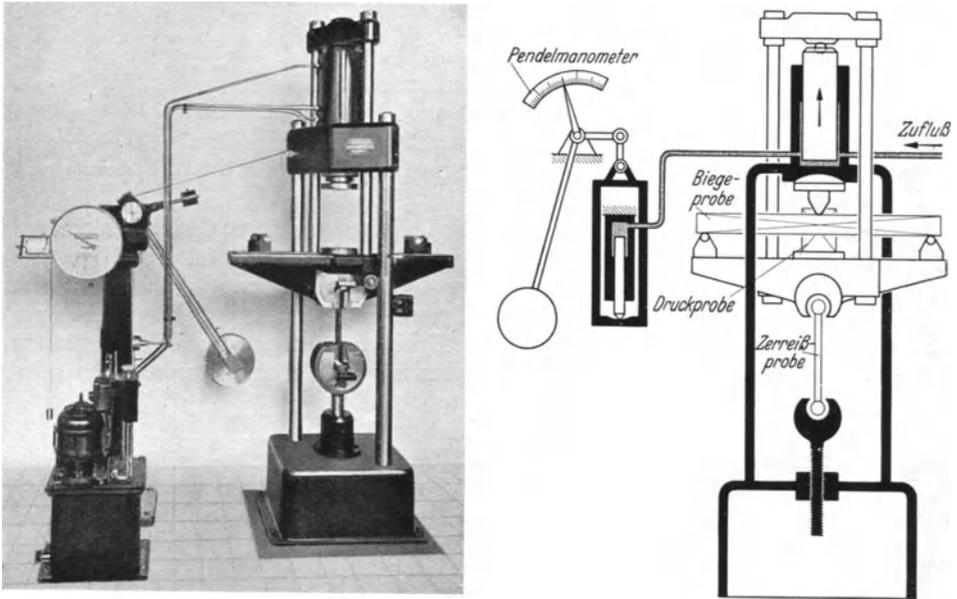


Abb. 13. Universalprüfmaschine mit hydraulischem Antrieb und Pendelwaage (Mohr & Federhauff).

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

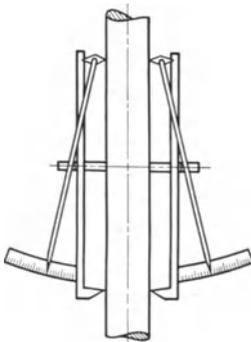


Abb. 14. Dehnungsmeßinstrument von Martens-Kennedy.

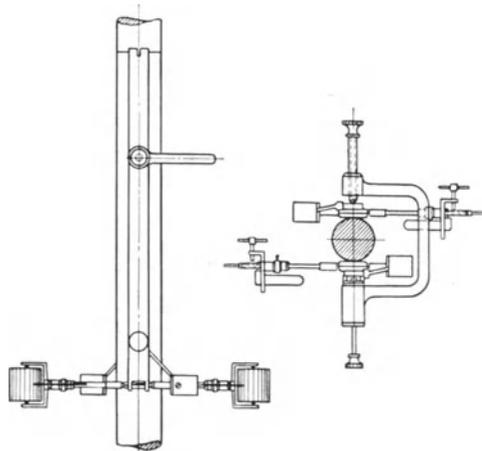


Abb. 15. Martenssche Spiegel am Zerreißstab.

Beim Apparat von Martens-Kennedy, Abb. 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. Bekannter 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. Abb. 16). Die zahlreichen modernen Dehnungsmeßgeräte beruhen größtenteils auf dem Grundsatz dieser beiden Apparate.

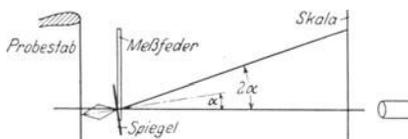


Abb. 16. Wirkungsweise des Martensschen Spiegels.

Bei vielen Baustoffen ist es wichtig, die Festigkeit bei höheren oder niederen Temperaturen zu bestimmen, wie z. B. bei Dampfkesselblechen oder Transformatorenbaustoffen. 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 Kohlenensäure 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 Stoffes darstellte, und noch heute richten sich die Angaben über zulässige Spannungen (k_z) in behördlichen Vorschriften nach der Zugfestigkeit σ_{zB} oder, wie die alte Bezeichnung hieß, nach K_z . Eine zehnfache Sicherheit bedeutete also $k_z = \frac{1}{10} K_z$. 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 Meßgeräten 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/mm²). 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 Stoff 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

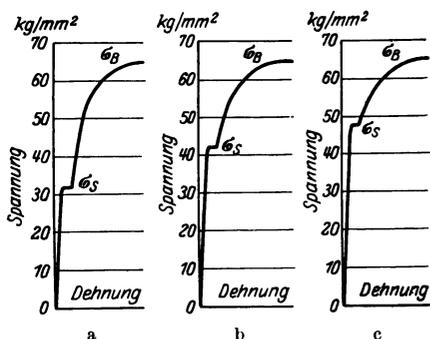


Abb. 17. Zerreißschaubilder von Kohlenstoffstahl (a), Manganstahl (b) und Chromnickelstahl (c).

der Zugfestigkeit. Welche Verschiebungen der Festigkeitsgrößen hierdurch eintreten, zeigt Abb. 17, die die Zerreißschaubilder dreier Stähle mit gleicher Zugfestigkeit und ungefähr gleicher Dehnung wiedergibt, bei denen aber die Streckgrenzen verschieden hoch liegen.

Ein weiterer Grund für die Berechnung von Werkstücken nach der Streckgrenze ergibt sich aus Abb. 18. Abb. 18 zeigt eine Zusammenstellung der sich hieraus ergebenden Werte der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung.

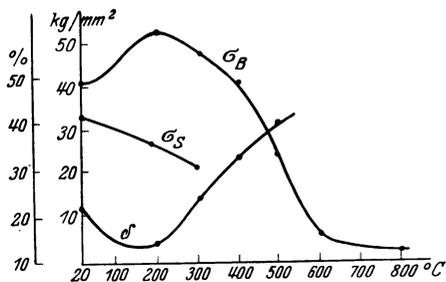


Abb. 18. Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze von Stahl bei verschiedenen Temperaturen.

trachtet 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 Verformung 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

Bewertung allein nach der Fließgrenze seine Konstruktion allmählich völlig verformen, da der Baustoff eine sehr niedrige Elastizitätsgrenze besitzen kann. Es gibt eben für die Bewertung eines Baustoffes keine einfache oder gleichbleibende Formel, besonders nicht für den Konstrukteur, sondern es sind immer eine Reihe von Festigkeitsgrößen 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

Formveränderung unter Umständen eine Spannungsverschiebung eintreten, durch die der Bruch verhindert werden kann, oder es kann dadurch die Verformung 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 Dauer-Beanspruchungen sind dehnbare Baustoffe gewöhnlich nicht so widerstandsfähig. 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 Probesteile, 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 Werkstoffes, wie beim Ziehen, Drücken usw.

Schließlich bedarf es nun der weiteren Erwägung, für welche Beanspruchungen die Werte des Zerreiversuches 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 Stoff 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 B.			
Zerreidauer	19 s	150 s	22 min	Zerreidauer	17 s	150 s	23 min
$\sigma_{z.B}$	40,0	39,3	38,6 kg/mm ²	$\sigma_{z.B}$	56,2	55,1	53,4 kg/mm ²
δ	?	30,8	32,5 %	δ	?	25,5	26,9 %

Dieselbe Verschiebung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Versuchsgeschwindigkeit tritt beim Zink auf, das eine Zugfestigkeit von 23,2 kg/mm² ergab, wenn der Probestab in 7 s zerrissen wurde, dagegen eine Zugfestigkeit von 20,7 kg/mm², wenn der Stab langsam in 9 min zerrissen wurde. Abb. 19 zeigt die Zerreißschaubilder von Zink mit verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten nach Martens, die bei abnehmender Versuchsgeschwindigkeit kleinere Festigkeit und größere Dehnung zeigen.

Aus diesen Beispielen ergibt sich, daß der Zerreißversuch nicht einmal für alle Belastungsfälle mit steigender Spannung einwandfreie Zahlenwerte liefert. Noch wichtiger aber ist die Verschiebung der Festigkeitswerte bei wirklich ruhender Last.

Hier haben Untersuchungen von Welter über das Verhalten der Metalle bei Dauerbelastungen bemerkenswerte Ergebnisse gehabt, die in Tabelle 4 zusammengestellt sind. Diese Ergebnisse 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 neuzeitlichen 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. ber die Verschiebung der Streck-

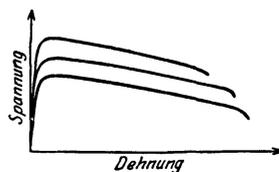


Abb. 19. Zerreiß-Schaubilder von Zink bei verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten (Martens).

Tabelle 4. Statische Dauerfestigkeit.

	σ_{zE} 0,001% kg/mm ²	σ_{zE} 0,02% kg/mm ²	σ_{zF} 0,2% kg/mm ²	σ_{zB} — kg/mm ²	δ — %	Dauerversuch	
						Spannung kg/mm ²	Bruch
Messing 56,9 Cu, 1,74 Pb	7,5	11,5	15,5	45	37	40 35,30 20,10	8 Tage — ¹
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	33,4	7,5	30 25 20,15	0 min 9 Mon. — ¹
Al hart	5,5	8,5	9,5	11,5	11,5	10 8 6,4	3 Tage 8 Mon. — ¹
Härtb. Al-Legierung, Type Dural.	17...18	20	26	44	16	40 35,30	26 st — ¹
Härtb. Al-Legierung, Type Skleron	19...20	26	35	48	13	40 35 30	— ¹
Stahl gewalzt 0,10 bis 0,15 % C .	32	32	32	44,3	37,0	35 30	— ¹
Stahl gezogen 0,3 % C	42	55	60	72	10	60 40	— ¹

grenze 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 Stoffeigenschaften gefordert werden. So sollte z. B. ein Stahl mit einer vorgeschriebenen Festigkeit von 60 kg/mm² und 18% δ_{10} nicht zurückgewiesen werden, wenn der Zerreißversuch 61 kg/mm² und 17,0% δ_{10} ergibt, oder wenn die Prüfung 58 kg/mm² und 19,0% δ_{10} ergibt.

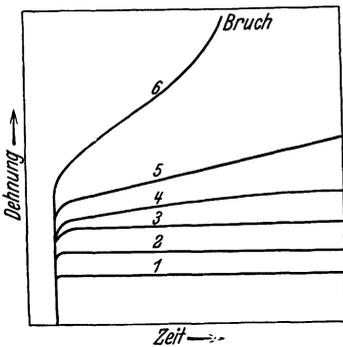


Abb. 20. Abhängigkeit der Dehnung von Belastung und Zeit nach Siebel und Ulrich.

Der Dauerstandversuch.

Die oben gegebenen Ausführungen haben gezeigt, daß die Eigenschaften der Metalle unter Umständen in besonderem Maße von der Dauer der Belastung, die ja im Betriebe viele Jahre dauern kann, abhängig sein können. Besonders wirksam ist dieser Umstand bei bildsamen Nichteisenmetallen und bei Stählen in höheren Temperaturen.

Abb. 20 zeigt in schematischer Darstellung, wie die Dehnungsverhältnisse bei verschiedenen Belastungsstufen sehr verschieden sein können:

Bei geringen Belastungen stellt sich sofort ein bestimmter Dehnungswert ein, der sich auch in beliebig langer Zeit nicht ändert. Bei höheren Belastungen steigen die anfänglichen Dehnungswerte bei gleichbleibender Last mit der Zeit an, und

¹ Nach 12 Monaten noch nicht gebrochen.

zwar bis zu gewissen Endwerten. Bei einer bestimmten Höchstlast führt die Steigerung des anfänglichen Dehnungswerts nach einiger Zeit zum Bruch.

Nicht nur der Bruch, sondern auch größere Dehnungswerte — über 0,2% bleibender Dehnung — müssen bei den meisten Konstruktionsteilen vermieden werden. Es müssen also zwei Spannungswerte ermittelt werden:

1. Die Dauerstandfestigkeit, das ist die Spannung, bei der das Dehnen gerade noch ohne Bruch zum Stillstand kommt.

2. Die Dauerstandfließgrenze, das ist die Spannung, bei der nach Erreichen einer bleibenden Dehnung von 0,2% das Dehnen aufhört.

Nach Abb. 21 wird der Probestab in zwei Einspannköpfen allseitig frei beweglich eingespannt. Die Einspannköpfe sind mit Schneiden in das Gestell und den Belastungshebel eingehängt.

Die Dehnung wird mit dem Martens-Spiegelapparat bestimmt. Die Vorrichtung muß erschütterungsfrei aufgehängt sein, Temperaturschwankungen müssen möglichst vollkommen vermieden werden, da bei den geringen Dehnungswerten die Temperaturausdehnung Schwankungen der Ablesungswerte hervorrufen kann. Die Genauigkeit der Ablesung beträgt 0,001 mm.

Zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit und der Dauerstandfließgrenze bei hohen Temperaturen, wie es für Stahl notwendig ist, verwendet man einen elektrischen Ofen, der den Probestab mit den Verlängerungsstücken und die Federn der Feinmeßeinrichtung umschließt (Abb. 22). Die Ofentemperatur wird von selbsttätigen Geräten geregelt.

Die Dauerstandfestigkeit. Ihrer Ermittlung stellt sich die Schwierigkeit entgegen, daß die Dehnungen bei vielen Werkstoffen noch nach zwölf und mehr Monaten fortschreiten, und daß es oft gar nicht sicher ist, ob die Dehnung überhaupt zum Stillstand kommt. Es mußte hier ein Abkürzungsverfahren gefunden werden, das sich in einem annehmbaren Zeitraum durchführen läßt. Diese Abkürzungsverfahren sind jedoch immer Annäherungsverfahren.

Bei diesem Abkürzungsverfahren geht man nicht bis zu dem Spannungswert, bei dem die Dehnung nach sehr langer Zeit vollkommen aufhört, sondern nur bis

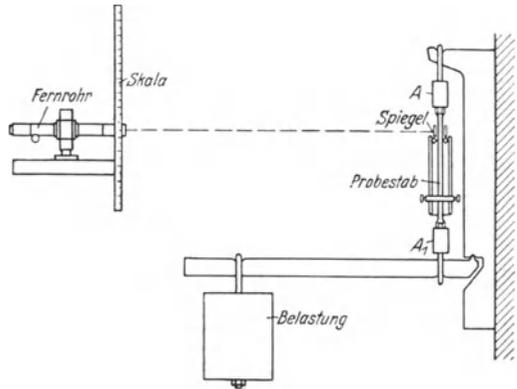


Abb. 21. Vorrichtung zur Bestimmung der Dauerstandfestigkeit.

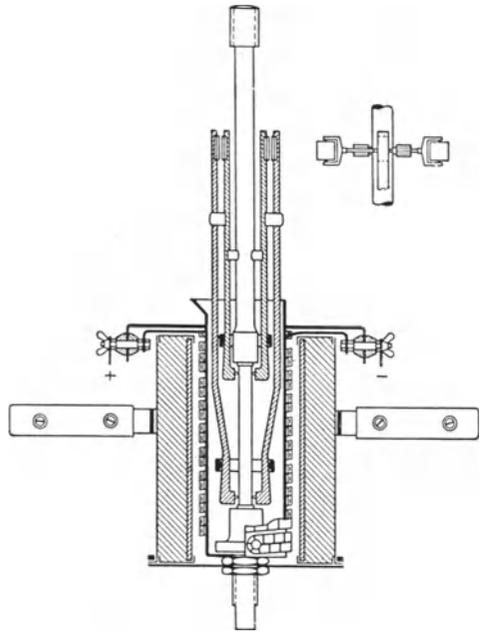


Abb. 22. Vorrichtung für Untersuchung bei hohen Temperaturen.

zu einem Spannungswert, bei dem die Dehnung innerhalb einer zulässigen Versuchszeit einen so geringen Betrag erreicht, daß angenommen werden kann, das weitere Dehnen werde in praktisch in Betracht kommender Zeit zum Stillstand kommen. Diese Spannung ist die praktische Dauerstandfestigkeit.

Diese Dauerstandfestigkeit wird nach dem Schema Abb. 23 gefunden. Es werden bei der entsprechenden Temperatur einige Versuche mit verschiedenen Belastungen ausgeführt

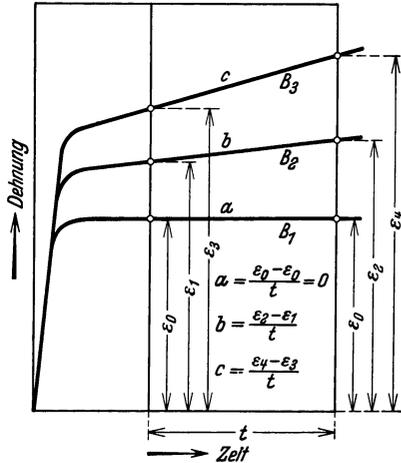


Abb. 23. Bestimmung der Dauerstandfestigkeit.

und für den Zeitraum 25. bis 35. Stunde die Dehngeschwindigkeit ermittelt. Die Dehngeschwindigkeit ist gleich der Differenz der Dehnung am Meßpunkt zwischen der 35. und 25. Stunde, dividiert durch die Zeitspanne in Stunden (35—25 = 10 h). Dann wird die gefundene Dehngeschwindigkeit in Abhängigkeit der Belastung aufgetragen (Abb. 24) und aus der gezeichneten Kurve die Spannung abgelesen, die einer Dehngeschwindigkeit von 0,001 %/h entspricht.

Die Dauerstandfestigkeit ist ermittelt. Die Dehngeschwindigkeit ist gleich der Differenz der Dehnung am Meßpunkt zwischen der 35. und 25. Stunde, dividiert durch die Zeitspanne in Stunden (35—25 = 10 h). Dann wird die gefundene Dehngeschwindigkeit in Abhängigkeit der Belastung aufgetragen (Abb. 24) und aus der

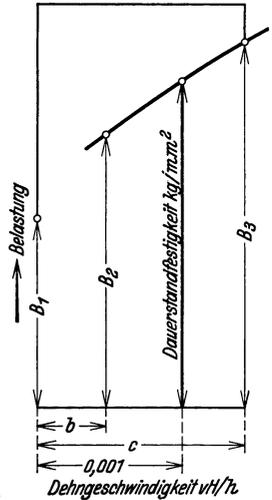


Abb. 24. Bestimmung der Dauerstandfestigkeit.

Die Dauerstandfließgrenze. In gleicher Weise ist für die Dauerstandfließgrenze ein praktischer Begriff gebildet.

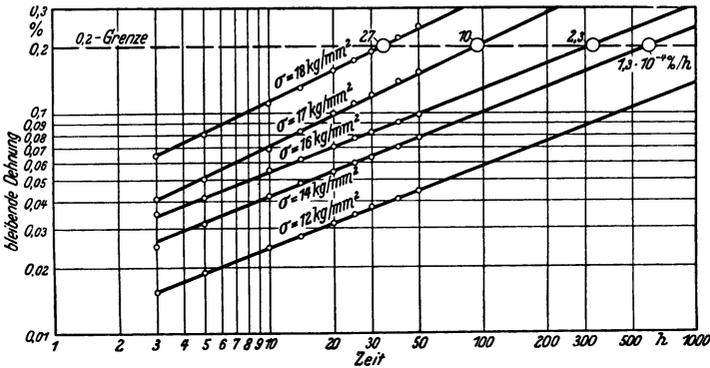


Abb. 25. Zeitdehnungslinien zur Bestimmung der praktischen Dauerstandfließgrenze nach Siebel und Ulrich.

Die praktische Dauerstandfließgrenze ist nach Siebel und Ulrich die Spannung, bei der bei einer bleibenden Dehnung von 0,2 % die Dehngeschwindigkeit $1/1000$ %/h beträgt. Diese Forscher haben folgendes Abkürzungsverfahren ermittelt, das in mindestens 50 h zu einem praktisch brauchbaren Ergebnis führen soll: Sie gehen von der Tatsache aus, daß die Zeitdehnlinien mit großer Annäherung als Parabeln bezeichnet werden können. Bei Eintragung dieser Zeitdehnlinien in ein

logarithmisches Koordinatensystem ergeben sich dann gerade Linien. Man kann also, wenn einige Versuchspunkte bekannt sind, die Zeitdehnlagen als Gerade genau zeichnen und über den letzten Versuchspunkt soweit wie nötig verlängern (Extrapolation), bis sie die 0,2-Dehngrenze erreichen (Abb. 25). Die Dehngeschwindigkeit am Schnittpunkt wird dann in bekannter Weise gefunden. Der genaue Wert der Dauerfließgrenze wird aus den Versuchswerten durch Interpolation nach Abb. 24 ermittelt.

Beurteilung beider Verfahren. Die Werte der beiden Verfahren decken sich in den meisten Fällen. Bei der Ermittlung der Dauerstandfestigkeit können beim Übergang von der 0,2-Dehngrenze zur Dauerstandfestigkeit, also über 350 bzw. 450^o, höhere Dehnungen als 0,2% aufgetreten sein, weil hier nur die Dehngeschwindigkeit zwischen 25. und 35. Stunde, nicht aber die bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretene Gesamtdehnung berücksichtigt wird. Dieser unter Umständen auftretende Mangel läßt sich durch Festsetzung der Gesamtdehnung auf 0,2% leicht beheben.

Gegen das Verfahren von Siebel und Ulrich läßt sich einwenden, daß bei einigen Metallen die Annäherung der Zeitdehnlagen an die Parabel nur sehr grob ist, so daß sich im logarithmischen Koordinatensystem Abweichungen von der Geraden ergeben können, weshalb die durch Extrapolation ermittelten Werte ungenau sein können.

Nach dem Stand der Untersuchungen hat das Verfahren der Ermittlung der Dauerstandfestigkeit die größte Aussicht auf allgemeine Einführung durch Aufstellung entsprechender Normen.

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 Baustoffen, 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 der Stoff der Auflage weich oder hart, rau oder glatt, trocken oder geschmiert ist.

Der Verlauf des Spannungs-Stauchungs-Schaubilds entspricht bei Metallen im allgemeinen dem Verlauf des Zerreißschaubilds. Man beobachtet auch hier Proportionalitäts- und Fließgrenze, die mit Quetschgrenze bezeichnet wird. Die höchste Druckbelastung läßt sich aber nur bei spröden Stoffen 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 Druckschaubilds der Verlängerung des ersten Teils des Zerreißschaubilds. Daraus ergibt sich, daß die Proportionalitätsgrenze im Zerreißschaubild mit der Proportionalitätsgrenze im Druckschaubild durch eine gerade Linie verbunden ist (vgl. Abb. 26). Bei darüber steigendem Druck verläuft das Schaubild ebenfalls so, daß die Formänderung verhältnismäßig stärker wächst als die Belastung.

Wie beim Zerreißversuch wird auch hier aus dem Belastungs-Verkürzungs-Schaubild durch Umrechnung das Spannungs-Stauchungs-Schaubild 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 Schaubilds 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. Dieser hat bei der Prüfung von Metallen den Vorzug der leichteren Herstellbarkeit.

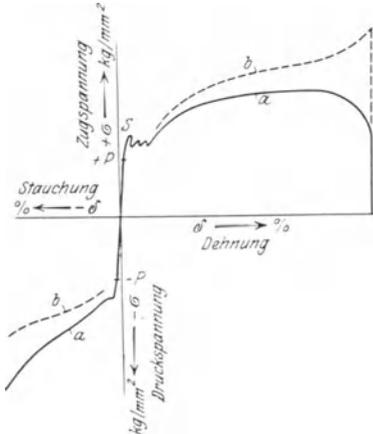


Abb. 26. Schaubilder beim Zug- und Druckversuche (a = praktisches Schaubild, b = reduziertes Schaubild).



Abb. 27. Druckprobe aus Schweißisen, makroskopisch geätzt.

Bei homogenen Werkstoffen wird das Ergebnis des Druckversuches durch die Kantenlänge des Würfels nicht beeinflusst. Damit aber Würfel und Zylinder vergleichbare Werte ergeben, müssen beim Zylinder Höhe und Durchmesser im Verhältnis $h : \sqrt{F} = 1$ (d. h. $h = 0,88d$) zueinander stehen. Wird die Höhe im Verhältnis zum Durchmesser größer, so wird der Verlauf des Schaubilds flacher, d. h. die Spannungen für dieselben Formänderungen werden kleiner. Bei sehr langen Proben ergeben sich sogar sehr ungenaue Werte, zumal dann die Gefahr des Ausknickens der Proben besteht.

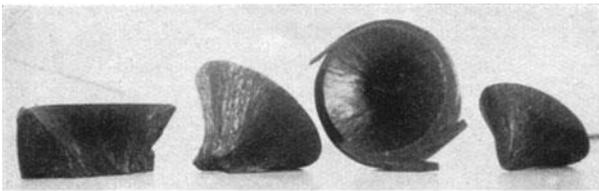


Abb. 28. Zerdrückte Messingproben.

Die Verformung bei der Druckbeanspruchung wird gut durch durchgeschnittene Probekörper aus bildsamem Stoff, wie Blei oder Wachs, die geschichtet und durch Färbung gekennzeichnet sind,

oder durch Ätzung einer Probe veranschaulicht. Abb 27 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 der um sie herumliegende Stoff 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 Stoffes 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 allseitig Anerkennung. Die Bildung von Kegeln bzw. Pyramiden ist auch hier gewöhnlich im Bruchaussehen erkennbar. So zeigt Abb. 28 Teile von zerdrückten Messingzylindern. Normalerweise äußert sich jedoch die Kegelbildung innerhalb des Stoffes lediglich durch einen schrägen Verlauf der Bruchfläche, der dadurch zu erklären ist, daß die beiden Kegel aneinander vorbeigleiten konnten (Abb. 29). Bei mittelharten und weichen Stoffen 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.

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

Abb. 29. Zerdrückte Gußeisenproben.

Der Biegeversuch.

Die Biegeprobe wird nur selten als wissenschaftlicher Versuch ausgeführt. 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 Biegeprobe werden die nach außen gebogenen Fasern auf Zug beansprucht und gelängt, die anderen werden gedrückt und gestaucht, wie dies aus der Verformung der Biegeprobe zu erkennen ist. Wenn der Probekörper für Zug und Druck die gleichen Abhängigkeiten zwischen Formänderung und Spannung besitzt, d. h. die Zug- und Druck-Schaubilder sich nach Drehung um 180° 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 Abb. 30 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.

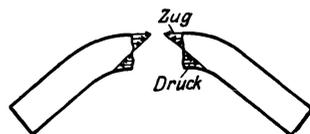


Abb. 30. Spannungsverteilung in einer Biegeprobe.

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.

Für die Gußeisenbiegeprobe sind Stäbe mit 30 mm Durchmesser und 650 mm Länge vorgeschrieben. Die Stäbe werden unmittelbar am Gußstück angegossen und mit Gußhaut untersucht. Es ist dies ein weiterer Vorteil gegen den Zugversuch, bei dem für genaue Untersuchungen 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 $\sigma_{bB} = 5,66 P \cdot 10^{-2}$ (kg/mm²). 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 Abb. 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.

Der 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 Wellenwerkstoffs. 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 Waage 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 Stoffteilen. Die Bruchspannung τ_{tB} in diesen Teilen wird aus dem Drehmoment beim Bruch M_d und dem Widerstandsmoment des Probestabes W_d berechnet.

$$\tau_{tB} = M_d : W_d.$$

Durch die Drehbeanspruchung bilden die Längsfasern eines Probestabes bei eintretender Formänderung 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.

Der Scher- und Lochversuch.

Beim Scherversuch soll der Widerstand eines Werkstoffes gegen Verschiebung zweier nebeneinanderliegender Querschnitte bestimmt werden. Die Beanspruchung beim Versuch kann einschnittig oder zweisechnittig sein, je nachdem, ob der Probekörper gleichzeitig in einem oder zwei Querschnitten beansprucht wird (vgl. Abb. 31

und 32). Beim zweischnittigen Scherversuch hat man den Vorteil, daß die beim einschnittigen unvermeidlichen Biegungsbeanspruchungen besser vermieden werden können. Zur Durchführung des zweischnittigen Versuches, 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, wird somit die Probe doppelseitig auf Abscheren beansprucht. Die Scherfestigkeit τ_{aB} ist die Last auf die Einheit der beiden Querschnitte *F* bezogen.

$$\tau_{aB} = P : 2F.$$

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

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 (Abb. 33). Die sich aus dem Versuch ergebende Scherfestigkeit ist aber keine Stoffzahl, sondern ist außer vom Werkstoff 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 τ_{aB} als Kraft bezogen auf den verschobenen Querschnitt. Sie ergibt sich aus der Formel

$$\tau_{aB} = P : \pi d s,$$

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

Die Härteprüfung.

Bei der Prüfung von Metallen versteht man unter Härte den Widerstand, den der Stoff 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 je nach der Form des eindringenden Körpers, der Art der Belastung und der Probenabmessungen erhält man verschiedene Ergebnisse, und es ist immer schwierig, die Werte der Untersuchungen auf eine Einheit zurückzuführen. Zunächst hatten sich von den verschiedenen Prüfungsverfahren die Kugeldruckhärte von Brinell als statisches Verfahren und die Rücksprunghärte von Shore im Prüfungswesen durchgesetzt. Dann gewannen die Verfahren von Rockwell und in letzter Zeit von Vickers immer mehr Einfluß.

Die Brinellhärte. 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.

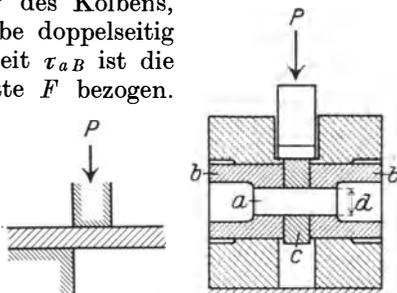


Abb. 31 u. 32. Einschnittiger und zweischnittiger Scherversuch.

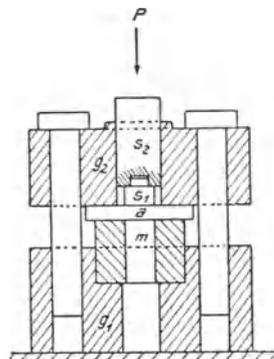


Abb. 33. Werkzeug für den Lochversuch.

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. Diese Bestimmung wird dadurch beeinträchtigt,

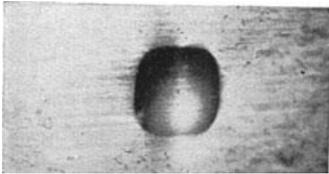


Abb. 34. Unrunder Kugeleindruck.

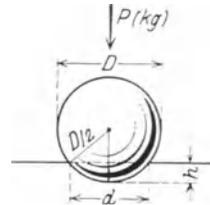


Abb. 35. Brinellprobe.

daß die Eindrücke bei kristallinem Aufbau des Probekörpers selten genau rund sind, sondern sich entsprechend der Kristallreckung verziehen, wie dies aus Abb. 34 zu ersehen ist. Um genaue Ergebnisse zu erhalten, ist man deshalb gezwungen, mindestens zwei Diagonalen des Eindrucks zu messen und für die Berechnung dann den Mittelwert zugrunde zu legen. Nach Abb. 35 ergeben sich die Oberfläche der Kalotte O_{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 Eindruckstiefe bleibt unberücksichtigt die Abplattung der Kalotte infolge der elastischen Formänderungen der Kugel und des zu untersuchenden Werkstoffes, wozu bei harten Probestoffen noch die bleibende Formänderung der Kugel hinzukommt.

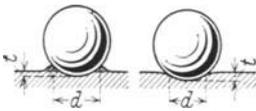


Abb. 36. Wulstbildung und Nachziehen bei Kugeldruckprobe.

Der bisher erwähnten Wulstbildung (Abb. 36) bei weichen Stoffen, wie Lagermetallen, steht das Hineinziehen des Stoffes um den Eindruck herum bei zähen, 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 Eindruckstiefe und der Bestimmung aus dem Eindrucksdurchmesser entnehmen kann, zeigt Tabelle 5.

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 s betragen, die Belastungsdauer etwa 30 s bei weichen Eisensorten, und etwa 10 s bei härteren Werkstoffen mit einer Härte über 140 kg/mm². Bei Lagermetallen genügen jedoch diese Belastungsdauern nicht, um einen Gleichgewichtszustand zu erzielen. Hierzu sind vielmehr etwa 3 min erforderlich. Ein weiterer Umstand, 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. Eine zu geringe Dicke des Probestückes ergibt zu hohe Härtewerte.

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

Ein Übelstand der Brinellschen Härteprüfung liegt darin, daß die Härtewerte 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, entsprechend der Formel $P_1 : P_2 = D_1^2 : D_2^2$, 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 werden. Nach den Normen wird eine Härte, die z. B. mit einer 5-mm-Kugel bei 1000 kg Belastung und 30 s 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 dadurch, 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/mm². Hieraus ergibt sich ohne weiteres, daß bei etwa 450 kg/mm² die größte einigermaßen mit Genauigkeit bestimmbare Härte liegt.

Der Grund dafür, daß die Härteprüfung trotz ihrer zahlreichen Mängel sich in der Praxis großer Beliebtheit erfreut, liegt in dem Vorteil dieses Prüfungsverfahrens vor dem Zug- und Druckversuch: das Werkstück braucht bei ihr nicht zerstört zu werden, so daß es selber untersucht werden kann, wenn auch nur an der Oberfläche. Ferner ist praktisch von großer Bedeutung, daß die Untersuchung gegenüber anderen Verfahren nur kurze Zeit erfordert. Wegen dieser Vorteile hat man sich auch sehr bemüht, einen Zusammenhang zwischen den Werten der Brinellhärte und der Festigkeit zu finden.

Nach eingehenden Untersuchungen steht heute fest, daß eine bestimmte Beziehung zwischen Kugeldruckhärte und Dehnung, Streckgrenze oder Zugfestigkeit nicht besteht. Für die Praxis genügt es aber in den meisten Fällen, wenn man mit der Härte die Festigkeit angenähert bestimmen kann. Für derartige Fälle

Tabelle 6. Brinellprobe.

Kugel-Durchmesser D mm	Belastung P kg			
	30 D^2	10 D^2	5 D^2	2,5 D^2
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,2	15,6

gilt nach den Normenvorschriften DIN-Blatt 1605 für Kohlenstoffstahl mit einer Zugfestigkeit zwischen 30 und 100 kg/mm²: $\sigma_{zB} = 0,36H$ und für Chromnickelstähle mit einer Zugfestigkeit von 65 bis 100 kg/mm²: $\sigma_{zB} = 0,34H$.

Von großem Wert ist die Härteprüfung infolge der einfachen Durchführung ohne Zerstörung des Werkstücks für die Auswahl gleichwertiger Stücke. 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 Härtebestimmung am leichtesten die Auswahl solcher Stücke. Dabei darf man jedoch nicht annehmen, daß zwischen Härte und Abnutzung oder Bearbeitbarkeit ein bestimmter, allgemeingültiger Zusammenhang bestehe. Diese Eigenschaften hängen von verschiedenen Umständen ab, die durch die Härteprüfung nicht alle erfaßt werden.

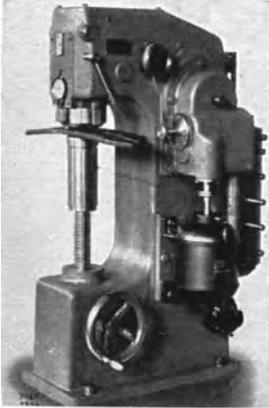


Abb. 37. Brinell-Schnellpresse (Mohr & Federhaff).

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.

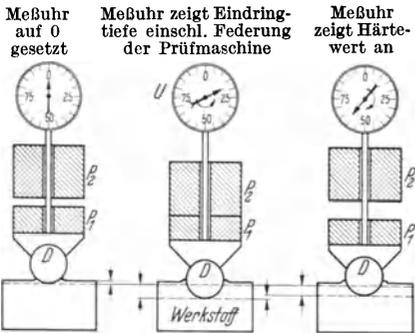
Abb. 37 zeigt eine Ausführungsform der Firma Mohr & Federhaff. Das Prüfstück wird mit Handrad und Spindel bis zum Aufsitzen der Kugel heraufgeschraubt.

Be- und Entlastung erfolgt dann durch Elektromotor. Die Gewichte werden den Laststufen entsprechend ausgewechselt. Die Belastung wird nach den Normen in 15 s aufgebracht und nach 30 s wieder entfernt. Dann wird der Eindruck ausgemessen und aus einer Tabelle der Härte-

wert abgelesen. Die Meßuhr gestattet ein genaues Verfolgen des Fließens und kann auch besonders bei laufenden Kontrollen gleichartigen Werkstoffs für mittelbare Ableseung des Härtevalues benutzt werden, wodurch ein bedeutend schnelleres Arbeiten als ohne Meßuhr möglich ist.

Reine Brinellpressen sind jetzt zum größten Teil durch vereinigte Brinell- und Rockwell-Härteprüfer verdrängt.

Die Rockwellhärte. Beim Rockwellverfahren können die harten Werkstoffe mit einer Diamantspitze, die weichen mit einer Stahlkugel geprüft werden. Die Härtevalues werden sofort an einer Meß-



Werkstoff ist gegen Prüfspitze angehoben und Vorlast zur Wirkung gebracht

Hauptlast aufgelegt
Abb. 38.

Hauptlast abgehoben, Vorlast ist geblieben.

uhr abgelesen, die Eindringtiefe beträgt bei gehärtetem Stahl 0,06...0,08 mm und bei weichen Werkstoffen bis 0,25 mm. Die Arbeitsweise erläutert Abb. 38.

Die Probe wird gegen die Prüfspitze gedrückt und so eine Vorlast aufgebracht. Diese Vorlast erzeugt einen geringen Eindruck, der kleine Unebenheiten u. dgl. beseitigt und einen Ausgangspunkt für die Tiefenmessung schafft. Die Meßuhr wird auf Null gestellt. Dann wird die Hauptlast unter Zwischenschaltung einer Ölbremse in bestimmter Zeit aufgebracht. Nach Beenden des Fließens, erkenntlich am Stillstand des Tiefenmessers, wird die Hauptlast abgenommen und bei

Wirkung der Vorlast die Meßuhr abgelesen. Da die Härte der Eindringtiefe entspricht, gibt die Skala der Meßuhr die Härtegrade an.

Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit werden die Proben durch besondere Spannvorrichtungen festgehalten. Man erreicht dadurch Ausschaltung von Meßungenauigkeiten, die durch kleine Staubeilchen und feinen Grat zwischen Unterlage und Probe entstehen können. Besonders wertvoll ist diese Einspannung für weitausladende Teile.

Zur Prüfung dünner Bleche und dünner Oberflächenschichten dient der Super-Rockwell, der mit entsprechend geringen Eindringtiefen arbeitet.

Die Gründe für die schnelle Verbreitung des Rockwellverfahrens sind die Mängel des Brinellverfahrens: die Beschränkung auf einen Meßbereich von höchstens 450 Einheiten, die Unmöglichkeit, dünne Teile und dünne Oberflächenschichten zu prüfen, und die zeitraubende Ermittlung des Härtewertes.

Die vereinigten Brinell-Rockwell-Härteprüfer arbeiten mit auswechselbaren Gewichten und sowohl Stahlkugeln wie auswechselbarer Diamantspitze. Durch Auswahl der entsprechenden Belastungen und Prüfeinsätze kann also sowohl nach Rockwell wie nach Brinell geprüft werden.

Die Vickershärte. Grundsätzlich wie die Brinellpresse, aber genauer, arbeitet der Vickershärteprüfer, dadurch, daß er eine sehr genau hergestellte Diamantpyramide verwendet (Abb. 40). Der Vickersprüfkörper ist aus Diamant hergestellt, da nur dieser härteste Stoff die hohe Belastung der Spitze aushält. Die Pyramidenform bewirkt es, daß verschiedenen Eindringtiefen ähnliche Eindrücke entsprechen. Das Brinellverfahren hat den Nachteil, daß die Härtewerte vom Kugeldurchmesser und der Belastungshöhe abhängig sind, da Kugeleindrücke verschiedener Größe und Tiefe nicht ähnlich sind. Um zuverlässige Werte bei verschiedenen Kugeldurchmessern zu erhalten, muß der größte Eindruckdurchmesser zwischen 0,25 und 0,5 Kugeldurchmesser liegen. Der Versuch, diesem Mangel abzuwehren durch Benutzung von Kegeln, die bei allen Eindruckstiefen ähnliche Eindrücke liefern, scheiterte an der Benutzung von Stahlprüfkörpern. Die Vickersdiamantpyramide hat einen Spitzenwinkel von 136° (Abb. 41). Dies entspricht dem Schnittwinkel zweier gegenüberliegender Tangenten an einem Kugelabschnitt mit dem Durchmesser $0,375D$ Kugeldurchmesser, dem Mittelwert von 0,25 und 0,5 Kugeldurchmesser.

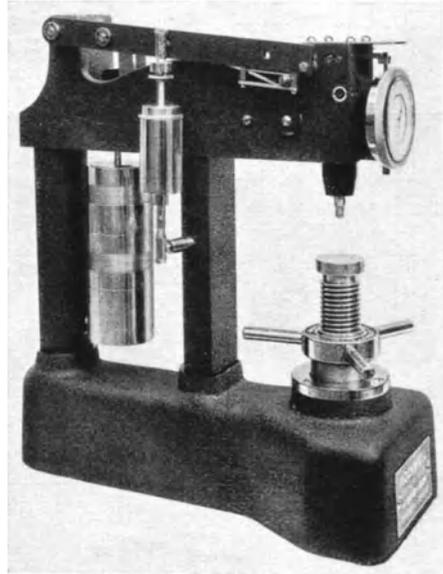


Abb. 39. Rockwell-Apparat.

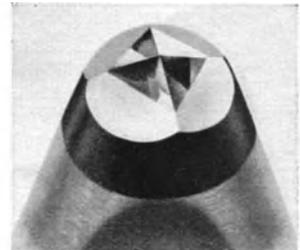


Abb. 40. Vickers-Diamantspitze.

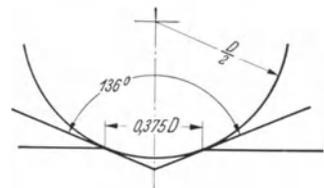


Abb. 41.

Hierdurch ergeben sich gute Übereinstimmungen mit dem Brinellverfahren bei beliebigen Belastungen von 5 kg an. Bei geringeren Belastungen kann der Anteil der elastischen Verformung das Ergebnis stark beeinträchtigen, d. h. die Eindrücke fallen infolge starken elastischen Zurückgehens der Verformung zu klein aus.

Versuchsdurchführung: Grundsätzlich ist das Verfahren das gleiche wie beim Brinellhärteprüfer. Es wird je nach den zulässigen Eindruckgrößen ein Eindruck erzeugt, der quadratische Form hat. Abb. 42, Eindruck im Blickfeld des Mikroskops. Die beiden Diagonalen werden gemessen, das Mittel aus beiden genommen und nach der Gleichung:

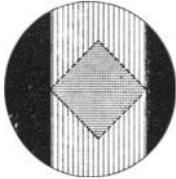


Abb. 42.
Vickers-Eindruck.

$$H = \frac{\text{Belastung}}{\text{Eindruckoberfläche}} = \frac{P}{F}$$

die Härte in kg/mm^2 bestimmt. $F = \frac{E^2}{2 \cos 22^\circ}$ ($E = \text{Diagonale}$).

Der Eindruck wird mit einem ausschwenkbaren Mikroskop mit 0,002 mm Genauigkeit ausgemessen.

Die Prüfung kann auch mit jeder Brinellpresse durchgeführt werden, die in den unteren Belastungsstufen genau arbeitet. Normal wird 30 kg Last gewählt, jedoch müssen auch Belastungen von 5 kg genau einstellbar sein, um dünne Bleche von 0,1...0,2 mm und Einsatz- und Nitrierschichten prüfen zu können. Neuerdings werden auch vereinigte Apparate für Brinell-, Rockwell- und Vickershärteprüfungen ausgeführt.

Das Vickersverfahren arbeitet sehr genau, aber die Spitze des Diamanten ist empfindlich gegen robuste Behandlung.

2. Die dynamischen Untersuchungen.

Wenn man der Ursache von Brüchen in der Praxis nachgeht, so beobachtet man oft, daß die Werkstücke unter der Wirkung von Stößen oder Belastungsschwankungen bei Beanspruchungen gebrochen sind, die sie bei ruhender Belastung ausgehalten haben.

Die Achse eines Wagens z. B. hält gewöhnlich, solange der Wagen noch steht, 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, sich langsam in weitem Maße biegen läßt, dagegen bei schlagartiger Beanspruchung bricht. 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 kg/mm^2 , also als bezogene Kraft, angegeben werden, sondern man muß die Arbeit bestimmen, die nötig gewesen ist, um den Bruch herbeizuführen, die in mkg/cm^2 oder in mkg/mm^2 angegeben wird. Diese Arbeit entspricht dem auf S. 10 angegebenen Arbeitsvermögen, das sich aus dem Flächeninhalt des Zerreißschaubilds 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, die Bestimmung der

statischen Festigkeitseigenschaften aber bedeutend einfacher und genauer ist, erreichte die statische Werkstoffprüfung zunächst einen großen Vorsprung vor den übrigen Prüfungsverfahren. Der Bau schnellaufender Maschinen mit möglichst kleinen Massen bei teilweise sehr hohen, stoßweisen Beanspruchungen und viele andere neue Entwicklungen forderten dringend bestimmte Unterlagen, die es ermöglichten, die Beanspruchungsgrenzen der verschiedenen Baustoffe bei dynamischen Beanspruchungsarten zu bestimmen.

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 auftreten, oder die Spannungsänderungen können rasch rhythmisch verlaufen. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die Spannungen lediglich ihre Größe wechseln oder ob sie Größe und Richtung wechseln. In letzteren beiden Fällen entstehen im Werkstück Schwingungszustände, die unter Umständen, besonders wenn die Massenteilchen des Werkstücks im selben Rhythmus mitschwingen, zu derartig hohen Beanspruchungen führen können, daß Brüche entstehen, obwohl die aufgebrachte Beanspruchung selber sehr gering ist.

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 durch Schlag feststellen. Sie entsprechen den statischen Verfahren mit sehr hoher Belastungsgeschwindigkeit und werden Schlagversuche genannt. Die bis zum Bruch aufgewandte Arbeit wird der Bewertung des Werkstoffes zugrunde gelegt. Auf der anderen Seite stehen die Verfahren, bei denen der Hauptwert auf das Verhalten des Werkstoffes bei wiederholten Spannungsänderungen gelegt wird, und für die Beurteilung die Zahl der Belastungswechsel bei bestimmten Spannungsänderungen zugrunde gelegt wird. Sie sind in der Prüfungstechnik heute allgemein als Dauerversuche bekannt.

Ausführung der Schlagversuche. Man verwendet entweder Fallwerke oder Pendelschlagwerke. 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). Fallwerke sind ungenau im Ergebnis wegen der in den Führungsbahnen auftretenden Reibung und der Energieaufnahme durch den Amboß. Bei Pendelschlagwerken lassen sich die Verluste ziemlich genau erfassen.

Für die Ausführung der Schlagwerke sind vom Verbands für die Materialprüfungen der Technik bestimmte Normen und Richtlinien zur Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren 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 gut zu schmieren. Zur Eichung der Fallwerke werden vom Staatlichen 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 Höchstarbeitsvermögen von 10, 75 und 250 mkg empfohlen. Es sind aber alle möglichen Zwischengrößen in Benutzung.

Die Konstruktion des kleinen Pendelhammers zeigt Abb. 43. Die größeren Schlagwerke wurden früher mit einem hohen Eisengestell ausgeführt, in letzter Zeit wird jedoch auch hierfür die Form nach Abb. 43 gewählt. Bei der kleinen Größe wird das Gewicht von Hand gehoben und durch eine Sperrklinke gehalten. Bei den beiden größeren Bauarten wird das Gewicht mit einer Handwinde hochgezogen. Zur Bestimmung der nicht zur Zerstörung der Probe verbrauchten Energie ist an den Pendelschlaghämmern eine Anzeigevorrichtung angebracht, durch die der Durchschlagswinkel nach der Zerstörung der Probe bestimmt wird. Die Größe der drei Pendelschlaghämmer ist folgende:



Abb. 43. Pendelschlagwerk (Schopper).

Für 250 mkg:	Bärgewicht 85 kg,	Fallhöhe 2,94 m,
„ 75 mkg:	„ 33 kg,	„ 2,28 m,
„ 10 mkg:	„ 8,2 kg,	„ 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 Schlägen 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 α_K bestimmt, die auf die Flächeneinheit des beanspruchten Querschnitts bezogen wird, entsprechend der Formel

$$\alpha_K = \frac{G(H - h)}{F}$$

worin F der Querschnitt in Quadratcentimetern ist.

Der Schlagzug- und Schlagdruck-Versuch.

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

Die Ergebnisse von Schlagzugversuchen sind noch nicht so zahlreich, daß man ein abschließendes Urteil über den Einfluß der stoßweisen Belastung bei Zug geben könnte. Im allgemeinen hat man wie schon beim Zerreißversuch bestätigt gefunden, daß die Formänderungsarbeit bis zum Bruch und die mittlere Spannung bei großer Geschwindigkeit höher liegen als bei geringerer.

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 oder Anrisse zeigt, den Bruchfaktor.

Bei der Durchführung ist zu beachten, daß bei mehreren Schlägen die zur Verformung verbrauchte Schlagarbeit größer ist als bei einem einzigen Schlag, ferner, daß die Verformung wie beim statischen Druckversuch von der Reibung an den Preßflächen abhängt, die die Verformung verringert.

Der Schlagbiegeversuch.

Gegenüber dem Schlagzug- und Schlagdruckversuch hat der Schlagbiegeversuch praktisch die größte Bedeutung gewonnen als

Kerbschlag-Biegeversuch. Dieser stellt eine Verschärfung der Schlagbiegeprüfung dar (Abb. 45).

Es ist eine bekannte Erscheinung, daß Baustoffe, die in unversehrtem Zustand sich so weit zusammenbiegen lassen, daß die Schenkel einer Probe aneinanderliegen, 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. 11 darauf hingewiesen, daß durch die Stoffanhäufung im Kopf des Probestabes der schwächere Teil des Stabes am Fließen gehindert wird.

Bildet man nun den Probestab nach Abb. 44 so aus, daß sein schwächster Teil sehr kurz ist, so werden die Stoffteilchen in diesem Stabteile, der die höchste Spannung erfährt, durch die angrenzenden Teile des Probestabes, deren Spannung noch weit unter der Fließgrenze liegt, an einer Verformung gehindert. Infolgedessen wird die Querschnittsverminderung des Stabes kleiner und die Zerreißfestigkeit in kg/mm^2 größer, und zwar wird die Differenz um so größer, je kleiner die Länge der Stabeinschnürung ist.

Kerbwirkung. Ein Werkstoff, der beim Zerreißversuch in Form des Normalstabes eine Festigkeit von 61 kg/mm^2 und 55% Querschnittsverminderung ergeben hatte, zeigte z. B. bei einer Einkerbung nach Abb. 44 eine Festigkeit von 93 kg/mm^2 bei nur 11% Querschnittsverminderung.

Die Wirkung eines Kerbes ist in weitem Maße von der Form des Kerbes abhängig. Je scharfkantiger ein Kerb ist, desto stärker wird der Stoff daran gehindert, sich zu verformen 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 jeder Kerb eine Gefahr. Kerbwirkungen treten nicht nur auf bei Bunden, Eindrehungen, Gewinden, sondern auch bei Querbohrungen und ferner bei Fehlerstellen im Werkstoff wie Anrissen, die durch falsche Warmbehandlung oder Verformung entstanden sind. Ferner können sie auftreten an Lunkern, Schlackeneinschlüssen und spröden Gefügebestandteilen. Je spitzer der Kerbgrund solcher Stellen ist, um so größer ist ihre Wirkung. Die Kerbzähigkeit kann unter Umständen bis auf $\frac{1}{10}$ ihres normalen Wertes sinken, ohne daß die statischen Festigkeitseigenschaften wesentlich ungünstig beeinflusst werden.

Besonders gefährlich ist die Wirkung von Kerben, wenn die Teile häufigen Stößen ausgesetzt sind. Führt z. B. eine einmalige Überschreitung der Bruchspannung im Kerbgrund auch nur zu einem Einreißen des Werkstoffes, so entsteht dadurch zunächst ein sehr scharfer Kerb, der beim nächsten Stoß eine viel schärfere Wirkung hat. Das allmähliche fortschreitende Einreißen schwächt den Querschnitt immer mehr, bis er schließlich bricht. Auf diese Erscheinung der sog. Dauerbrüche ist später noch näher eingegangen.

Der Kerbschlagversuch kennzeichnet also das Verhalten eines Werkstoffes bei schlagartiger Beanspruchung bis zum Bruch bei Vorhandensein von Kerbwirkungsursachen. Er gibt u. a. Aufschluß über Durchschmiedungs- und Warmbehandlungs-



Abb. 44.
Spannungsverteilung im Kerbquerschnitt.

fehler und ist besonders für Schmiedeteile eine unerläßliche Ergänzung der statischen Prüfung.

Kerbschlagprobe als Prüfverfahren. Der Einführung der Kerbschlagprobe als wissenschaftliches Prüfverfahren steht folgende Schwierigkeit entgegen: Das Ähnlichkeitsgesetz hat hier keine Gültigkeit, d. h. es gibt bisher keine gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Versuchsergebnissen an Proben mit verschiedenen Querschnittsabmessungen und Querschnittsformen. Um Vergleichswerte zu erhalten, muß die Prüfung daher an Proben gleicher Abmessungen vorgenommen werden. Dieses Ziel ist jetzt durch die in Kürze zu erwartende Herausgabe der DIN Vornorm DVM Prüfverfahren A 115 erreicht: Vorgesehen ist eine Probe mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 55$ (Abb. 45). Der Kerb kann durch Fräsen, Kerbformen a und c, oder Bohren und Sägen, Kerbform b, hergestellt werden. Unter normalen

Verhältnissen wird die Probe mit Rundkerb verwendet. Bei Werkstoffen, die sich jedoch bei dieser Kerbart ohne zu zerbrechen vollkommen zusammenbiegen, ist eine Zusatzprobe mit Scharfkerb vorgesehen, der die Kerbwirkung stark erhöht.

Für die Prüfung wird ein Pendelschlagwerk von 10 bis 30 kg benutzt mit einem Hammergewicht von 8 bzw. 20 kg und einer Schlaggeschwindigkeit zwischen 5 und 6 m/s. Nähere Angaben siehe A 115.

Außer dieser der Normung entgegengehenden Probenform gibt es noch zahlreiche andere Probeformen, von denen die

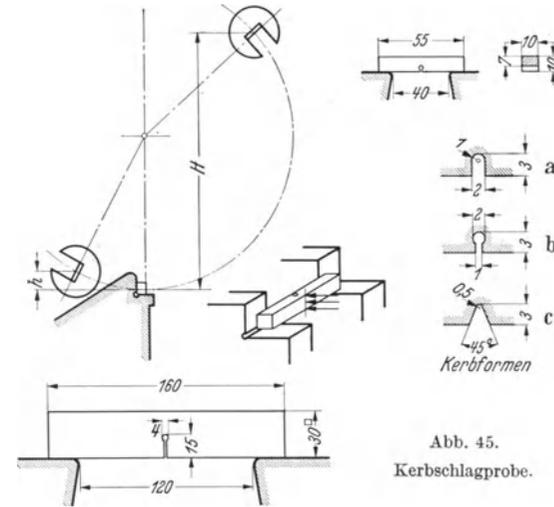


Abb. 45.
Kerbschlagprobe.

große Probe $30 \times 30 \times 160$ (Abb. 45) noch einige Bedeutung hat. Für diese Proben kommen Pendelhämmer von 75 und 250 kgm in Betracht. Da hier einheitliche Bestimmungen fehlen, müssen zu den Ergebnissen Probeform und Hammerabmessungen und -geschwindigkeiten angegeben werden.

In England wird die Izodprobe und in Frankreich neben dem Pendelhammer der Guillery-Apparat benutzt. Auf diese Verfahren kann hier nicht näher eingegangen werden.

Kerbzähigkeit. Als Maß für die Beurteilung der Werkstoffe nach der Kerbschlagprobe gilt die bezogene (spezifische) Schlagarbeit, d. h. die für 1 cm^2 des zerstörten Querschnittes verbrauchte Arbeit (DIN 1350). Die hiermit gekennzeichnete Eigenschaft bezeichnet man mit Kerbzähigkeit, die sich also aus der Formel:

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

ergibt, in der A die verbrauchte Arbeit, b die Breite und h die Höhe des Querschnittes bedeuten.

Bei dieser Auswertung wurde in keiner Weise der obenerwähnten 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 Annahme ergab 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.

Stähle, deren Zerreihschaubild nach Abb. 17 gleiche Bruchfestigkeit und Bruchdehnung zeigen, zeigen z. B. bei der einfachen Biegeprüfung alle ein gleiches Ergebnis: Alle drei Proben lassen sich bis zum Anliegen der Schenkel zusammenbiegen, ohne zu brechen. Die Kerbschlagprobe dagegen ergibt, daß der C-Stahl nur eine Kerbzähigkeit von 4 mkg/cm^2 , der Mn-Stahl eine solche von 12 mkg/cm^2 und der Chromnickelstahl sogar eine solche von mehr als 25 mkg/cm^2 hat, wobei der C-Stahl ohne Durchbiegung und der Mn-Stahl mit geringer Durchbiegung zerbrechen (vgl.

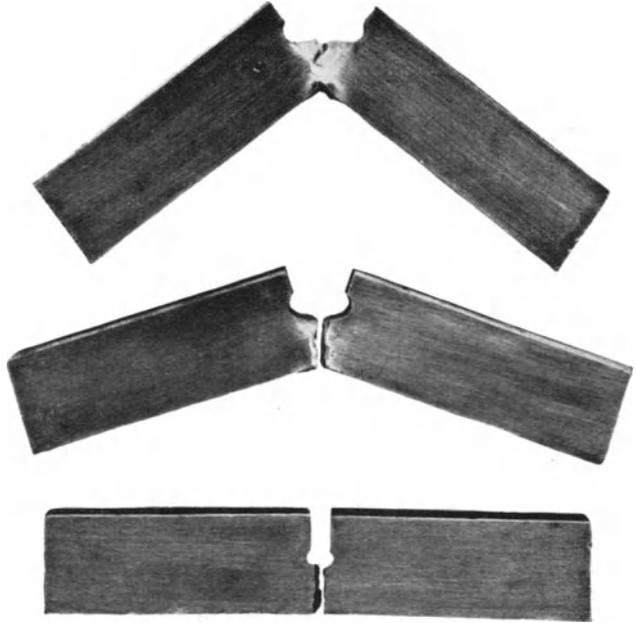


Abb. 46. Kerbschlagproben aus Kohlenstoff-, Mangan- und Chromnickelstahl.

Abb. 46), der Chromnickelstahl aber auch hierbei noch nicht völlig zerbricht. Es zeigt sich also auf jeden Fall die größere Widerstandsfähigkeit des hochlegierten Stahls gegen Stöße und Kerben, die aus den statischen Festigkeitseigenschaften nicht zu ersehen ist.

Einfluß der Temperatur. Bei der Kerbschlagprobe ist die Temperatur von besonderer Bedeutung. Sie soll, wenn hier keine andere Prüfungstemperatur verlangt wird, 20° betragen. Sie muß

aus folgendem Grunde im Versuchsbericht angegeben werden: Es treten bei der Prüfung in Abhängigkeit von der Temperatur und den Probestabquerschnitts-Abmessungen und -Formen zwei Brucharten allein oder auch zusammengesetzt auf: Der Trennungsbruch, der verhältnismäßig wenig Arbeit erfordert, weil keine Verformung auftritt, und der Verformungsbruch, dessen Arbeitsverbrauch infolge der dem Bruch vorausgehenden Verformung hoch ist. Bei gleichen Probenabmessungen kann sich nun in Abhängigkeit von

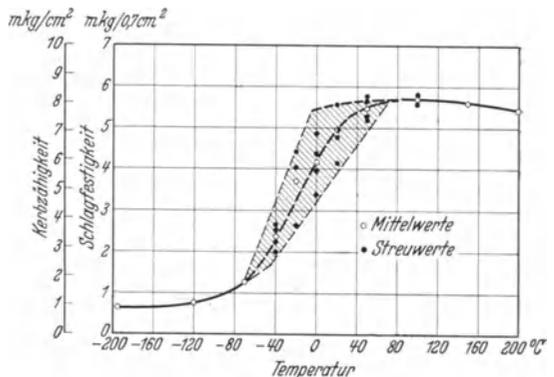


Abb. 47. Abhängigkeit der Kerbzähigkeit von der Temperatur (St 37, 11).

der Temperatur bei demselben Werkstoff einmal ein Trennungsbruch und schließlich reiner Verformungsbruch ausbilden. Es ergeben sich dann bei Stahl Kurven nach Abb. 47. Die Werte des Trennungsbruches entsprechen der Tieflage, die des Ver-

formungsbruches der Hochlage. Dazwischen liegt das Streugebiet. Es kann nun geschehen, daß bei 20° die Werte im Streugebiet liegen und sich daher stark unterscheiden können. Um diese Abweichungen beurteilen zu können, müssen Form und Aussehen der Bruchflächen im Bericht angegeben werden. Aluminium und Kupferlegierungen zeigen keine Hoch- und Tieflage.

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.

Es wird heute im allgemeinen als eindringender Körper wie bei der Brinellprobe die Kugel verwandt. Die Kugel wird entweder durch einen Schlag in das Probestück eingedrückt oder aus bestimmter Höhe herabfallen gelassen. Man stößt auf die Schwierigkeit, daß die Energie des Stoßes nicht voll zur Erzeugung des Eindruckes, sondern teilweise zur elastischen Verformung des Werkstoffes verbraucht 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.

Die Kugelschlaghämmer. 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 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. 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.

Abb. 48. Kugelschlaghammer. Bauart Graven.

Der wohl verbreitetste Kugelschlaghammer ist der in Abb. 48 schematisch dargestellte Apparat, Bauart Graven. Der Hammer wird mit der die Kugel tragenden Spitze eines Schlagbolzens auf das Prüfstück gedrückt. Dadurch wird die Feder gespannt. Bei der Endspannung wird eine Kupplung zwischen Federkolben und Schlagbolzen gelöst, so daß die Feder entspannt und die Kugel in das Prüfstück getrieben wird. 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 Stab geeicht werden. Die Feder D läßt sich durch Verstellen der Schlußmutter C leicht regeln.

Beim Vergleich der Kugeleindrücke bei der Prüfung auf der Brinellpresse mit denen bei der Untersuchung mit dem Kugelschlaghammer zeigt sich die in der Kurve Abb. 49 für einen Hammer dargestellte Abhängigkeit. Der Kugelschlaghammer liefert bei Werkstoffen größerer Festigkeit als die, 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 Abb. 49 entnommen werden, aus der man dann auch sofort angenähert die Zerreißfestigkeit des Stahles 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.

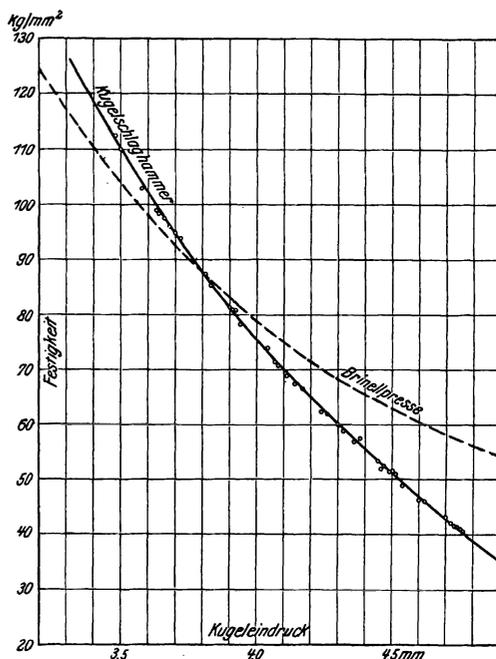


Abb. 49. Vergleich zwischen Kugelschlaghammer und Brinellpresse.

Eine andere Art der Schlaghärteprüfung ist die mit dem Kugelschlaghammer der Poldihütte nach Abb. 50. 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 unmittelbar 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.

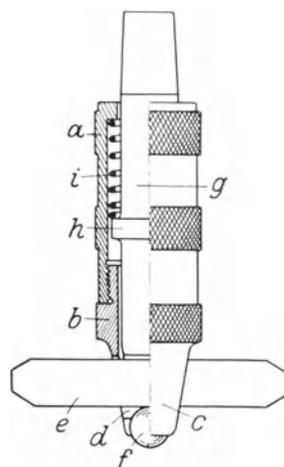


Abb. 50. Kugelschlaghammer der Poldihütte.

Fallhärteprüfer nach M. v. Schwarz. Es 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.

Skleroskop von Shore. Es bestimmt die Rücksprunghärte. Bei dieser Prüfung wird im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren nur der durch die elastische Ver-

formung aufgenommene Bruchteil der aufgewandten Arbeit bestimmt, der durch die Rücksprunghöhe erkennbar wird.

Abb. 51 zeigt das Skleroskop in der Bauart von Reindl & Nieberding. 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.

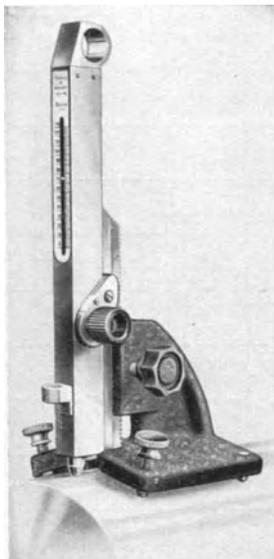


Abb. 51. Shoresches Skleroskop
(Reindl-Nieberding).

Die Rücksprunghärte ist lediglich abhängig von der Elastizität des Probebaustoffes und des Fallkörpers, wovon letztere allerdings immer gleich bleibt. Sie entspricht also in keiner Weise der auf S. 25 gegebenen Begriffserklärung der Härte und steht infolgedessen auch in keinem Verhältnis zu den Ergebnissen der übrigen Härteprüfungen. Die Messung der Rücksprunghöhe führt zu widersinnigen Ergebnissen, 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. In der Bestimmung der Rücksprunghöhe hat die Werkstatt ein sehr brauchbares Mittel, die Gleichmäßigkeit von Werkstoffen zu überprüfen, sowie insbesondere die Ergebnisse beim Härten, Vergüten usw. zu überwachen.

Pendelhärteprüfer von Herbert. Ein Prüfverfahren, das sich ebenfalls von den anderen dynamischen Härteprüfungen grundsätzlich unterscheidet.

Der in Abb. 52 dargestellte Apparat besteht aus einer nach unten gebogenen Schwinde 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 Schwinde 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.



Abb. 52. Pendelhärteprüfer von Herbert.

Mit diesem Apparat soll man zwei voneinander verschiedene Härtezahlen bestimmen können. Die sog. „Zeithärte“ bestimmt man dadurch, daß man die Schwinde 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. „Bearbeitungshärtezahl“ bestimmen. Hierauf soll hier nicht eingegangen werden.

3. Die dynamischen Daueruntersuchungen.

In Konstruktionsteilen treten die statischen und schlagartigen Beanspruchungen, denen der Werkstoff bei den vorher beschriebenen Prüfverfahren unterworfen wird, fast nie allein auf. Alle Konstruktionsteile sind vielmehr veränderlichen Beanspruchungen unterworfen, die wiederholte Spannungsänderungen zur Folge haben, sog. Dauerbeanspruchungen. Für die Auswahl von Werkstoffen und die Bemessung der Konstruktionsteile ist es daher von größter Bedeutung, über das Verhalten der verschiedenen Werkstoffe und Konstruktionsformen bei derartigen Dauerbeanspruchungen Aufklärung zu erhalten.

Bei den dynamischen Dauerversuchen wird der Werkstoff auf Zug-, Druck-, Biegungs- und Verdrehungsbeanspruchung geprüft. Die Spannungen können hierbei beliebig schwanken,

z. B. von Null bis zu einem Höchstwert wachsen und dann wieder auf Null fallen (Ursprungsfestigkeit Abb. 53, Kurve *a*); sie können von Null bis auf einen positiven Höchstwert steigen, um dann über Null auf einen negativen Tiefstwert zu fallen

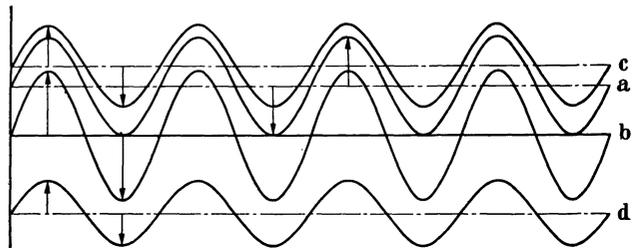


Abb. 53. Dauerbeanspruchungen.

(Abb. 53, Kurve *b*) und dann wieder auf Null zurückzukehren (Wechselfestigkeit), und drittens kann die Schwingung sich um eine Mittelspannung beliebiger Größe bewegen (Abb. 53, Kurve *c* u. *d*). Die dargestellten Schwingungen unterscheiden sich nur in der Höhe der Mittel- oder Vorspannung. Sie sind also immer Vereinigungen von Schwingungsbeanspruchungen mit statischen Vorspannungen, wobei diese positiv, negativ oder Null sein können.

Die beiden hervortretenden Fälle: Oberer Spannungswert gleich dem unteren bzw. unterer Spannungswert gleich Null, haben die besonderen Bezeichnungen: Wechselfestigkeit bzw. Ursprungsfestigkeit (auch Schwellfestigkeit) erhalten, da es die einfachsten und häufigsten Beanspruchungsarten sind.

Es können auch Vorspannungen einer bestimmten Art mit andersgearteten Schwingungsbeanspruchungen zusammen auftreten, z. B. Zugvorspannungen und Verdrehungs-Schwingungsbeanspruchung, oder auch verschiedene Schwingungsbeanspruchungen miteinander, doch können die letzteren versuchsmäßig schwer erfaßt werden.

Unter Dauerfestigkeit versteht man den Höchstspannungswert, den ein Werkstoff unendlich oft ertragen kann. Bei der Prüfung ist es nicht möglich und auch nicht nötig, den Werkstoff unendlich oft zu belasten, denn Versuche haben bewiesen, daß ein Werkstoff dauerfest ist, wenn er eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln ertragen hat, z. B. Stahl 10 Millionen.

Die Grundlagen der Dauerprüfung wurden von Wöhler geschaffen. Seine Prüfmaschinen hatten aber den Nachteil der zu niedrigen Drehzahl, so daß die Versuche zu lange Zeit brauchten. Erst der Bau von Maschinen mit hoher Drehzahl gab die Möglichkeit, den Forderungen der neuzeitlichen knappen

Konstruktion des Leichtbaues nachzukommen und jeden Werkstoff auf seine Dauerfestigkeit hin zu prüfen.

Die Versuchsmaschinen und ihre Arbeitsweise.

Pulsatormaschine. Wiederholte Beanspruchungen können an sich auch mit den normalen Zerreißmaschinen oder Universalprüfmaschinen ausgeführt werden. Für

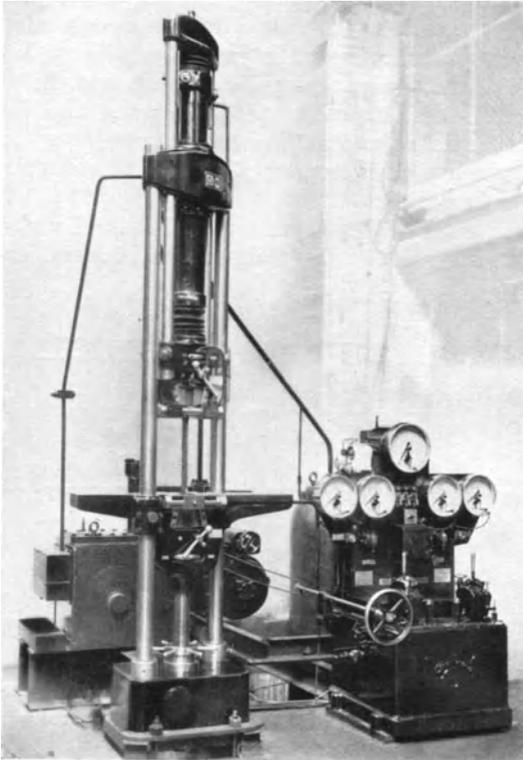


Abb. 54. Pulsatormaschine (Losenhausen).

gewöhnlich ist aber die Belastungsgeschwindigkeit zu gering, so daß die Versuche zu lange Zeit erfordern. Dieser Mangel läßt sich vermeiden, wenn man eine mit Drucköl betriebene Universalprüfmaschine mit einem sog. Pulsator zu einem Satz verbindet (Abb. 54). Der Pulsator fördert und entnimmt entsprechend der gewünschten Schwingungsamplitude dem Maschinenzylinder Öl. Er erzeugt also die Schwingungen, während die statische Last bzw. Mittellast durch eine besondere Pumpe erzeugt wird. Die höchstmögliche Lastwechselzahl geht bis 1000/min.

Es lassen sich bei Universalprüfmaschinen Schwellversuche auf Zug und auf Druck, dann auch Schwingungsversuche mit Zug-Druck-Beanspruchung ausführen. Mit Hilfe einer Zusatzeinrichtung lassen sich auch Biegeschwellversuche und Schwingungsversuche mit doppelseitiger Biegebeanspruchung vornehmen. Die Maschinen werden auch für hohe Belastungen

gebaut, so daß auch ganze Konstruktionsteile auf ihre dynamischen Eigenschaften geprüft werden können.

Zug-Druck-Dauerprüfmaschinen. Die Prüfmaschine arbeitet mit 500 Wechseln je Sekunde, also 1 800 000 je Stunde. Hierdurch wird die Versuchszeit stark herundergedrckt.

Die Arbeitsweise der Maschine ist aus Abb. 55 ersichtlich. Die Probe ist einmal im oberen Bügel befestigt, der infolge seiner großen Masse nicht mitschwingt. Die untere Einspannung ist mit einer Ankermasse verbunden, die durch Wicklung und das federnde Rohr in Schwingung versetzt wird. Das System schwingt nun entsprechend der aufgebrauchten Schwingungszahl des elektrischen Stromes. Der erforderliche 500periodige Wechselstrom wird von einem besonderen Umformer erzeugt.

Der Prüfstab besitzt einen Durchmesser von 5 mm und 50 mm Schaftlänge. Die Einspannköpfe sind wegen der erforderlichen genauen Einspannung kegelig gehalten.

Der Probestab wird durch das Magnetsystem gezogen. Gleichzeitig wird das Rohr elastisch zusammengedrückt. Beim Wechsel der Stromrichtung federt das

Rohr zurück und übt die Druckbeanspruchung auf die Probe aus. Mit einem elektrischen Schwingungsmesser wird die Dehnung des Stabes gemessen. Aus genauen statischen Untersuchungen können hieraus die Belastungen ermittelt werden. Außerdem können die Belastungen mit einem Dynamometer gemessen werden. Mit einer besonderen Vorrichtung können statische Vorspannungen zwischen 0 und 100 kg/mm^2 aufgebracht und so auch reine Dauerzug- und Dauerdruckbeanspruchungen erzeugt werden. Da der Stab sich während der Beanspruchung stark erwärmt, wird um ihn herum eine Ölkammer angebracht und die Wärme durch Umlaufkühlung abgeführt.

Außer dieser Hochfrequenzmaschine werden auch Zug-Druck-Maschinen mit normalen Drehzahlen (rd. 3000 U/min) gebaut.

Dauerbiege-Prüfmaschinen. a) Umlaufende Dauerbiegemaschine. Die in Deutschland meist benutzte Dauerbiegemaschine stellt Abb. 56 dar.

Der Probestab hat eine Länge von 234 mm, die Prüflänge beträgt 75 mm bei 7,52 mm Normaldurchmesser. Die zylindrischen Einspannköpfe haben 12 mm Durchmesser und 69 mm Länge. Der Übergang von Versuchslänge zum Einspannkopf wird durch eine Hohlkehle von 12,5 mm Abrundungsradius gebildet.

Für Weichmetalle, wie Reinaluminium, Kupfer, Messing u. dgl. beträgt der Prüfstabdurchmesser 9,5 mm. Die Stabköpfe sind in diesem Fall kegelig.

Der Probestab wird mit seinen Einspannköpfen in zwei Hülsen starr eingespannt, die in vier allseitig schwenkbaren Lagern laufen. Die beiden äußeren

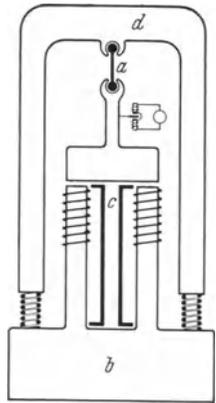


Abb. 55. Zug-Druck-Dauerprüfmaschine (Schenck).

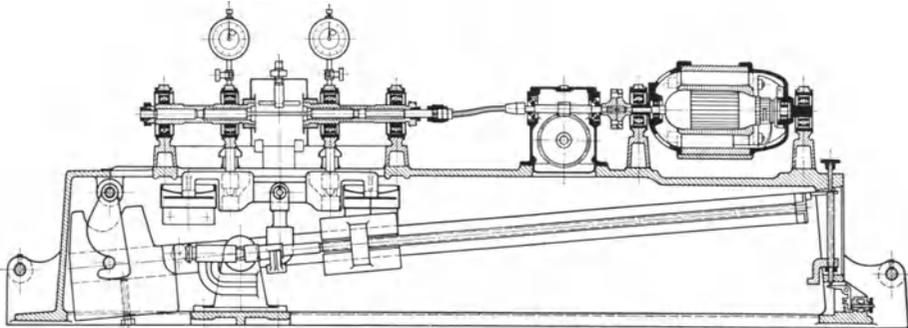


Abb. 56. Umlaufende Dauerbiegemaschine (Schenck).

Lager sind mit dem Maschinenrahmen fest verschraubt, während die beiden inneren über ein Hebelstystem mit dem Belastungsgewicht in Verbindung stehen. Auf jedes Lager kommt die halbe Last, so daß der Stab zwischen den Lagern mit gleichbleibendem Biegemoment beansprucht wird. Die Laststeigerung wird durch Verschieben des Gewichts nach rechts mit einem Handrade erreicht. Für einen bestimmten Stabdurchmesser kann die durch Verschieben des Gewichts aufgebrauchte Spannung an der äußersten Faser unmittelbar an einer Skala abgelesen werden.

Der Antrieb geht von einem Motor mit 3000 U/min über ein Zählwerk, eine biegsame Welle und Kupplung zu einer Hülse und setzt den Stab in schnelle Drehbewegung. Wird die Last aufgebracht, so biegt sich der Stab nach unten durch.

Bei einer Umdrehung wird dann jede Faser von 0 ansteigend auf größte Druckbeanspruchung und dann wieder abfallend bis 0, dann wieder ansteigend bis zur Höchstzugbeanspruchung, dann abfallend bis 0 belastet. Beim Eintritt des Bruches schaltet sich die Maschine selbsttätig aus.

Zur Kühlung des Stabes, falls nötig, ist eine besondere **Kammer mit einer Sprühvorrichtung angebracht**. **Es können hiermit** auch Korrosionsdauerversuche mit Wasser, Salzlösungen u. dgl. ausgeführt werden. Durch Zusatzeinrichtungen können die Stäbe bei hohen und tiefen Temperaturen geprüft werden.

Außer der Belastung, die eingestellt wird, werden die Durchbiegungen an den Mittellagern bestimmt. Die Erwärmung kann mit einem Thermoelement, das auf den Probestab aufgesetzt ist, über Schleifringe gemessen werden. Die Leistungsaufnahme des Motors bei verschiedener Belastung wird in der bekannten Weise durch Spannungs- und Stromstärke-Messungen ermittelt oder durch Messung des Drehmoments des Pendelmotors.

Ermittelt wird die Umlaufbiege-Wechselfestigkeit nach dem Wöhlerverfahren oder durch Kurzversuche. Biegevorspannungen können bei dieser Bauart nicht aufgebracht werden.

b) Planbiege-Dauerprüfmaschine. Abb. 57 zeigt das Grundsätzliche einer Flach- oder Planbiege-Dauerprüfmaschine, die in dieser Bauart in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt verwendet wird:

Der Probestab a ist mit den beiden Lenkern b_1 und b_2 fest verbunden. Der Lenker b_1 ist gelenkig mit der Meßfeder c verbunden, die fest auf der Grundplatte sitzt. Der Lenker b_2 ist an seinem Drehpunkt am Schwinghebel e und der Kurbelstange befestigt. Durch Bewegung des Kurbeltriebes wird ein über die ganze Länge des Probestabes nahezu gleich großes Biegemoment erzeugt, das von der verstellbaren Exzentrizität der Kurbel abhängig ist.

Die Durchbiegung kann bei stillstehender Maschine gemessen werden. Während des Betriebes wird die Höhe der Beanspruchung mit Hilfe der Meßfeder c ermittelt. In einem Spiegel spiegelt sich der Glühfaden, der mit einem Fernrohr beobachtet wird. Der Ausschlag des Spiegelbildes wird mit dem Okularmikrometer des Fernrohres bestimmt und aus einer Eichkurve der Meßfeder die Belastung festgestellt.

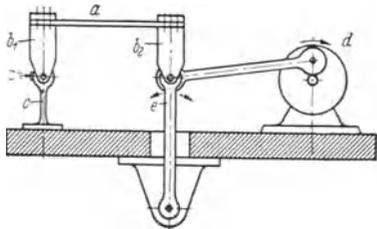


Abb. 57. Schema einer Planbiege-Dauerprüfmaschine (Bauart DVL).

Die Proben: Flachstäbe, Rohre, Profile, geschweißte Teile usw. haben, wenn möglich, verstärkte Einspannköpfe, um Kopfbrüche zu vermeiden.

Die Probestäbe können in dem Zustand geprüft werden, in dem sie im Betrieb beansprucht werden, brauchen also nicht sorgfältig

bearbeitet zu werden, sondern können mit Walzhaut aus Blechen, Profilen herausgeschnitten werden.

Es kann mit und ohne Vorspannung geprüft werden. Mit besonderer Einspannvorrichtung lassen sich auch Verdrehungsprüfungen ausführen.

Verdrehungsschwingungsmaschinen. Ein Beispiel dieser Maschinenart zeigt Abb. 58. Die Maschine besteht aus einem Motor, einer Kupplung, einem Triebwerk, durch das die umlaufende Bewegung des Motors in schwingende Verdrehungsbewegung verwandelt wird; hieran schließt sich die Probe mit Einspannungen und ein Dynamometer. Der feststehende Einspannkopf steht mit dem Handrad in Verbindung. Mit Hilfe des Handrads und einer Übertragung kann die Probe Vorspannung erhalten.

Abb. 59 zeigt einen Verdrehungsstab mit Einspannung. Durch besondere Einspannvorrichtungen lassen sich auch Flachbiegebeanspruchungen an Flachstäben (Abb. 60) und auch an geschweißten oder auf andere Art hergestellten Formteilen ausführen.

Maschinen für Sonderprüfungen. Außer den bisher erwähnten Dauerprüfmaschinen für die Hauptbeanspruchungsarten gibt es für Sonderzwecke eine ganze Reihe Maschinen, wie z. B. für die Dauerprüfung von Schraubenbolzen, Spiralfedern, Blattfedern, Federblechen, Seilen, Drähten u. a. m.

Dauerprüfmaschinen mit Schlagbeanspruchung. Das bekannteste Dauerschlagwerk für Biegebeanspruchung ist die Bauart Krupp. Es arbeitet mit

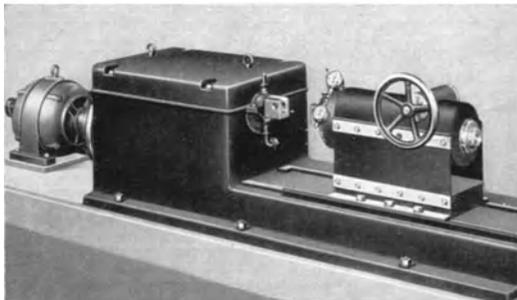


Abb. 58. Verdrehungs-Schwingungsmaschine (Schenck).

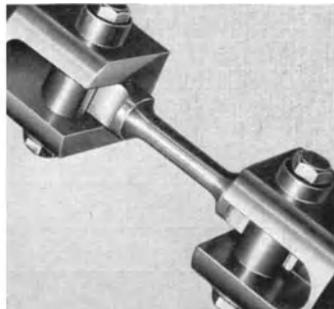


Abb. 59. Einspannung für Verdrehungsprobe.

einer geringen Anzahl Beanspruchungsmöglichkeiten. Die Versuche werden mit einer Belastung durchgeführt und die Zahl der ausgehaltenen Schläge aufgeschrieben. Der größeren Schlagzahl entspricht hierbei die größere Dauerfestigkeit. Es ist klar, daß dies nur ein rohes Vergleichsverfahren darstellt. Neuere Versuche führten zum Bau von Maschinen für veränderliche Schlagarbeit, so daß die Schlagarbeit festgestellt werden kann, die ein Werkstoff unbegrenzt lange aushält.

Die Probe wird an der Schlagstelle besonders bei weichen Werkstoffen stark örtlich verformt, so daß unzulässig hohe örtliche Kaltreckung auftritt.

Man half sich auf zwei Arten: Die runde Probe erhält eine umlaufende Nut derart, daß der beanspruchte Querschnitt nicht von der Hammerbahn getroffen wird. Die ermittelten Werte beziehen sich also auf gekerbte Proben. Der zweite Weg war die Anbringung einer Zwischenschicht, die den Stab vor Verletzungen schützt. Hierbei tritt aber schon starke Dämpfung auf. Nach dem jetzigen Stand der Forschung läßt sich sagen, daß die Versuchsergebnisse mit gleichbleibender Schlagenergie wertlos sind, da sie keinen Anhaltspunkt für die Dauerschlagfestigkeit bieten.

Die obenerwähnten neueren Versuche haben noch nicht so viel Ergebnisse liefern können, daß über ihre Anwendbarkeit ein Urteil gefällt werden kann. Letzten Endes ist ja auch jeder Schlag eine kurzzeitig verlaufende Schwingung und andererseits die Schwingung von 0,002 s Dauer der Zug-Druck-Maschine praktisch ein Schlag.

Es gibt Dauerschlagwerke für Zug-, Druck-, Verdrehungs- und Biegebeanspruchungen.

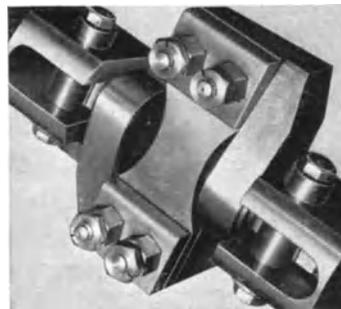


Abb. 60. Einspannung für Flachbiegeprobe.

Ergebnisse der Dauerprüfungen.

Wöhlerverfahren. Einwandfreie Werte der Dauerfestigkeit gibt nur das von Wöhler aufgestellte Verfahren: Ein erster Probestab wird mit einer Last beansprucht, die sicher den Bruch herbeiführt. Ein zweiter Probestab erhält eine geringere Beanspruchung und so fort, bis der letzte nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln nicht mehr bricht. Aus dem Verlauf der Kurve Abb. 61 durch die ersten Versuchspunkte kann man die Höhe der Dauerfestigkeit ungefähr abschätzen und die Belastung für die weiteren Versuche wählen. Es ist also ein Herantasten, das um so mehr Proben erfordert, je genauer man die Dauerfestigkeit ermitteln will.

Die Belastung muß schnell aufgebracht und alsdann während des Versuches gleichbleiben, da durch eine langsame Belastungssteigerung ein „Hochtrainieren“ des Werkstoffes entstehen kann, das die Dauerfestigkeit bis 60% steigern kann.

Die Einführung eines logarithmischen Achsenkreuzes (Abb. 62) hat folgende Vorteile: Der Schnittpunkt der beiden Geraden gibt einen genaueren Wert als der

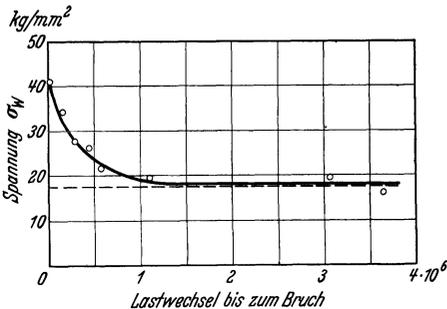


Abb. 61. Wöhlerkurve im metrischen Koordinatensystem.

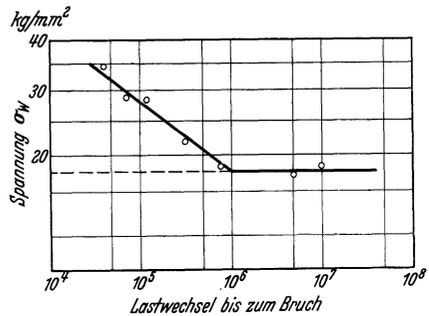


Abb. 62. Wöhlerkurve im logarithmischen Koordinatensystem.

allmähliche Übergang der Kurven in die Waagerechte beim gewöhnlichen Achsenkreuz. Die Lastwechselzahlen, die genügen, um einen Werkstoff als dauerfest zu kennzeichnen, sind bei umlaufender Biegewechselbeanspruchung folgende:

Bei Stahl $10 \cdot 10^6$ Wechsel.

Bei Kupfer und Legierungen liegt diese Zahl nicht fest, doch wird $50 \cdot 10^6$ in den meisten Fällen ausreichen.

Bei Leichtmetallen wahrscheinlich $200 \cdot 10^6$.

Die hohen Werte für Leichtmetalle erfordern viel Zeit, so daß man sich meist mit einer geringeren Lastwechselzahl zufrieden geben muß. So gibt Saran für Leichtmetalle $20 \cdot 10^6$ an, wobei ein Fehler von höchstens $\pm 5\%$ auftreten kann.

Bei Zug-Druck-Beanspruchung findet man Grenzzahlen von $10 \cdot 10^6$ für Stahl und $100 \cdot 10^6$ für Nichteisenmetalle angeben.

Kurzprüfverfahren. Die Aufstellung der Wöhlerkurve erfordert 4...6 Probestäbe und je nach der Umdrehungszahl der Prüfmaschine lange Prüfzeiten. Es wurde daher versucht, mit Kurzprüfverfahren die Versuchszeit zu verringern. Die Kurzprüfverfahren können für den erfahrenen Prüfer von Nutzen sein; sie können aber zuverlässig und genau die Dauerfestigkeit nicht feststellen.

Das gebräuchlichste Verfahren ist folgendes: Ein Probestab wird von 0 an stufenweise belastet, und jedesmal, wenn sich Verformung, Erwärmung und Leistungsaufnahme einer neuen Beanspruchung angepaßt haben, werden diese Werte abgelesen. Es ergeben sich dann die in Abb. 63 dargestellten Kurven. Der Dauerfestigkeit entspricht dann die Belastung D , bei der sich der Knick der Durch-

biegungskurve bzw. Dehnungskurve zeigt. Kennzeichnend sind auch die Fußpunkte B und B' der Tangenten an die Leistungs- und Temperaturkurven. Die drei Punkte fallen meist nicht zusammen, woraus hervorgeht, daß dieses Verfahren keine genauen Werte liefert, sondern nur Annäherungen.

Die Lage der Dauerfestigkeit in bezug auf diese Kurven ist stark vom Werkstoff abhängig. Nach Untersuchungen von Ludwig hat sich ergeben: Bei vergütetem Elektron, Duralumin und Skleron liegt die Schwingungsfestigkeit nahe Punkt B , während der Knick der Dehnungskurve erst bei höheren Belastungen eintritt; bei Elektrolytkupfer und Gelbtombak liegen D und B unter der Schwingungsfestigkeit, so daß diese nicht ermittelt werden kann. Bei St 37 und St 48 liegt die Schwingungsfestigkeit oberhalb B ; bei Si-Baustahl nahe B . Für weichen Cr-Ni-Stahl und Cr-Si-Stahl wurde die Schwingungsfestigkeit oberhalb B und B' gefunden.

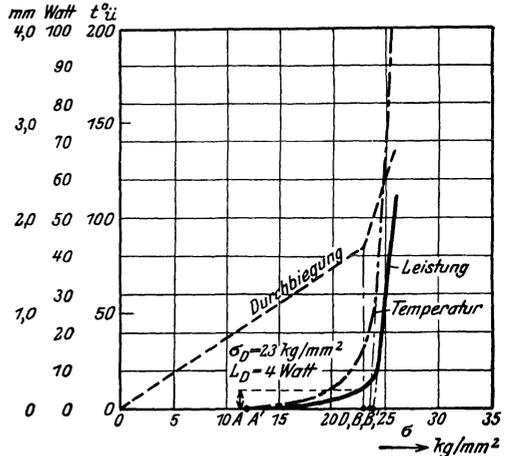


Abb. 63. Diagrammcharakteristik eines gehärteten SM-Stahls ($\sigma_{zB} = 55 \text{ kg/mm}^2$); Dauerbiegefestigkeit $\sigma_D = 23 \text{ kg/mm}^2$.

Einen anderen Nachteil hat die Kurzprüfung noch: Kerben geringen Grades haben auf das Versuchsergebnis keinen Einfluß, so daß wir hier die Schwingungsfestigkeit eines von äußeren und inneren Verletzungen freien Werkstoffes feststellen.

Der Kurzversuch kann also aus beiden Gründen eine genaue Dauerprüfung nicht ersetzen, kann aber durch ungefähre Ermittlung der Lage der Dauerfestigkeit die Anzahl der Einzelversuche verringern. Bei Kenntnis des Verhaltens einer Werkstoffart bei Kurz- und Dauerprüfung kann der Kurzversuch schon wertvolle Aufschlüsse geben.

Das Dauerbruchbild der Versuchsstäbe zeigt nicht immer die bekannten kennzeichnenden Merkmale der Dauerbrüche an Maschinenteilen nach Abb. 64: Dauerbruchzonen um die Anrißstellen mit feinem Korn, ohne jede Verformung, und Restbruchzone mit sprödem Bruch, auch bei bildsamem Werkstoff. Es zeigt sich bei den Proben meist keine scharfe Trennung in zwei derartige Zonen, meist sind diese beiden Zonen überhaupt nicht zu erkennen, nur das Bruchgefüge ist feinkörniger als beim statischen Bruch.



Abb. 64. Bruchfläche einer Automobilblachse.

Einflüsse der Versuchsbedingungen. Beschaffenheit und Form der Probestäbe sind von Einfluß auf das Ergebnis insofern, als die an glatten polierten Proben ermittelten Dauerfestigkeitswerte nicht den Werten entsprechen, die als Konstruktionsunterlagen für beliebige Werkstückformen und Oberflächenbeschaffenheiten in Betracht kommen. Die Einflüsse werden durch entsprechend hergestellte Proben festgestellt: Die Kerbempfindlichkeit wird ermittelt an Probestäben mit Kerben, deren Form und Herstellungsart genau angegeben sein müssen.

Den Einfluß der Oberflächenempfindlichkeit ergeben Proben mit Walzhaut, Gußhaut oder entsprechender Bearbeitung. Probestäbe mit Bundcn, Nuten, Querbohrungen lassen den Einfluß dieser Kerbwirkungen erkennen. Zur Ermittlung der Korrosionsempfindlichkeit werden die Proben während der Prüfung mit Wasser, Salzlösungen u. dgl. berieselt.

Der Einfluß der Probenabmessungen bei Dauerbiegeversuchen wurde dahin festgestellt, daß die Dauerfestigkeit mit der Zunahme des Probendurchmessers sinkt, was mit Spannungsverteilung bei der Biegebeanspruchung zusammenhängen kann. Bei der Dauer-Zug-Druck-Festigkeit ist ein Einfluß der Probenabmessungen noch nicht bekannt geworden und auch nicht zu erwarten.

Ein Einfluß der Lastwechselgeschwindigkeit hat sich bisher nicht ergeben. Die bisher für die Dauerprüfungen benutzten Maschinen entsprechen in ihrer Drehzahl den normalen Maschinendrehzahlen.

Gewinnung der Dauerfestigkeitsschaubilder. Als Konstruktionsunterlagen werden für die auftretenden Beanspruchungen Schaubilder nach Abb. 65 aufgestellt. Die Ordinate ist die Dauerfestigkeit σ_D , die Abszisse die Mittelspannung $\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$;

hierin ist σ_o die obere Grenzspannung, das ist der Höchstwert, und σ_u die untere Grenzspannung, der Tiefstwert der Schwingung. Bei gleichem Maßstab für Ordinate und Abszisse liegt die Mittellinie unter 45° ; sie stellt die Vorspannung dar, um die die Dauerbeanspruchung schwingt. Durch Versuche wird die Dauerfestigkeit bei verschiedenen Vorspannungen bestimmt und so ein Schaubild gezeichnet, aus dem für jeden Konstruktionsfall die theoretischen Höchstwerte entnommen werden können; Kerbeinflüsse u. dgl. müssen dann noch berücksichtigt werden. Als Grenze der Beanspruchung gilt die Dauerstandfließgrenze. Da dieser Wert meist nicht bekannt ist, wird er für Raumtemperatur durch die entsprechende statische Fließgrenze ersetzt.

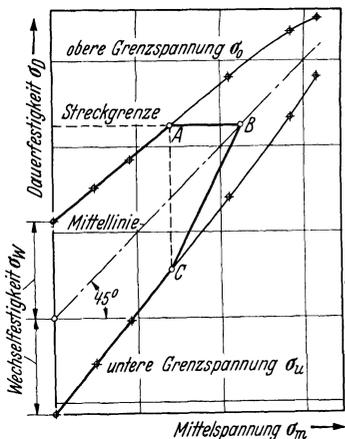


Abb. 65. Dauerfestigkeitsschaubild.

Das Schaubild wird am leichtesten so ermittelt:

1. Feststellung der Wechselfestigkeit (Vorspannung 0),
2. Feststellung der Schwingungsfestigkeit mit Vorspannung (z. B. Ursprungsfestigkeit $\sigma_u = 0$),
3. Feststellung der statischen Fließgrenze.

Die 4 Versuchspunkte aus 1 und 2 werden eingetragen und je die σ_o und σ_u -Werte durch gerade Linien verbunden. Dann wird die Fließgrenze eingetragen und Punkt B. Durch B wird eine Waagerechte gelegt, die die obere Grenzkurve in A schneidet. Punkt C liegt auf dem Schnittpunkt der unteren Grenzkurve und auf dem Lot von A (vgl. Abb. 65).

Für die einzelnen Beanspruchungsarten, also Zug-Druck, Biegung, Verdrehung, werden entsprechende Schaubilder für die Werkstoffe aufgestellt. Die statische Fließgrenze muß natürlich dieser Beanspruchungsart entnommen sein.

Dauerhaltbarkeit. Die Dauerfestigkeitsuntersuchungen an zugerichteten Proben ergeben Werte, die man den Berechnungen verschieden geformter Werkstücke nicht zugrunde legen kann. Zwar kann man mit Formziffern rechnerisch einige einfachere Formen beherrschen, aber in der Hauptsache dort, wo Teile durch Schweißen, Nieten, Verschrauben zusammengesetzt sind, ist rechnerisch wenig zu

4. Mechanische Prüfverfahren und Kennziffern.

Beanspruchung			Versuchsart	Versuchs-Ergebnisse			
Verlauf	Art			Kennwort	Kennzeichen	Bezugsgröße	
1	Einmalige Laststeigerung bis Bruch	a	Zug	Zugversuch	Zugfestigkeit Streckgrenze Dehnung	σ_{zB} σ_{zF} δ	kg/mm ² kg/mm ² %
		b	Druck	Druckversuch	Druckfestigkeit Quetschgrenze Stauchung	σ_{dB} σ_{dF} $-\delta$	kg/mm ² kg/mm ² %
		c	Biegung	Biegeversuch	Biegefestigkeit Biegegrenze Durchbiegung	σ_{bB} σ_{bF} f	kg/mm ² kg/mm ² mm
		d	Verdrehung	Verdrehungsversuch	Verdrehungsfestigkeit	τ_{tB}	kg/mm ²
		e	Scherung	Scherversuch	Scherfestigkeit	τ_{aB}	kg/mm ²
2	Wiederholte steigende Belastung	a	Zug	Elastizitäts-ermittlung	Elastizitätsgrenze	σ_E	kg/mm ²
		b	Druck		Elastizitätsmodul	E	kg/mm ²
		c	Biegung		Gleitmodul	G	—
		d	Verdrehung				
3	Dauerstand	a	Zug	Standzugversuch	Dauerstandfestigkeit Dauerstandfließgrenze	σ_{DSt} σ_{DF}	kg/mm ²
		b	Druck	Standdruckversuch			
		c	Biegung	Standbiegeversuch			
		d	Verdrehung	Standverdrehungsversuch			
4	Langsame Belastung		Eindrückung	Härteprüfung	Härte: Brinell Rockwell Vickers	H_B H_R H_V	kg/mm ² kg/mm ²
	Schlagartige Belastung		Eindrückung Rücksprung	Härteprüfung	Schlaghärte Rücksprungshöhe		
5	Einmalige stoßartige Belastung bis Bruch	a	Zugschlag	Schlagzugversuch	Stauchung spezifische Schlagarbeit Kerbzähigkeit	S a a_k	mm mkg/cm ² mkg/cm ²
		b	Stauchschlag	Schlagstauchversuch			
		c	Biegeschlag	Schlagbiegeversuch Kerbschlagbiegeversuch			
6	Wiederholte Belastung kurzzeitig wechselnd	a	Zug-, Druck-, Zug-Druck-Schwingung	Dauerschwingungsversuche	Dauerfestigkeit	σ_D	kg/mm ²
		b	Planbiegeschwingung		Ursprungsfestigkeit	σ_{D_0}	kg/mm ²
		c	Umlaufende Biegungsschwingung		Wechselfestigkeit	σ_W	kg/mm ²
		d	Drehschwingung		f. Zug-Druck f. Biegung f. Verdrehung	σ_{Wz} σ_{Wb} τ_W	kg/mm ² kg/mm ² kg/mm ²
7	Wiederholte stoßartige Belastung bis Bruch	a	Zugschlag	Dauerschlagversuche	Dauerschlagfestigkeit	A_D	kg/mm ²
		b	Stauchschlag				
		c	Biegeschlag				

erreichen. Diese Teile werden, so wie sie eingebaut werden sollen, hergestellt und in größeren Maschinen, meist Pulsatormaschinen, geprüft. Die so ermittelten Werte bezeichnet man mit Dauerhaltbarkeit.

Beziehungen zwischen statischen und Schwingungsfestigkeitswerten.

Die am wenigsten ungenauen Beziehungen bestehen zur Zugfestigkeit. Doch sind auch hier die Streuungen so stark, daß diese Werte nur als rohe Annäherungen gelten können. Es ist nach Lehr:

Die Dauerbiegewechselfestigkeit $\sigma_{Wb} = 0,47 \sigma_{zB}$.

Die Zug-Druck-Dauerwechselfestigkeit $\sigma_{Wz} = 0,35 \sigma_{zB}$.

Die Verdrehungswchselfestigkeit $\tau_W = 0,28 \sigma_{zB}$.

wobei die Streuungen $\pm 24\%$ betragen können.

Nach Versuchen von Lehr ergaben sich für polierte Proben folgende Beziehungen:

$$\tau_W = 0,59 \sigma_{Wb} \pm 14\% \quad \sigma_{Wz} = 0,70 \sigma_{Wb} \begin{matrix} + 11\% \\ - 7\% \end{matrix}.$$

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 festzustellen. Zur Beurteilung wurden dann die so festgestellten Eigenschaften auf Längen und Flächeneinheiten bezogen. Die Werte hatten infolgedessen, wie angegeben, auch mehr oder minder große Bedeutung für den Konstrukteur als Unterlagen für die Berechnung der erforderlichen Abmessungen 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 Kaltverformung, sind jedoch die Beanspruchungen des Werkstoffes derart verwickelt, 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.

Die Praxis braucht Verfahren, die zunächst einfach und schnell durchführbar sind und Aufschluß darüber geben, ob ein Werkstoff oder ein Werkstück den bei Verarbeitung oder Gebrauch auftretenden Beanspruchungen, welcher Art sie auch seien, genügt. Man verzichtet infolgedessen in diesen Fällen auf die zahlenmäßige Feststellung mechanisch genau bestimmter Eigenschaften und begnügt sich bei der Beurteilung mit der Beobachtung des Verhaltens der Stücke.

Diese Prüfverfahren sind unter dem Namen technologische Prüfungen zusammengefaßt. Auf Grund dieser Prüfungen hat man eine Gewähr dafür, daß der Werkstoff ohne unerwartete Betriebsstörungen den verlangten Beanspruchungen ausgesetzt werden kann.

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 ergibt 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.

Warmproben.

Die Warmproben werden angewandt bei der Untersuchung von Werkstoffen, die durch Warmrecken verformt werden sollen. Die Prüfverfahren bestehen in einer probeweisen Durchführung der wichtigsten Schmiedevorgänge. Von besonderer Bedeutung sind diese Proben für in Massen herzustellende Artikel, bei denen eine Schwierigkeit der Fertigung infolge mangelhaften Werkstoffes 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. Gebogen wird entweder so, daß die Schenkel des Probestückes bis zum Aufeinanderliegen zusammengeschlagen werden, oder daß die Probestücke um einen Dorn mit bestimmtem Durchmesser vorgebogen und später, gegebenenfalls 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 Werkstoffes 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 Werkstoffes für die Untersuchung gewählt werden. Ferner ist in diesem Falle festzulegen, ob von Hand oder unter der Maschine geprüft 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 und dann gebogen. Dies entspricht einer Versuchstemperatur von etwa 700°. Bei der Blaubruchprobe schreckt man das dunkelrot erwärmte Stück kurz ab und läßt es von innen nachwärmen. Läuft es dann gerade noch blau an, so hat es die richtige Versuchstemperatur von etwa 300°. Verschwindet die blaue Farbe wieder, ist die Probe zu hoch erwärmt worden. Erscheint die blaue Anlaßfarbe nicht, so ist die Temperatur noch zu niedrig.

Einige Richtlinien für die Durchführung der Warmbiegeprobe sind vom Normenausschuß der deutschen Industrie im DIN-Normenblatt 1605 herausgegeben.

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

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

(vgl. Abb. 66). Diese Probe kann für sämtliche Schmiedewerkstoffe verwandt werden, da die hierbei vorkommende Beanspruchung des Werkstoffes bei jedem Schmieden unumgänglich ist.

Rotbrüchigkeit macht den Werkstoff zum Schmieden unbrauchbar. Blaubrüchigkeit weist darauf hin, daß der Werkstoff bei tiefen Temperaturen nicht immer formgebend bearbeitet oder beansprucht werden darf.

Die Stauchprobe beansprucht Werkstoffe wie bei Gesenkschmiedearbeiten oder in den Schmiedemaschinen, z. B. beim Anstauchen eines Kopfes oder Bundes. Man prüft nach dieser Probe besonders Werkstoffe für Schraubenbolzen, Nieteisen 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

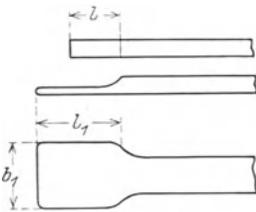


Abb. 66. Ausbreitprobe.

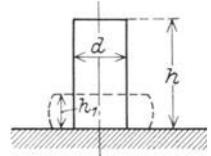


Abb. 67. Stauchprobe.

man, daß sich gutes Schmiedeeisen bis auf ein Drittel der Ausgangshöhe des Probekörpers zusammenstauchen läßt, ohne daß Risse auf dem Umfange des Probekörpers auftreten (vgl. Abb. 67). Als Vergleich wird die Stauchung in Hundertteilen der Ausgangslänge angegeben.

Die Aufornprobe führt den üblichen Vorgang des Lochens beim Schmieden durch. Aus einem Stück Flacheisen oder einem Blechstreifen wird in rotwarmem Zustand ein Loch, dessen Durchmesser etwa gleich der doppelten Probenstärke ist, ausgeschlagen. Im allgemeinen wählt man die Breite des Probestreifens gleich der fünffachen 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 Werkstoffes zwischen dem Lochrand und der Außenkante der Probe auf. Bei guten Schmiedewerkstoffen kann man aber verlangen, daß hierbei keine Risse am Rande des Loches eintreten.

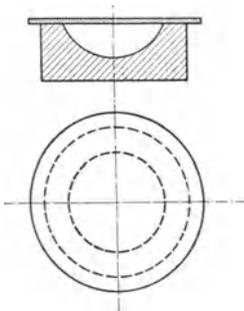


Abb. 68. Gesenk für die Polterprobe.

Die Polterprobe beansprucht den Werkstoff wie bei vielen Gesenkpreßarbeiten. Die Durchführung besteht darin, daß eine glühende runde Blechscheibe, deren Durchmesser man mit 500...700 mm wählt, in ein halbkugelförmiges Gesenk nach Abb. 68, 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

Dicke ab und muß in dem Liefervertrag festgelegt werden. Ebenso ist für die Prüfung das Verhältnis zwischen der Dicke des Werkstoffes und dem Radius der Wölbung des Gesenkes maßgebend

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 Probe-

stück, 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.

Die Schweißprobe. Für die Untersuchung von Schmiedewerkstoffen, die später geschweißt werden müssen, ist ferner die Schweißprobe zu erwähnen. Zu ihrer Durchführung werden zwei Probestäbe in der Hitze überlappt geschweißt und dann der Probestab in kaltem oder warmem Zustand auf Biegung oder Zug beansprucht. Bei gutem Schweißwerkstoff, ordnungsgemäße Schweißung vorausgesetzt, darf die Schweißnaht nicht aufreißen. Die Schweißstelle muß mindestens 80 % der Festigkeit des Ausgangswerkstoffes besitzen.

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 Abb. 69, 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.

Die Hin- und Herbiegeprobe: Ein Draht wird zwischen zwei Backen eingeklemmt und die Anzahl der Biegungen bis zum Bruch bestimmt. Als eine Biegung zählt hierbei ein Umbiegen um 90° 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 Abb. 70, deren Backen ausgewechselt werden können und in der der Draht unmittelbar mit dem Handhebel verbunden ist. Die Prüfung

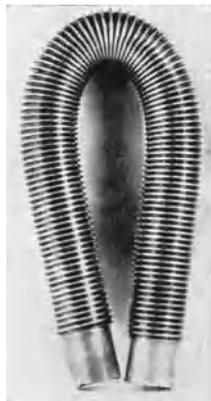


Abb. 69. Gewindebiegeprobe.

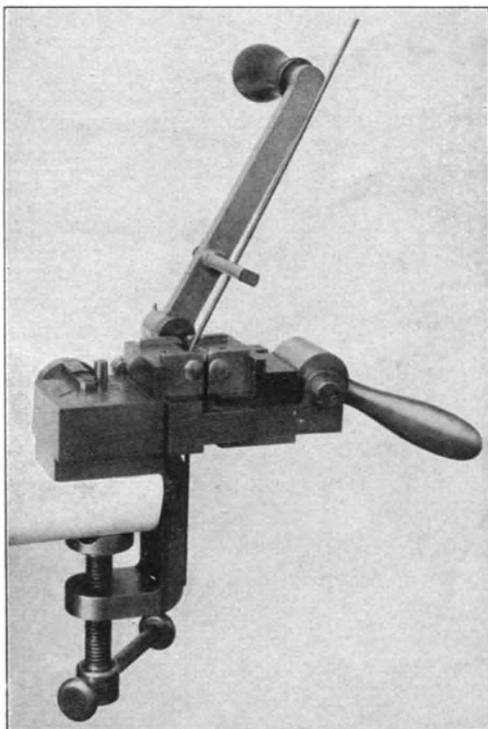


Abb. 70. Vorrichtung für die Hin- und Herbiegeprobe.

ist von besonderer Wichtigkeit, bei der Untersuchung von Werkstoff für Drahtseile, Kabel und ähnliche Zwecke. Von normalen Flußeisendrähten kann man ungefähr nebenstehende 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

Die Verwindeprobe: Ein Draht wird in einem Apparat nach Abb. 71 von einer freien Länge von ungefähr dem 75fachen des Durchmessers, mindestens aber gleich 15 cm, verwunden. Für die Beurteilung des Werkstoffes gilt die Anzahl der Drehungen

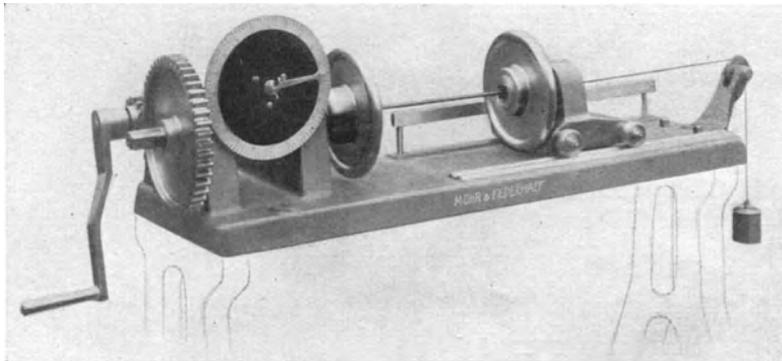


Abb. 71. Apparat für die Verwindeprobe.

bis zum Bruch, die von einer Zahlscheibe unmittelbar 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	

Die Wickelprobe kann auf demselben Apparat ausgeführt werden. Sie besteht darin, daß ein Draht um einen anderen gleichen Durchmessers spiralförmig auf- und abgewickelt wird. Für die Beurteilung ist die Anzahl der Wicklungen bis zum Bruch maßgebend.

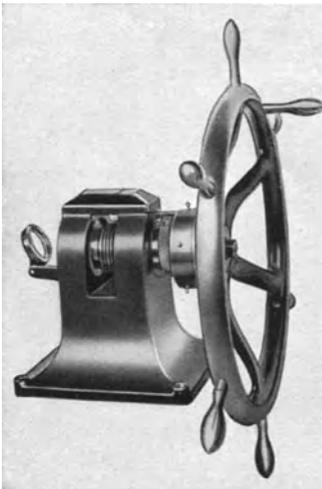


Abb. 72. Apparat für die Tiefungsprobe (A. M. Erichsen).

Die Tiefungsprobe hat die praktisch größte Bedeutung unter den technologischen Kaltproben erlangt. Beim Ziehen tiefer Hohlkörper wird dem Blech ein starkes Fließen aufgezwungen. Die Werte des Zerreiversuches geben hier schlechte Anhaltspunkte, denn bei dieser Beanspruchung wird eine Dehnung des Werkstoffes 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 in Annäherung an den Tief-

ziehvorgang darin, daß ein Blech in einer runden Matrize durch einen kugeligen Stempel ausgebeult wird (Abb. 72... 73). 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 am Handrad durch einen Ruck bemerkbar machen und im Spiegel zu beobachten sind. Als Maß für die Beurteilung der Werkstoffe gilt die Tiefe des erzeugten Nöpfchens, 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.

Die Bruchfläche. Ein bekanntes Mittel, einen angenäherten Aufschluß über die Zusammensetzung und Beschaffenheit des vorliegenden Werkstoffes zu erhalten, bildet die Betrachtung der Bruchfläche. Die Bruchfläche des Flußstahles 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 Härtetemperatur sowie der Tiefe der harten Oberflächenschicht beim Hartguß aus der Beschaffenheit der Bruchfläche.

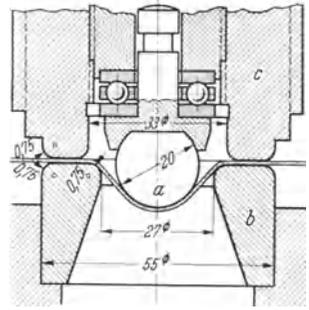


Abb. 73. Querschnitt durch Matrize und Stempel.

Funkenprobe.

Diese ist ein oft angewandtes und leicht durchführbares Werkstattverfahren zur angenäherten Bestimmung der Zusammensetzung von Stählen durch Beurteilung des Schleiffunkens.

Das Probestück wird von Hand gegen eine scharfe, körnige, mittelharte Schmirgelscheibe mit etwa 30 m/s Umfangsgeschwindigkeit gedrückt und aus der Form und der Farbe des Schleiffunkens (Abb. 74) auf den Gehalt an Kohlenstoff oder anderer Legierungszusätze geschlossen. Das Verfahren ist noch genauer, wenn gleichzeitig Vergleichsstücke bekannter Zusammensetzung angeschliffen werden. Hierbei muß gleicher Anpreßdruck und gleiche Schnittgeschwindigkeit vorhanden sein. Zusammenstellungen der charakteristischen Stahlsorten werden von den Stahlfirmen geliefert.

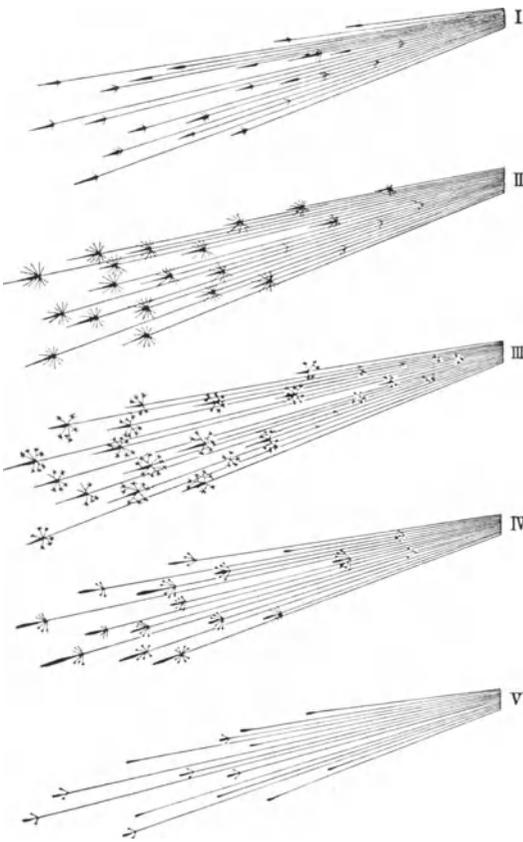
Bei einiger Übung lassen sich bis 20 verschiedene Stahlsorten unterscheiden.

Verschiedene Proben.

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 Lunkern 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



Nr.	Stahlart	Kennzeichen	Funkenfarbe
I	Kohlenstoffarmer Stahl (Schmiedeeisen)	In lange Tropfen auslaufende, glatte Lichtlinien; Stachelbüschel dem Kohlenstoffgehalt entsprechend	Hellgelb
II	Kohlenstoffreicher Stahl		
III	Kohlenstoffreicher Stahl mit höherem Mangagehalt	Mangagehalt; verästelte Stachelbüschel	Hellgelb
IV	Stahl mit einigen % Wolfram (legierter Werkzeugstahl)	Strahlenbüschel mit kugeligen Enden	Rötlich
V	Hoher Wolfram- oder Molybdängehalt (Schnellstahl)	Geringe Funkenbildung, kurze Tropfen mit einzelnen tropfenförmigen Abzweigungen	Rötlich

Abb. 74. Funkenbilder.

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. Untersuchung der Feinstruktur.

A. Metallographische Untersuchung.

Die Aufgabe der metallographischen Untersuchung ist die Bestimmung des Kristallgefüges der Metalle. Die Metallographie sagt nur mittelbar etwas über die Eigenschaften der Metalle insofern, als sie ihren Aufbau angibt und man aus der Art und Anordnung und den Eigenschaften der einzelnen Gefügebestandteile auf die Eigenschaften der Werkstoffe schließen kann.

Der innere Aufbau kann nicht entscheidend erkannt werden aus dem Bruchaussehen des Stoffes. Zwar ist dieses auch charakteristisch für den Stoff und sieht

einmal kristallinisch, ein andermal anscheinend amorph aus. Aber das Bruchaussehen ist abhängig von der Art der mechanischen Beanspruchung beim Bruch und kann unter Umständen ganz unabhängig vom inneren Aufbau lediglich für die Art der Bruchbeanspruchung charakteristisch sein. Das Kristallgefüge kann man aber durch eine Feinuntersuchung des Stoffes erkennen, indem man eine Fläche an der zu untersuchenden Stelle herstellt und sie zur Erzielung höchster Genauigkeit schleift und poliert und gegebenenfalls mit besonderen Mitteln behandelt, so daß die an der Schlieffläche zutage tretenden Gefügebestandteile deutlich erkennbar werden und sich charakteristisch voneinander unterscheiden.

Die Schlitte werden folgendermaßen hergestellt: Das Probestück wird von Hand oder maschinell auf grobem bis feinem Schmirgelpapier der Körnungen 3, 2, 1, 0, 00, 000, 0000 geschliffen und anschließend mit einer Mischung von Wasser und fein geschlämmter Tonerde auf einer Tuchscheibe poliert.

Ein solcher Schliff läßt bereits mit dem bloßen Auge oder unter Zuhilfenahme einer Lupe größere Einschlüsse, Lunken, Risse und grobe Gefügeausbildungen erkennen. Im Schliff eines Graugusses ist z. B. der Graphit bei grober Ausbildung schon mit der Lupe erkennbar. Untersuchungen bis etwa 15facher Vergrößerung nennt man makroskopische.

Eine mikroskopische Betrachtung mit Vergrößerung über das 15fache hinaus ergibt die Möglichkeit, fein verteilte Gefügebestandteile verschiedener Färbung sowie feinste Einschlüsse u. dgl. zu sehen. In den meisten Fällen lassen

sich aber die metallischen Gefügeteile noch nicht ohne weiteres erkennen, sondern die Schlieffläche muß mit besonderen Ätzmitteln behandelt werden, die einzelne Gefügebestandteile oder die Grenzen der einzelnen Kristallite angreifen.

Man unterscheidet die makroskopische Ätzung und die mikroskopische Ätzung. Das bekannteste Mittel für makroskopische Ätzung C-armen Stähle ist Kupferammoniumchlorid, das für die Feststellung von Phosphor- und Sulfurgehalt im Eisen ver-

Abb. 75. Kraftwirkungslinien durch Frysche Ätzung.

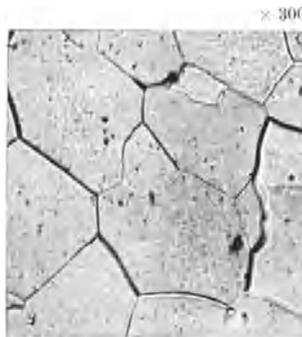


Abb. 76. Reines Eisen, Korngrenzen-ätzung.



Abb. 77. Reines Eisen, Kornflächen-ätzung.

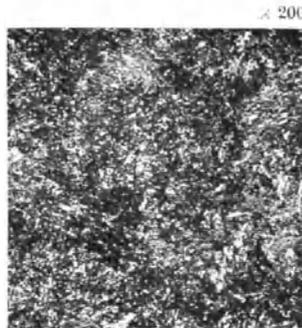


Abb. 78.

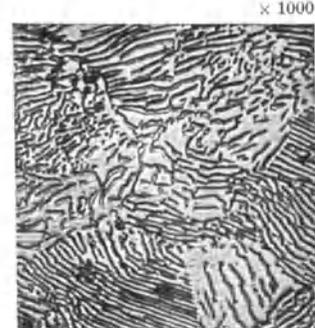


Abb. 79.

Abb. 78 und 79. C-Stahl mit 0,9% C gegläht.

wandt wird. Das Aussehen eines Schliffes nach einer solchen Ätzung zeigt Abb. 27, in der die Seigerungslinien in einem gestauchten Schweißisenzyylinder zu erkennen sind. Die Abbildung zeigt gleichzeitig, daß man durch die Ätzung einen guten Einblick in den Faserverlauf eines Werkstückes und somit gute Aufschlüsse über die

Verformungsvorgänge bekommt. Die Bestimmung der Phosphorseigerungen ist praktisch sehr wichtig, weil stark phosphorhaltiger Werkstoff sehr empfindlich ist gegen Stöße trotz guter statischer Festigkeitseigenschaften.

Besondere Erwähnung verdient in diesem Zusammenhang das Frysche Ätzmittel, durch dessen Wirkung im Schliff eines kaltgereckten Werkstoffes, der vor der Ätzung eine halbe Stunde bei 200° angelassen wurde, Kraftwirkungslinien erkennbar werden, wie in Abb. 75.

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 Schlichtfläche als schwarze Linien zu erkennen, im anderen werden die einzelnen Kristallite, deren Hauptorientierungssachsen zur Schlicht-

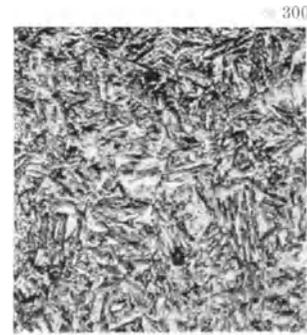


Abb. 82: gehärtet.



Abb. 83: angelassen.

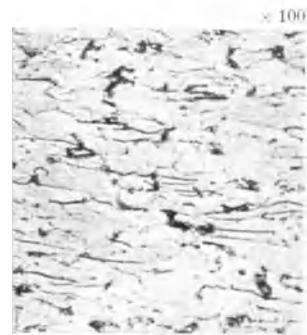


Abb. 82: gehärtet.

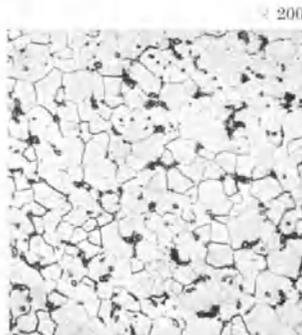


Abb. 83: angelassen.

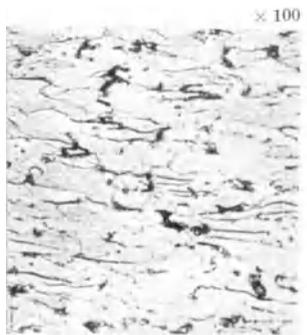


Abb. 84: kalt gereckt.

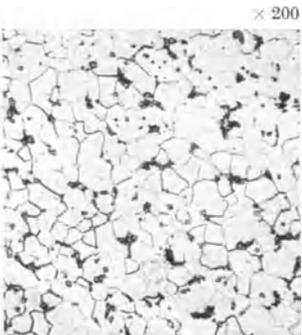


Abb. 85: rekristallisiert.

Abb. 80...85. Stahl.

fläche verschieden gerichtet sind, verschieden angegriffen, so daß sie im Mikroskop verschieden hell erscheinen. Abb. 76 und 77 zeigen z. B. das Gefüge von reinem Eisen nach den beiden Ätzverfahren. Verschiedene Gefügebestandteile unterscheiden sich im Schliff außer durch verschiedene Färbung dadurch, daß sie vom Ätzmittel verschieden stark angegriffen werden. Auf die Ätzmittel im einzelnen

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

Das **mikroskopische Gefügebild** zeigt somit das eigentliche Feingefüge des Metalles, und zwar bei schwacher Vergrößerung von 100, 200, 500 unregelmäßige Flächengruppen und Netzliniengebilde, bei starker Vergrößerung, von 1000 bis 1500, erscheinen in den Flächen regelmäßige Liniengruppen bestimmten Charakters und verschiedener Orientierung.

So einfache Bilder, wie sie die Kornflächen- und Korngrenzenätzung von reinem Eisen zeigt, treten nur bei homogenen Kristallen auf. Die meisten Metallegierungen haben heterogenes Gefüge, das aus einem feinverteilten Gemenge verschiedener Gefügebestandteile besteht. Diese Gefüge kann man bei mikroskopischer Betrachtung mit steigenden Vergrößerungen bis in die feinsten Ausbildungen erkennen. Man geht bei der Untersuchung von der geringsten schrittweise zu stärkeren Vergrößerung über. Dabei zeigt sich, daß die Gefügezusammensetzung außerordentlich verwickelt ist, wie die Abb. 78...79 erkennen lassen.

Die Gefügebildungen sind bei den Metallen abhängig von ihrer Entstehung aus der Schmelze, von einer mechanischen Behandlung durch Warm- und Kaltverformung und von der Warmbehandlung, wie Glühen, Härten, Anlassen, Vergüten, Rekristallisieren. Infolgedessen lassen die Gefügebilder außer der Art, Menge und Erscheinungsform der Bestandteile oft auch die Art der vorangegangenen Beanspruchung und Behandlung erkennen. Die Abb. 80, 81, 82, 83 zeigen gegossenen, geschmiedeten, gehärteten und angelassenen Stahl und die Abb. 84, 85 ein kaltgerecktes und ein durch Erwärmung rekristallisiertes Gefüge.

Durch die mechanischen Festigkeitsuntersuchungen an Werkstoffen mit bestimmten Gefügebildern lassen sich Beziehungen zwischen Festigkeitseigenschaften und Schliffbildern aufstellen, die dann bei großer Erfahrung eine gewisse Beurteilung der Festigkeitswerte und sonstiger Eigenschaften aus dem Schliffbild ermöglichen.

B. Röntgenuntersuchung.

Das **Raumgitter**. Für die wissenschaftliche Forschung ist die Feingefügeuntersuchung mit Röntgenstrahlen, die wegen der Anwendung der Beugung der

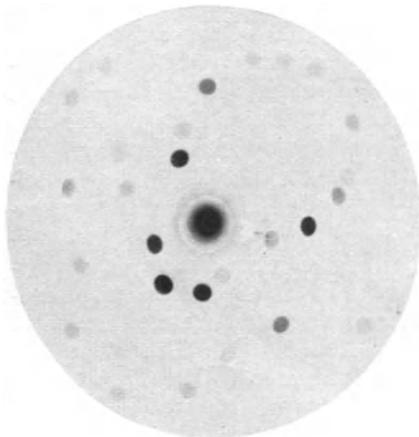


Abb. 86. Lauediagramm von Aluminium.

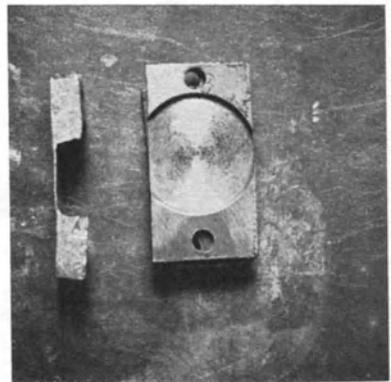


Abb. 87. Vorbereitete Probe.

Röntgenstrahlen an kristallinen Stoffen auch mit Interferenzverfahren bezeichnet wird, von größter Bedeutung. Durch die metallographische Unter-

suchung kann nur die Anordnung der Kristallite erkannt werden, sie gibt aber keinen Aufschluß über ihren inneren Aufbau, dessen Kenntnis zur Erklärung verschiedener Eigenschaften und besonders vieler chemischer Vorgänge notwendig ist. Mit der Röntgenuntersuchung ist es möglich, auch über den Aufbau der Atome innerhalb der Kristalle Aufschluß zu erhalten.

Es hat sich gezeigt, daß die Atome der Metalle in einem Kristall in Form eines bestimmten räumlichen Gitters angeordnet sind. Zur Darstellung dieser Raum-

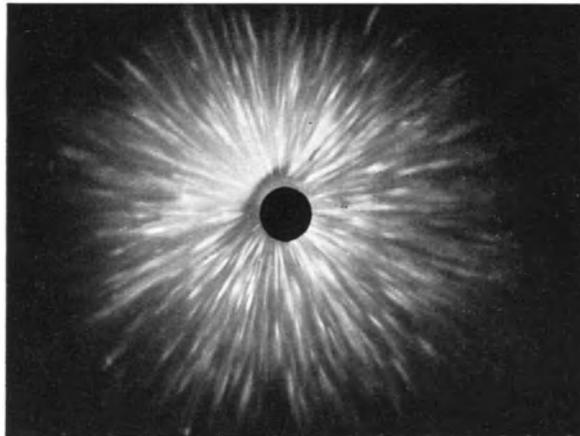
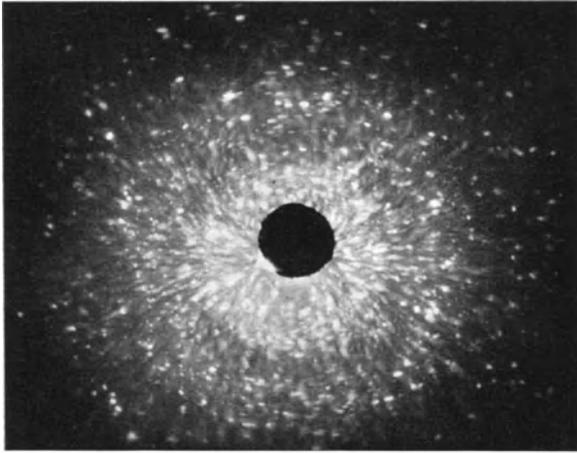


Abb. 88 und 89. Lauediagramm von Aluminium im Anlieferungszustand und mit Schweißspannungen.

gitterform wird für die einzelnen Stoffe die Form des Elementarkörpers angegeben, d. h. des kleinsten möglichen Ausschnittes aus dem durch paralleles Aneinandersetzen das Raumgitter aufgebaut werden kann. Die einfachste Form des Elementarkörpers zeigt das kubische Gitter, bei dem die Atome die acht Ecken eines Würfels bilden. Beim kubisch-raumzentrierten Gitter befindet sich noch ein Atom im Schnittpunkt der Raumdiagonalen, z. B. Anordnung des α -Eisens. Im kubisch-flächenzentrierten Gitter ist außer den acht Eckatomen noch je ein Atom in den sechs Schnittpunkten der Flächendiagonalen vorhanden. Neben diesen einfachen Elementarkörpern gibt es noch verschiedene andere.

Das Laue-Verfahren. Das zuerst von M. v. Laue zusammen mit Knipping und W. Friedrich in München angewandte Verfahren benutzt das Gitter eines einzelnen Kristalles als Beugungsgitter für die Röntgenstrahlen. Hierbei wird das poly-

chromatische Strahlenbündel durch die Beugung in ein Spektrum monochromatischer Strahlen zerlegt, die auf einem Film aufgefangen werden und dort das Laue-Schaubild ergeben. Ein Beispiel zeigt Abb. 86. Die Entstehung des Schaubildes kann so erklärt werden, daß einzelne Strahlen beim Durchgang durch den Kristall infolge Beugung eine Richtungsänderung erhalten haben, wie bei der Beugung eines Lichtstrahles an einem Spalt die Strahlen verschiedener Wellenlängen unter verschiedenen Winkeln abgelenkt werden. Mit Hilfe eines Rechenverfahrens läßt sich aus den Laue-Aufnahmen das Gitter bzw. die Lage des Kristalles der Versuchsprobe bestimmen.

Das Verfahren kann auch zur Ermittlung von inneren Spannungen verwendet werden. Diese rufen eine Verzerrung des Gitters hervor, durch die die Interferenzflächen in radialer Richtung auseinandergezogen werden. Diese Erscheinung wird mit „Asterismus“ bezeichnet und vor allem zur Untersuchung von Gußstücken auf Gußspannungen verwendet. Die Probe muß für diese Untersuchung besonders vorsichtig entnommen werden, damit keine Änderungen in den Kristallen auftreten. Die Probe in Abb. 87 hat sich sehr gut bewährt; sie wird aus dem Prüfkörper herausgesägt und dann wird mit geringer Schnittgeschwindigkeit die Vertiefung herausgedreht, so daß die Wanddicke etwa 0,1 mm beträgt. Aus den Abb. 88... 89 ist die Wirkung von Schweißspannungen auf Laue-Schaubildern solcher Proben von Aluminium zu erkennen.

Das Debye-Scherrer-Verfahren. Im Gegensatz zu Laue verwenden Debye und Scherrer bei ihrem Verfahren nicht einen einzigen Kristall, sondern ein mit Kristallpulver gefülltes Röhrchen, das sie mit monochromatischen Röntgenstrahlen durchleuchten. Diese Strahlen können deshalb nur unter ganz bestimmten Winkeln gebeugt werden, so daß sich

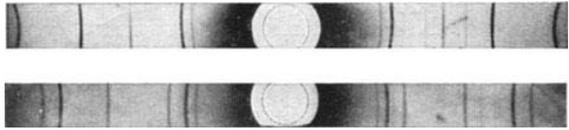


Abb. 90. Debye-Scherrer-Aufnahmen von α -Eisen und von γ -Eisen.

um den Einfallstrahl bestimmte Strahlenkegel bilden, die auf einem Film als Kreise erscheinen. Im allgemeinen werden nur schmale Filme verwendet, die Kreissektoren aufnehmen (s. Abb. 90).

III. Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung.

A. Durchstrahlungsverfahren.

Die Röntgendurchstrahlung. Zur Durchleuchtung wird die Eigenschaft der Röntgen- bzw. Gammastrahlen, alle Werkstoffe zu durchdringen, angewendet. Je nach dem Widerstand auf ihrem Wege durch das Prüfstück schwärzen diese einen hinter der Probe angeordneten Film mehr oder weniger oder erzeugen auf einem Leuchtschirm das Schattenbild. Unregelmäßigkeiten, wie Lunken, Gasblasen und Risse, machen sich infolge ihrer geringeren Dichte durch stärkere Schwärzung des Filmes bzw. helle Streifen oder Zusammenballungen im Positiv bemerkbar. Schlacken wirken verschieden, je nachdem ob sie dichter sind als der Grundwerkstoff oder nicht. Risse, die rechtwinklig zur Strahlenrichtung verlaufen, sind wegen ihrer geringen Stärke kaum erkenntlich (Abb. 91).

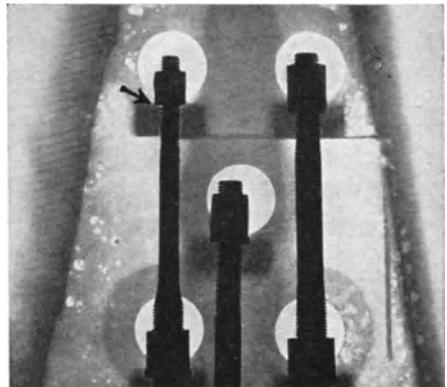


Abb. 91. Luftschaube mit Stahlzuganker. Positivbild nach Eggert Schiebold.

Der Leuchtschirm kann nur bei Stoffen mit geringer spezifischer Dichte, wie Leichtmetallen, Preßstoffen u. dgl.,

oder bei geringen Dicken angewendet werden. Die Erkennbarkeit der Fehler ist kleiner als beim photographischen Film. Er kann aber bei den obengenannten Stoffen zur laufenden Kontrolle verwendet werden und hat den Vorzug der Einfachheit und Billigkeit.

Die Grenze der Durchdringungsfähigkeit ist abhängig von der Röhrenspannung, und zwar liegt sie für 200 kV bei 50 mm für Kupfer, 80 mm für Stahl und etwa 400 mm für Leichtmetalle und keramische Stoffe. Durch Erhöhung der Röhrenspannung, also durch Erzeugung härterer Strahlen, lassen sich auch noch größere Dicken in annehmbaren Zeiten durchleuchten. Es sind aber nur noch größere Fehlstellen feststellbar, weil die Streustrahlungen zunehmen. Bei Anwendung von Streustrahlenblenden läßt sich ihr Einfluß etwas beseitigen, jedoch werden dadurch wieder die Belichtungszeiten verlängert.

Zur Erzeugung eines scharfen Bildes ist ein möglichst großer Abstand des möglichst punktförmigen Brennflekes erforderlich. Da die Intensität der Strahlen aber mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, muß zur Erzielung hinreichender Belichtungszeiten und Genauigkeiten eine mittlere Entfernung von etwa 35...75 cm genommen werden. Bei Anwendung von Verstärkerfolien, die man auf beiden Seiten des doppelschichtigen Filmes anbringt, wird die Belichtungszeit erheblich verringert, die Fehlererkennbarkeit nimmt jedoch wieder ab, so daß die Vorteile der scharfzeichnenden Brennflecke bzw. großen Brennfleckabstände wieder verlorengehen.

Zur genauen Festlegung der noch deutlich erkennbaren Fehler werden nach DIN 1914 „Richtlinien für die Prüfung von Schweißverbindungen mit Röntgen- und Gammastrahlen“ entsprechend der Werkstoffdicke Drähte mit verschiedenem Durchmesser auf das Probestück gelegt.

Die 200-kV-Anlagen sind so leicht gebaut, daß ein Satz von zwei Mann getragen werden kann. Die höchste Röhrenleistung beträgt zur Zeit 500 kV.

Die Durchleuchtung mit Gammastrahlen. Die radioaktiven Elemente Radium, Radiumemanation, Mesothor und andere senden die sog. Gammastrahlen aus, die noch kurzweiliger als die Röntgenstrahlen sind und damit auch durchdringungsfähiger. Bei dünnen Querschnitten ist jedoch der Einfluß der Streustrahlung größer als bei Röntgenstrahlen, wodurch die Fehlererkennbarkeit herabgesetzt wird, mit zunehmender Werkstoffdicke findet aber eine Angleichung statt. Die Strahlungsintensität ist abhängig von der Menge des radioaktiven Stoffes, die wegen ihres hohen Preises beschränkt ist, so daß die Belichtungszeiten viel länger sind als die für Röntgenuntersuchungen. Diese Präparate haben den Vorzug, daß sie an keine größere Apparatur gebunden sind und überall angebracht werden können. Ferner gestatten sie vor allem die Durchstrahlung größerer Werkstoffquerschnitte, z. B. Stahlguß mit 200 mm Wanddicke. Die Streustrahlungen können ebenfalls durch Schwermetallfilter abgehalten werden, so daß ihre bildverschleiende Wirkung, die die Fehlererkennbarkeit herabsetzt, zum größten Teil aufgehoben wird.

Das densographische Verfahren. Durch die schon erwähnte Benutzung von Drähten zur Bestimmung der Fehlererkennbarkeit ist ein Mittel gegeben, durch das die Ausdehnung der erkennbaren Fehler ungefähr bekannt ist; es ist aber nicht zu erkennen, welche Abmessungen sie in der Strahlenrichtung haben. Bei der subjektiven Betrachtung und Auswertung eines Röntgennegatives hängt die Beurteilung der Schwärzungsunterschiede von der Erfahrung des Beobachters ab. Das menschliche Auge ist außerdem nicht imstande, alle Unterschiede genau zu bestimmen. Um diese Unsicherheit auszuschalten, ist der Röntgendensograph entwickelt worden, der folgendermaßen arbeitet:

Mit einem Lichtstrahl wird das Negativ durchleuchtet; der Lichtstrahl fällt dann auf eine lichtelektrische Zelle, die ein Spiegelgalvanometer steuert, von dem der Lichtstrahl auf eine photographische Platte fällt. Auf dieser wird also für einen bestimmten Schnitt durch den Prüfkörper eine Kurve der Helligkeits-

unterschiede, das Densogramm, aufgetragen, das Rückschlüsse auf die Größe und genaue Begrenzung der Fehlstellen zuläßt (Abb. 92).

Das röntgen-stereometrische Verfahren. Ein weiteres Hilfsmittel zur genauen Bestimmung der räumlichen Ausdehnung von Fehlstellen sind röntgenographische Stereoaufnahmen, die entweder durch Verschieben des Werkstückes oder der Röntgenröhre hergestellt werden. Ihre Auswertung erfolgt durch subjektive Betrachtung oder mit einem Röntgen-Stereo-Meßgerät, das eine zeichnerische Auswertung der Aufnahmen gestattet.

B. Spannungsmessung.

Für die Feingefügeuntersuchung der Werkstoffe verwendeten v. Laue und Debye-Scherrer die Beugung der Röntgenstrahlen an dem Kristallgitter. Auf demselben Grundsatz beruht das Rückstrahlverfahren zur Messung der in einem Werkstück vorhandenen Spannungen.

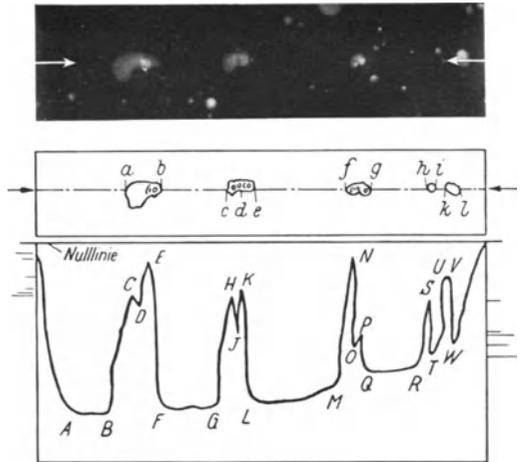


Abb. 92. Röntgenaufnahme und Densogramm eines Stahlgußstückes.

Ein fein ausgeblendetes Bündel homogener Röntgenstrahlen wird durch einen gelochten Film auf das Prüfstück geworfen. Die von diesem nach rückwärts in einem kleinen Winkel zum einfallenden Strahl ausgehenden Inter-

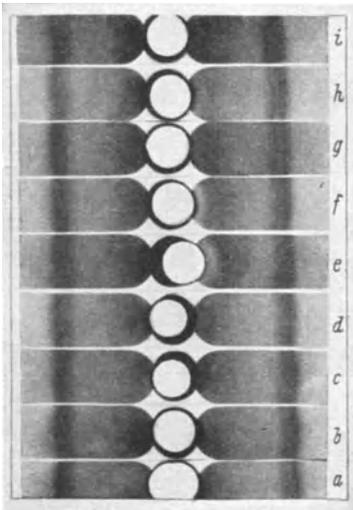


Abb. 93. Neun Filmstreifen von Rückstrahl-aufnahmen an einem Zerreißstab aus St 52 bei verschiedenen Zugbeanspruchungen.

$i = 40 \text{ kg/mm}^2$	$d = 15 \text{ kg/mm}^2$
$h = 35 \text{ „}$	$c = 10 \text{ „}$
$g = 30 \text{ „}$	$b = 5 \text{ „}$
$f = 25 \text{ „}$	$a = 0,5 \text{ „}$
$e = 20 \text{ „}$	

Man erkennt das Zusammenrücken der Interferenzlinien als Folge der Verringerung der Atomabstände durch die Querspannung.

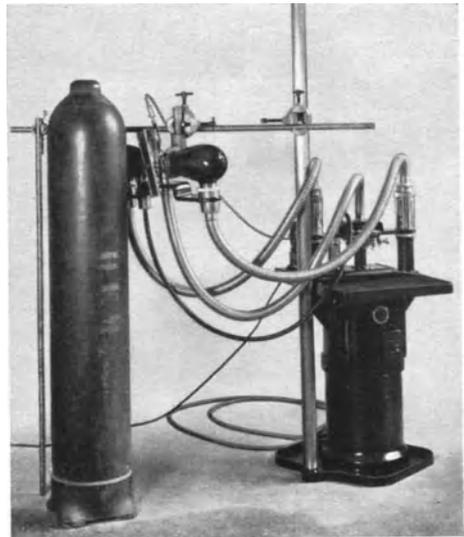


Abb. 94. Röntgenanlage für Rückstrahl-aufnahmen. (Müller, Hamburg.)

ferenzen werden auf dem Röntgenfilm aufgenommen. Durch die Änderung des Atomabstandes als Folge der aufgebrachtten Spannung tritt eine Verschiebung der

Interferenzlinien ein (s. Abb. 93), aus der die Spannung ermittelt werden kann. Die Abb. 94 zeigt den Aufbau einer Anlage für Spannungsmessung. Das Verfahren ist heute insofern noch unvollkommen, als es nur Messungen an der Oberfläche zuläßt und nur die resultierenden Spannungen angibt. Die Entwicklung geht jedoch dahin, daß auch Einzelspannungen gemessen werden können.

Spannungen an Bauwerken und Maschinen werden mechanisch durch Messung der Formänderungen, d. h. also der Dehnungen unter verschiedenen Belastungen, ermittelt. Neben den verschiedensten Verfahren, Veränderungen der Schwingungszahlen einer Stahlsaite und ähnlichen, hat sich für kleine Längenänderungen vor allem das Tensometer bewährt, das infolge seiner geschickten Ausführung an den meisten Bauteilen leicht angebracht werden kann.

C. Die Magnetspulververfahren.

Wird ein magnetischer Fluß durch einen ferromagnetischen Körper geleitet, so wird, sobald Ungleichmäßigkeiten, wie Gasblasen und Risse auftreten, eine Erhöhung des Streuflusses eintreten. Dieser ist um so größer, je näher der Fehler an der Oberfläche liegt und je stärker der Querschnitt magnetisch gesättigt ist. Streut man Eisenfeilspäne auf den Prüfkörper, so werden sich diese infolge des erhöhten Streuflusses an den Fehlstellen ansammeln, um den Übergangswiderstand zu verkleinern. Damit die Feilspäne sich hier ansammeln können, müssen sie eine gewisse Beweglichkeit haben, die dadurch erreicht wird, daß in Öl oder Petroleum aufgeschlämmtes Karbonylisen verwendet wird. Dieses läuft aus einem

Metallschlauch über den Prüfkörper und bespült ihn vollkommen, so daß die Feilspäne an den Störstellen leicht festgehalten werden können.

Aus der Art des Verfahrens ist leicht zu erkennen, daß Risse, die in Richtung des magnetischen Flusses verlaufen, nicht angezeigt werden, da sie ihn nicht stören. Aus diesem Grunde müßte jeder Prüfkörper in drei zueinanderrechtwinkligen Richtungen magnetisiert werden, damit alle auftretenden Risse gefunden werden. In den meisten Fällen wird die Magnetisierung in zwei Richtungen genügen, weil der Verlauf

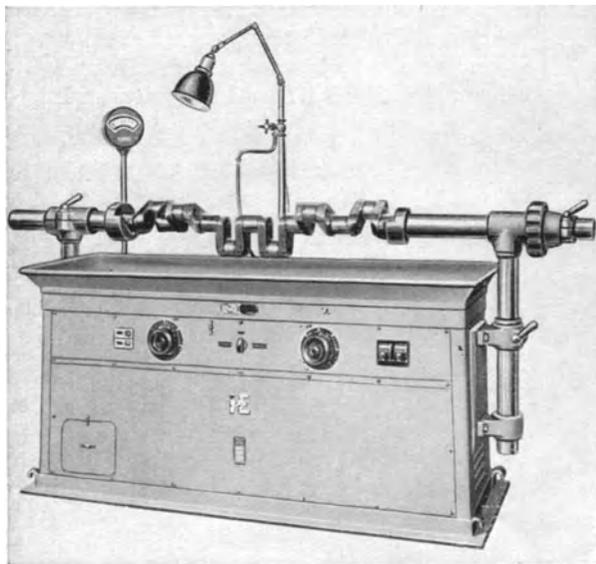


Abb. 95. Vereinigtes Ferroskop-Ferroflux-Gerät nach Heubach.

der Risse von der Art des Prüfkörpers abhängig und damit voraussichtlich bekannt ist. In vielen Fällen genügt auch eine Richtung.

Technische Durchführung des Verfahrens. Die Prüfstücke werden zwischen die Schenkel eines U-förmigen Elektromagneten gelegt, der den magnetischen Fluß erzeugt. Der Übergangswiderstand zwischen den als Spannbacken ausgebildeten Magnetschenkeln und dem Prüfkörper ist dabei groß; um ihn zu verringern,

können bei Reihenuntersuchungen gleichartiger Teile besondere Backen verwendet werden.

Dieser Nachteil des hohen magnetischen Übergangswiderstandes ist in einer Weiterentwicklung des Gerätes dadurch behoben worden, daß jetzt durch den Prüfkörper selbst ein elektrischer Strom geleitet wird, der in bzw. um ihn herum ein magnetisches Feld erzeugt. Diese Ausführung wird im Gegensatz zur ersten, die fremd magnetisiert ist, mit Selbstmagnetisierung bezeichnet. Das Verfahren gestattet eine gewisse Ortsbeweglichkeit, so daß einzelne eingebaute Teile ohne Ausbau untersucht werden können.

Eine Vereinigung beider Verfahren hat sich als sehr günstig erwiesen, weil die beiden magnetischen Felder, wenn Strom und magnetischer Fluß in der

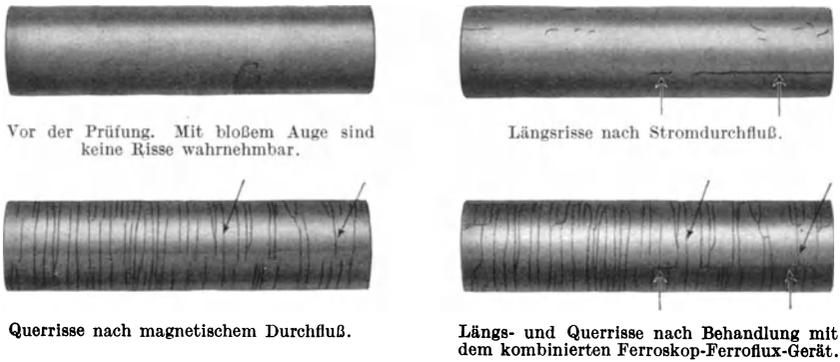


Abb. 96. Kolbenbolzen.

gleichen Richtung fließen, aufeinander rechtwinklig stehen, wodurch z. B. auf Wellen alle Risse sofort gefunden werden. Die Abb. 95 zeigt ein vereinigttes Gerät Bauart Heubach und die folgende Abb. 96 das Ergebnis einer Untersuchung.

Diese Verfahren sind besonders für die Prüfung von gehärteten und geschliffenen Teilen auf Risse, Lunker und nichtmetallische Einschlüsse, also Schlackenzeilen, geeignet. Sie sind daher zur Überwachung von lebenswichtigen Triebwerksteilen unerläßlich geworden.

Die Art der Oberflächenbeschaffenheit hat insofern einen Einfluß auf das Untersuchungsergebnis, als bei hoher magnetischer Sättigung sich die Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche auch schon abbilden. Es empfiehlt sich dann, den Versuchskörper weiß zu lackieren, vor allem bei Schweißnähten, wo sich die Kerben sowie Gefügeunterschiede infolge des Einbrandes aufzeichnen.

D. Das magnetisch-akustische Verfahren.

Bei diesem Verfahren wird ebenso wie bei dem Feilspäneverfahren die Änderung des Magnetfeldes infolge innerer Fehlstellen benutzt. Zur Prüfung wird eine schwingende Spule über das magnetisierte Prüfstück geführt, in der bei einer Änderung des Feldes eine elektromotorische Kraft erzeugt wird, die durch Verstärkerröhren in einem Telephon hörbar gemacht wird. Durch plötzliche Änderung der Normalkomponente wird sowohl die Größe der elektromotorischen Kraft als auch die Schwingungszahl der Spule geändert und damit die Lautstärke und Tonhöhe. Hierbei machen sich plötzlich auftretende Störungen, wie Risse, deutlicher bemerkbar als größere Lunker, weil sich bei diesen das Feld allmählich ändert. Bis 20 mm Wandstärke genügt das remanente Feld, das nach Bestreichen

mit einem Magneten zurückbleibt. Zur Untersuchung stärkerer Proben werden auf der der Prüfseite abgekehrten Seite Magnete (Dauer- oder Elektromagnete) angesetzt, die ein genügendes Feld erzeugen. Das Verfahren wird vor allem zur Prüfung von Stumpfschweißungen bis 30 mm Wanddicke und Kesselböden auf Risse verwendet.

IV. Anhang.

A. Prüfung von Schweißnähten.

Die heutige Bedeutung des Schweißverfahrens hat zur Aufstellung von besonderen Prüfbestimmungen geführt. Zur Prüfung der Schweißverbindungen werden Flachstäbe verwendet, bei denen der Schweißwulst bis auf die Blechstärke abgearbeitet ist und deren Abmessungen nach DIN Vornorm DVM-Prüfverfahren A 120 und DIN 1913 sich mit den Blechdicken ändern. Für die Prüfung des Schweißgutes werden dagegen Kerbflachstäbe verwendet, um einen Bruch in der Schweißnaht zu erzwingen. Die Stababmessungen sind in demselben Normblatt festgelegt. Ferner werden für die Beurteilung von Schweißverbindungen noch Faltversuche angewendet, die in dem Normblatt DIN Vornorm DVM-Prüfverfahren A 121 festgelegt sind. Die Kerbschlagprobe wird nach DIN 1913 ebenfalls angewandt. Die Schweißer müssen nach den baupolizeilichen Vorschriften Probenschweißungen ausführen, die in DIN 4100 festgelegt sind.

Für die zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen kommen alle Verfahren in Betracht, wie Röntgen- bzw. Gammastrahlendurchleuchtung, Magnetpulver- und akustisches Verfahren. Als besonderes Prüfverfahren ist hier das Anfräsen der Schweißnähte nach Schmuckler mit einem Kegelfräser zu erwähnen. Mit Hilfe eines kleinen Fräsersatzes werden verdächtige Stellen der Naht, die vielleicht durch ein anderes Verfahren aufgefunden sind, angefräst und freigelegt. Sie können später wieder zugeschweißt werden.

B. Probenentnahme.

Für die Entnahme der Proben aus Werkstoffen und Werkstücken sind auf Grund der Herstellungsverfahren folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Gußstücke. Biegestäbe werden zugleich mit dem Gußstück aus Grauguß in steigendem Guß stehend gegossen, bei großen Stücken mit dem Gußstück zusammenhängend. Zerreißstäbe werden angegossen. Sie sollen im Durchmesser der mittleren Wandstärke des Gußstückes angepaßt sein. Jedoch soll nicht gefordert werden, daß der Rohdurchmesser des Probestabes 30 mm übersteigt. Die Gußhaut ist durch Abdrehen herunter zu arbeiten. Zerreißstäbe können auch aus dem fertigen Gußstück unter Zerstörung desselben herausgeschnitten werden.

Bei Temperguß sind kleine, in übereinstimmenden Stücken mitgegossene und mitgetemperte Proben zu verlangen, falls nicht einzelne Werkstücke zerschnitten werden sollen.

Bei Stahlguß sind Zerreiß- und Kerbschlag-Proben in Normalabmessungen, aber unter entsprechender Beachtung der Wanddicken des Werkstückes, anzugeßen, wobei Stabkopfform und Bearbeitungszugabe zu berücksichtigen sind.

Nichteisen- und Leichtmetallgußstücke werden bei Werkstoffen mit geringer Dehnung mit angegossenen Biegestäben, bei solchen mit höherer Dehnung mit angegossenen Zerreißstäben geprüft. Bei lebenswichtigen Stücken wird man einzelne Stücke zerschneiden und Zerreiß- oder Dauerprüfstäbe den gefährlichen Stellen entnehmen.

Halbfabrikate. Bei Blechen und Profilen u. a. ist bei der Probenentnahme die Walz- bzw. Fließrichtung zu berücksichtigen. Quer zur Faser können die Festigkeitswerte einen Bruchteil der in der Faserrichtung vorhandenen haben. Auch die Lage der Proben in einer Walzplatte, ob Mitte, Kopf- oder Fußende, ist von Wichtigkeit.

Gleiches gilt für Kalt-, Biege- und Kerbschlag-Proben. Bei Rohren unter 140 mm Außendurchmesser werden die Proben nur in der Längsrichtung entnommen, bei größeren auch in der Querrichtung. Rohre von kleinem Durchmesser können auch als Ganzes zerrissen werden.

Schmiedestücke. Die Proben werden gewöhnlich aus einem angeschmiedeten Probenende entnommen. Dieses Probenende darf im Durchmesser nicht kleiner sein als das Schmiedestück. Bei größeren und wichtigen Stücken spielt die Lage im Stück der Länge wie der Dicke nach eine wichtige Rolle (Abb. 97). Da die Festigkeitseigenschaften am Kopf des Blockes geringer sind als am Fuß, muß man

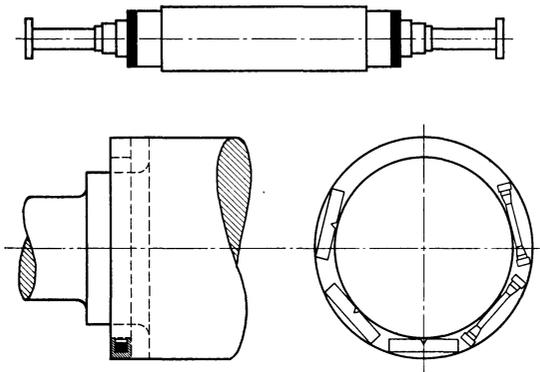


Abb. 97. Probeentnahme an einer Induktorwelle.

verlangen, daß die Proben von dem Ende des Schmiedestückes zu entnehmen sind, das dem Kopf des Blockes entspricht. An der fertigen Induktorwelle ist nicht mehr zu erkennen, welches Wellenende dem oberen bzw. unteren Ende des Blockes entspricht. Man muß daher an beiden Enden des Ballens Proberinge abstechen. Ferner ist zu beachten, daß die Proben aus dem äußeren Ringdrittel des Probenendes zu entnehmen sind. Bei Trommeln entnimmt man einen Probering an der Stirnfläche und schneidet daraus Tangentialproben aus (Abb. 97).

Bei hochbeanspruchten geschweißten Werkstücken, wie Behältern, Trommeln u. dgl., werden Zerreiß- und Kerbschlagproben an der Schweißnaht entnommen.

Grundsätzliche Forderungen. Für jede Probeentnahme aus Werkstücken sind die Stellen höchster Beanspruchung auszuwählen, soweit die Herstellung des Werkstückes das gestattet. Ferner ist bei der Herausarbeitung des Probestabes zu beachten, daß die Eigenschaften nicht beeinflußt werden. Man darf also nicht etwa Blechproben mit der Schere herausschneiden, sondern muß die Schnittflächen sorgsam spanabhebend nacharbeiten. Dasselbe gilt in verstärktem Maße von Stücken, die mit dem Schneidbrenner abgetrennt sind. Sogar durch Schruppen können die Eigenschaften des Probestückes unzulässig verändert werden. Jegliche Probe muß also mit größter Sorgfalt und mit feinen Spänen hergestellt werden, um Erwärmung und Oberflächenverformung zu vermeiden. Ja auch bei der Ober-

flächenbeschaffenheit ist aufs sorgfältigste auf Glätte und Gleichmäßigkeit zu achten. Dauerproben müssen geschliffen bzw. sogar poliert werden.

C. Prüfkosten.

Für die Kosten der Probenherstellung und der verschiedenen Untersuchungen lassen sich etwa folgende Zahlen angeben:

Zerreißversuch ohne Feindehnungsmessung	20,00 RM
„ mit „	40,00 RM
Biegeversuch	20,00 RM
Dauerbiege-Kurzversuch	30,00 RM
Kerbschlagversuch	3,50 RM
Dauerversuch	50,00 RM
Herstellung von Schliffen bis 2 cm ² mit einem Abzug	10,00 RM

Diese Zahlen sind ungefähre Richtwerte, die stark von Werkstoffart und den Unkosten der Prüfstelle abhängen.

Eigene Werkstoffprüfungen erfordern ein hohes Anlagekapital, etwa 15000 RM, bei Beschränkung auf die statische und Kerbschlag-Untersuchung. Werden Dauerversuche und metallographische Untersuchungen einbezogen, so ist für die Einrichtung die doppelte Summe und dazu das Gehalt eines Metallkundlers einzusetzen.

Wichtige Neuerscheinung:

**Hilfsbuch für die
praktische Werkstoffabnahme
in der Metallindustrie**

Von

Dr. phil. E. Damerow und **Dipl.-Ing. A. Herr**

Vorsteher der Werkstoffprüfung
der Rheinmetall-Borsig A.-G., Werk Borsig, Berlin-Tegel

Werkstoffprüfer
Berlin-Tegel

Mit 38 Abbildungen und 42 Zahlentafeln. IV, 80 Seiten. 1936. RM 9.60

Nicht nur der Aufschwung der industriellen Erzeugung mit seinen Massenprüfungen der Werkstoffe, sondern auch die steigende Zahl von Einzeluntersuchungen zwingen zu schneller Erledigung der Prüfungsarbeiten. Diese Arbeiten in physikalischen Untersuchungsanstalten werden aber durch umständliche Berechnungen bei der Auswertung der Versuchsergebnisse stark verzögert. Aus diesem Grunde trifft man nicht selten auf tabellarische Ausrechnungen von häufig wiederkehrenden Versuchen aller Art.

Um nun zuverlässige und zusammenhängende Ausrechnungen aller mechanisch-technologischen Prüfarbeiten zu schaffen, sind die **Hilfstabellen für die „Praktische Werkstoffabnahme“ Damerow-Herr** erschienen. Sie sind ungedruckt schon seit mehreren Jahren an behördlichen Stellen im Gebrauch und haben sich durch ihre Anordnung und allumfassende Reichhaltigkeit bewährt.

Die Hilfstafeln werden sowohl für den Erzeuger wie für den Abnehmer eine willkommene Hilfe bei den Laboratoriumsarbeiten sein; sie sollen weiterhin dem Studium der Prüfverfahren und ihrer Vervollkommnung dienen. Sie sind Helfer bei der Klärung strittiger Fragen für alle bei der Prüfung von Werkstoffen beteiligten Kreise und werden bald in jeder Versuchsanstalt Eingang finden.

Im Vorjahre erschienen:

**Die praktische Werkstoffabnahme
in der Metallindustrie**

Von

Dr. phil. Ernst Damerow

Berlin-Tegel

Mit 280 Textabbildungen und 9 Tafeln. VI, 207 Seiten. 1935.

RM 16.50; gebunden RM 18.—

Das vorliegende Buch sieht seine vornehmste Aufgabe darin, unbedingtes Vertrauen zwischen Erzeuger und Verbraucher herzustellen, so daß die Abnahme nicht als ein Hindernis, sondern als Förderung zur Vervollkommnung der Werkstoffe betrachtet wird.

Der Verfasser bespricht eingangs die Probenahme, dann ausführlich den Zugversuch und die anderen bei Werkstoffen üblichen Prüfungsverfahren, um weiter an praktischen Beispielen in Wort und Bild zu zeigen, wie ein Werkstoff aussieht, was man von ihm verlangen kann und auf welche Eigenheiten die Abnahme zu achten hat.

Aus der großen Fülle seiner Beobachtungen und Erfahrungen und seiner tiefgründigen Kenntnis der metallischen Werkstoffe hat der Verfasser ein Buch geschaffen, das zweifellos sehr bedeutsam ist und das das allgemeine Verständnis für die Werkstoffe wecken wird. Er hat hiermit dem Erzeuger und Verbraucher einen großen Dienst erwiesen, die sich in gegenseitigem Vertrauen finden müssen. „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure.“

Z u b e z i e h e n d u r c h j e d e B u c h h a n d l u n g

Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente.

Elastizität und Festigkeit von Stahl, Stahlguß, Gußeisen, Nichteisenmetall, Stein, Beton, Holz und Glas bei oftmaliger Belastung und Entlastung sowie bei ruhender Belastung. Von **Otto Graf**. Mit 166 Abbildungen im Text. VIII, 131 Seiten. 1929.

RM 12.60; gebunden RM 13.95

Die Dauerprüfung der Werkstoffe hinsichtlich ihrer Schwingungsfestigkeit

und Dämpfungsfähigkeit. Von Prof. Dr.-Ing. **Otto Föppel**, Braunschweig, Dr.-Ing. **E. Becker**, Ludwigshafen, und Dipl.-Ing. **G. v. Heydekampf**, Braunschweig. Mit 103 Abbildungen im Text. V, 124 Seiten. 1929.

RM 8.55; gebunden RM 9.67

Die Brinellsche Kugeldruckprobe und ihre praktische Anwendung bei der

Werkstoffprüfung in Industriebetrieben. Von **P. Wilh. Döhmer**, Schweinfurt. Mit 147 Abbildungen im Text und 42 Zahlentafeln. VI, 186 Seiten. 1925. Gebunden RM 16.20

Ausgewählte chemische Untersuchungsmethoden für die Stahl- und

Eisenindustrie. Von Chem.-Ing. **Otto Niezoldi**, Vorsteher des chemischen, metallographischen und röntgenographischen Laboratoriums der Firma Rheinmetall Borsig A.-G., Werk Borsig, Berlin-Tegel. VI, 152 Seiten. 1936. Steif geheftet RM 5.70

Metallographie der technischen Kupferlegierungen. Von Dipl.-Ing.

Alfred Schimmel. Mit 199 Abbildungen im Text, 1 mehrfarbigen Tafel und 5 Diagrammtafeln. VI, 134 Seiten und 4 Seiten Anhang. 1930. RM 17.10; gebunden RM 18.45

Metallographie des Aluminiums und seiner Legierungen. Von Dr.-Ing.

V. Fuß. Mit 203 Textabbildungen und 4 Tafeln. VIII, 219 Seiten. 1934.

RM 21.—; gebunden RM 22.50

Die Edelmstähe. Von Dr.-Ing. **Franz Rapatz**, Düsseldorf. Zweite, gänzlich umgear-

beitete Auflage. Mit 163 Abbildungen und 112 Zahlentafeln. VIII, 386 Seiten. 1934.

Gebunden RM 22.80

Das technische Eisen. Konstitution und Eigenschaften. Von Prof. Dr.-Ing. **Paul**

Oberhoffer †. Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage. Von Prof. Dr.-Ing. e. h. **W. Eilender** und Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. mont. **H. Esser**. Mit 762 Textabbildungen,

25 Tabellen und 1 Titelbild. X, 642 Seiten. 1936.

Gebunden RM 57.—

Die Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe. Ihre Bestimmung und

Anwendung. Von Dr. techn. **Wilfried Herold**, Wien. Mit 165 Textabbildungen und 68 Tabellen. VII, 276 Seiten. 1934.

Gebunden RM 24.—

WERKSTATTBÜCHER

FÜR BETRIEBSBEAMTE, KONSTRUKTEURE U. FACHARBEITER

Bisher sind erschienen (Fortsetzung):

- Heft 32: Die Brennstoffe.**
Von Prof. Dr. techn. Erdmann Kothny.
- Heft 33: Der Vorrichtungsbau.**
1. Teil: Einteilung, Einzelheiten und konstruktive Grundsätze.
Von Fritz Grünhagen.
- Heft 34: Werkstoffprüfung. (Metalle). 2. Aufl.**
(7.—12. Tausend.)
Von Prof. Dr.-Ing. P. Riebensahm.
- Heft 35: Der Vorrichtungsbau. 2. Teil:**
Bearbeitungsbeispiele mit Reihen planmäßig konstruierter Vorrichtungen. Typische Einzelvorrichtungen. Kritische Vergleiche. 2. Aufl. (8.—14. Tausend.)
Von Fritz Grünhagen.
- Heft 36: Das Einrichten von Halbautomaten.**
Von J. van Himbergen, A. Bleckmann, A. Waßmuth.
- Heft 37: Modell- und Modellplattenherstellung für die Maschinenformerei.**
Von Fr. und Fe. Brobeck.
- Heft 38: Das Vorzeichnen im Kessel- und Apparatebau.**
Von Ing. Arno Dorl.
- Heft 39: Die Herstellung roher Schrauben.**
1. Teil: Anstauchen der Köpfe.
Von Ing. Jos. Berger.
- Heft 40: Das Sägen der Metalle.**
Von Dipl.-Ing. H. Hollaender.
- Heft 41: Das Pressen der Metalle (Nichteisenmetalle).**
Von Dr.-Ing. A. Peter.
- Heft 42: Der Vorrichtungsbau. 3. Teil:**
Wirtschaftliche Herstellung und Ausnutzung der Vorrichtungen.
Von Fritz Grünhagen.
- Heft 43: Das Lichtbogenschweißen.**
Von Dipl.-Ing. Ernst Klosse.
- Heft 44: Stanztechnik. 1. Teil: Schnitttechnik.**
Von Dipl.-Ing. Erich Krabbe.
- Heft 45: Nichteisenmetalle. 1. Teil: Kupfer, Messing, Bronze, Rotguß.**
Von Dr.-Ing. R. Hinzmann.
- Heft 46: Feilen.**
Von Dr.-Ing. Bertold Buxbaum.
- Heft 47: Zahnräder.**
1. Teil: Aufzeichnen und Berechnen.
Von Dr.-Ing. Georg Karrass.
- Heft 48: Öl im Betrieb.**
Von Dr.-Ing. Karl Krekeler.
- Heft 49: Farbspritzen.**
Von Obering. Rud. Klose.
- Heft 50: Die Werkzeugstähle.**
Von Ing.-Chem. Hugo Herbers.
- Heft 51: Spannen im Maschinenbau.**
Von Ing. A. Klautke.
- Heft 52: Technisches Rechnen.**
Von Dr. phil. V. Happach.
- Heft 53: Nichteisenmetalle. 2. Teil: Leichtmetalle.** Von Dr.-Ing. R. Hinzmann.
- Heft 54: Der Elektromotor für die Werkzeugmaschine.**
Von Dipl.-Ing. Otto Weidling.
- Heft 55: Die Getriebe der Werkzeugmaschinen. 1. Teil: Aufbau der Getriebe für Drehbewegungen.**
Von Dipl.-Ing. Hans Rößnitz.
- Heft 56: Freiformschmiede.**
3. Teil: Einrichtung und Werkzeuge der Schmiede. 2. Aufl. (7.—12. Tausend.)
Von H. Stodt.
- Heft 57: Stanztechnik.**
2. Teil: Die Bauteile des Schnittes.
Von Dipl.-Ing. Erich Krabbe.
- Heft 58: Gesenkschmiede. 2. Teil: Einrichtung und Betrieb der Gesenkschmieden.**
Von Ing. H. Kaessberg.

In Vorbereitung bzw. unter der Presse befinden sich:

- Gesenkschmiede III.** Von Ing. H. Kaessberg.
Zerspanbarkeit der Werkstoffe. Von Dr.-Ing. K. Krekeler.
Hartmetalle in der Werkstatt. Von Ing. F. W. Leier.
Messen und Tolerieren von Gewinden. Von Ing. Karl Kress.
Stanztechnik III. Von Dipl.-Ing. E. Krabbe.
Stanztechnik IV. Von Dr.-Ing. W. Sellin.