Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft

Herausgegeben von Dr. Hermann Ebert
Oberregierungsrat und Mitglied bei der Physikal.-Techn. Reichsanstalt

Unter ständiger Mitwirkung von G. Angenheister, K. Beurlen, E. Kleinschmidt, H. Kienle, A. Leonhard, H. I. Schuhmacher, L. Wolf

---

Die Sammlung umfaßt die Gebiete Physik, Physikalische Chemie, Chemie, Astrophysik, Astronomie, Geophysik, Meteorologie, Geologie, Mineralogie, Kristallographie, Elektrotechnik, Glastechnik, Biologie und Medizin.

Die Verfahrens- und Meßkunde der genannten Gebiete will die vielfach zerstreuten Mitteilungen sammeln und in der notwendigen Ausführlichkeit brauchbare Anweisungen für die Verfahren und Messungen geben. Die Aufstellung einer Systematik der Verfahren und Messungen ist beabsichtigt.

Die Physik gliedert: Mechanik allgemein, feste Körper (Ballistik), Flüssigkeiten (Hydrodynamik), Gase (Aerodynamik). — Akustik. — Optik (Beleuchtungs-Lichttechnik). — Wärme. — Elektrizität, Magnetismus, Elektromagnetismus (Elektrodynamik), Hochfrequenz- und Funktechnik. — Molekularphysik. — Atomphysik (Radioaktivität).

Bisher sind erschienen:

Heft 1: Hermann Ebert
Die Wärmeausdehnung fester und flüssiger Stoffe ..... 4,50 RM.

Heft 2: Erich Blechschmidt
Präzisionsmessungen von Kapazitäten, dielektrischen Verlusten und Dielektrizitätskonstanten ..... 7,80 RM.

Heft 3: Günter Hahn
Meßmittel und Prüfverfahren in der mechanisch-technologischen Metallprüfung ..... 7,50 RM.

Meßmittel und Prüfverfahren in der mechanisch-technologischen Metallprüfung

von

Günter Hahn

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Herausgeber dieses Heftes:

Oberregierungsrat Dr. H. Ebert

Mit 56 Abbildungen

ISBN 978-3-663-06383-4 ISBN 978-3-663-07296-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07296-6

Alle Rechte vorbehalten

DK: 53.083 : 539.4
681.2.082
681.2.083
681.2.084

Vorwort

Das vorliegende Heft ist dazu bestimmt, im Rahmen der „Verfahrens- und Meßkunde“ in kürzester Form Aufschluß zu geben über alle wichtigeren Fragen der mechanisch-technologischen Metallprüfung. Der Abschnitt über die zur Durchführung der verschiedenen Versuche und zur Kontrolle der Werkstoffprüfmaschinen erforderlichen Meßmittel wurde an den Anfang der Ausführungen gestellt, um hervorzuheben, daß gerade die Werkstoffprüfung einer scharfen Selbstkritik nicht entbehren kann. Die Prüfverfahren bei ruhender Beanspruchung und die technologischen Prüfverfahren wurden eingehender behandelt, da diese Verfahren zu einem gewissen Abschluß gekommen sind. Ein Handbuch der Werkstoffprüfung kann die Arbeit natürlich nicht ersetzen. Ich hoffe aber, daß sie es dem Werkstoffprüfer ermöglicht, sich in allen die mechanisch-technologische Metallprüfung betreffenden Fragen schnell zu orientieren. Wenn darüber hinaus der Ingenieurnachwuchs dazu angeregt wird, sich mit diesem wichtigen und interessanten Gebiet der Werkstoffprüfung eingehender zu befassen, so wird das Heft seinen Zweck voll erfüllen.

Berlin, im Mai 1941.

Dipl.-Ing. G. Hahn

Inhaltsverzeichnis

Seite

I. Aufgabenstellung 1

II. Meßmittel 2

A. Allgemeines 2

B. Die wichtigsten Geräte zum Ausmessen der Proben vor und nach dem Versuch 3

1. Maße 3
2. Teilmaschinen 4
3. Meßmikroskope 4

C. Die wichtigsten Geräte zur Messung der Formänderungen 7

1. Meßgeräte für statische Untersuchungen 8

a) Anlege- und Verschiebemaßstäbe 8
b) Schaubildzeichner 9
c) Meßuhren 9
d) Feinmeßgeräte 10

d_1) Martens-Kennedy-Apparat 10
d_2) Spiegel-Feinmeßgerät von Martens 11
d_3) Tensometer 14
d_4) Setzdehnungsmesser 15
d_5) Dehnungsmeßgerät mit sehr kleiner Meßstrecke und Anzeige mittels Sperrschicht-Fotozelle (nach Lehr) 16

2. Meßgeräte für dynamische Untersuchungen 18

D. Kraftmesser der Prüfmaschinen 19

1. Hydraulische Kraftmesser 20

a) Federmanometer 20
b) Meßdosen 22
c) Pendelmanometer 22

2. Mechanische Kraftmesser 24

a) Federwaage 24
b) Hebelwaage 25
c) Laufgewichtswaage 25
d) Neigungswaage 25

E. Meßgeräte zur Prüfung der Kraftanzeige 26

1. Kontrollstäbe und -druckkörper 27
2. Federkraftprüfer 28
3. Kraftprüfer mit Quecksilberfüllung 29

Seite

III. Prüfverfahren 31

A. Festigkeitsprüfung bei ruhender Beanspruchung 31

1. Der Zugversuch 32
2. Der Druckversuch 54
3. Der Knickversuch 57
4. Der Biegeversuch 58
5. Scher- und Lochversuche 63
6. Der Verdrehversuch 65

B. Festigkeitsprüfung bei schlagartiger Beanspruchung 70

C. Festigkeitsprüfung bei schwingender Beanspruchung 74

D. Härteprüfung 78

1. Eindringverfahren 79

a) Der Kugeldruckversuch nach Brinell 79
b) Die Härteprüfung nach Vickers 82
c) Die Härteprüfung nach Rockwell 83
d) Kugelschlagversuche 89

4. Ritzhärteprüfung 89
3. Rückprallhärteprüfung 89
4. Pendelhärteprüfung 90

E. Technologische Prüfungen 90

1. Faltversuche 91
2. Schmiedeversuche 92
3. Prüfung von Drähten 93
4. Prüfung von dünnen Blechen 94
5. Prüfung von Rohren 95

I. Aufgabenstellung

Verwendungszweck, d. h. Verarbeitungsart und Gebrauch bestimmen die Auswahl der Werkstoffe. Nicht der Werkstoff mit den besten mechanischen Eigenschaften ist der richtigste. Wirtschaftlich und damit richtig ist nur der Werkstoff, der bei niedrigsten Herstellungs- und Bearbeitungskosten im praktischen Gebrauch seinen Zweck voll erfüllt.

Aufgabe der Werkstoffprüfung ist es also, der Praxis die für die Konstruktion und die Fertigung erforderlichen Kenntnisse von den Eigenschaften der Werkstoffe zu vermitteln und so eine zweckmäßige Auswahl hinsichtlich Stoff und Form zu ermöglichen.

Eine weitere Aufgabe der Werkstoffprüfung ist die Aufklärung der Ursache von Brüchen und Zerstörungen an Konstruktionsteilen und Maschinen mit dem Ziel einer planmäßigen Schadenverhütung.

Um den genannten Aufgaben gerecht zu werden, kommen in der Werkstoffprüfung die folgenden hauptsächlichen Prüfarten zur Anwendung:

1. Mechanische Untersuchungen.
   a) Festigkeitsprüfungen.
   b) Technologische Prüfungen.
2. Metallographische Untersuchungen.
3. Chemische Untersuchungen einschließlich Korrosionsprüfung.
4. Zerstörungsfreie Prüfungen.

II. Meßmittel

A. Allgemeines

Bei den Festigkeitsprüfungen müssen die Abmessungen der Proben vor und nach dem Versuch, die auf die Probe ausgeübten Kräfte und dadurch bedingten Formänderungen während des Versuchs gemessen werden. Hinzu kommen noch die Dehnungsmessungen unter Betriebsbedingungen an fertigen Bauteilen und Maschinen zur Erfassung der tatsächlich herrschenden Spannungen und ihrer Verteilung. Die einwandfreie Durchführung all dieser Messungen ist Grundlage und Vorbedingung jeder Werkstoffprüfung.

Jedes Messen ist ein Vergleichen mit einer Größe gleicher Art, die als Einheit festgelegt ist. Das Messen gründet sich also auf unsere Sinne und das jeweilige Meßzeug (Meßzeug als Oberbegriff für Maße Meßgeräte, Meßeinrichtungen und Zubehör). Dementsprechend ist jede Messung mit persönlichen Fehlern und Fehlern des Meßzeugs behaftet. Während man die persönlichen oder „zufälligen" Fehler, wie sie im wesentlichen in der Streuung zum Ausdruck kommen, durch Mittelbildung aus einer größeren Anzahl von Beobachtungen nahezu ausschalten kann, müssen die „beherrschbaren" Fehler (Fehler des Meßzeugs, Umkehrspanne, Meßkraft, Kippfehler, Einflüsse der Umwelt) für sich bestimmt und in Rechnung gesetzt werden. Im allgemeinen wird es nicht Aufgabe des Werkstoffprüfers sein, die „beherrschbaren" Fehler zu bestimmen, er muß sie aber kennen und gegebenenfalls mit Hilfe von Beiwerten und Prüftabellen eliminieren. Die zufälligen Fehler werden wie folgt erfaßt:

Aus n Anzeigen $A_1 \ldots A_n$ berechnet man den arithmetischen Mittelwert M und bildet die Differenz $\delta_i = A_i - M$. Dann ist die Streuung $\sigma = \pm \sqrt{\Sigma\, \delta_i^2/(n-1)}$. Den größten Unterschied einer Anzeige gegen das arithmetische Mittel kann man nach Berndt [1], [5] mit 3σ ansetzen.

B. Die wichtigsten Geräte zum Ausmessen der Proben vor und nach dem Versuch

1. Maße

Zum Ausmessen der Proben können Strich- oder Endmaße verwendet werden.

Strichmaße sind Maßstäbe mit Millimeterteilung, mit denen sich Längen von 0,1 mm noch schätzen lassen. Voraussetzung hierfür ist scharfkantige, gerade und gleich breite Ausführung der Striche. Nach DIN 866 ist für den Arbeitsmaßstab I eine Teilstrichdicke von 0,07 bis 0,1 mm vorgeschrieben. Hölzerne Maßstäbe sind wegen ihrer hygroskopischen Eigenschaften ungeeignet.

Endmaße sind die Schieblehren und Schraublehren. Die Schieblehre ermöglicht ein genaues Messen auf 0,1 bzw. 0,05 mm. Diese Genauigkeit der Ablesung wird durch Verwendung des Nonius erreicht, bei dem die beiden Striche gesucht werden, die miteinander fluchten. Die Meßungenauigkeit wird hierbei kleiner als beim Schätzen, da das Auge gegen die Versetzung zweier Striche bedeutend empfindlicher ist als für die Aufteilung des Abstandes zwischen zwei Strichen. Die Schieblehre wird bei der Prüfung metallischer Werkstoffe zum Ausmessen von Querschnittsmaßen zwischen 12 und 100 mm benutzt. Bei Maßen unter 12 mm wird die Schraublehre verwendet, deren Ableseeinheit 0,01 mm beträgt und die 0,002 mm zu schätzen gestattet. Die Meßflächen der Schraublehren sind im allgemeinen planparallel. Bei unebenen Oberflächen der Proben, z. B. bei Wanddicken-Messungen an Rohren arbeitet man zweckmäßig mit kugelig geformten Meßflächen; in anderen Fällen wird man vorteilhaft Schneiden verwenden. Grundsätzlich sollten nur Schraublehren mit sogenannten „Fühlschrauben" benutzt werden, um einen zu hohen Anpreßdruck an das zu messende Stück und damit Meßfehler zu vermeiden, die durch Formänderung der Schraublehre oder des zu messenden Gegenstandes auftreten können. Durch die Fühlschraube wird die Vorwärtsbewegung der Schraubenspindel ausgeschaltet, sobald der Gegendruck des Probenstücks den geringen Federdruck der Fühlschraube überwindet.

2. Teilmaschinen

Um bei Zugversuchen die Stabverlängerung nach dem Bruch unabhängig von der Lage der Bruchstelle des Probestabs messen zu können, wird der Stab mit einer „Teilung" versehen. Diese Teilung besteht aus einem auf den Probestab aufgebrachten Längsriß und senkrecht dazu verlaufenden kurzen Marken. Der Abstand der Marken voneinander wird in den meisten Fällen zu 5 mm oder einem Vielfachen davon gewählt. Die Teilung wird mit besonderen Vorrichtungen,

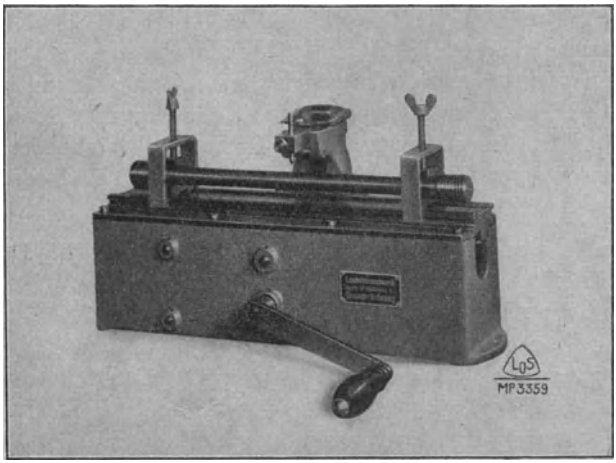


Abb. 1. Teilmaschine, Bauart Losenhausen

am zweckmäßigsten mit einer Teilmaschine aufgebracht, s. Abb. 1. Beispielsweise wird der Probestab auf einem Schlitten befestigt, der von einem durch Kurbel und Spindeltrieb bewegten Schaltwerk schrittweise um 5 mm vorwärts bewegt wird. Zwischen jedem Schritt bleibt der Schlitten einen Augenblick stehen und der Mechanismus zieht mit der Reißnadel einen Strich auf dem Probestab. Bei erforderlicher hoher Genauigkeit und geringer Dehnung empfiehlt sich die Nachprüfung und spätere Auswertung unter einem Meßmikroskop.

3. Meßmikroskope

Das Meßmikroskop von Zeiss (Abb. 2) findet für die verschiedensten Messungen innerhalb eines Meßbereichs von 50 mm Anwendung. Es

besteht aus einem Ständer mit hufeisenförmig gestaltetem Fuß, an dem ein Schlitten seitlich schwenkbar und in der Höhe verstellbar befestigt ist. Der Mikroskoptubus ist an dem Schlitten befestigt und kann mittels Spindeltrieb seitlich verschoben werden. Hierzu dient eine Feinmeßschraube, deren Meßtrommel eine Ablesung von 0,01 mm und eine Schätzung auf Bruchteile gestattet. Das Scharfeinstellen der Bilder erfolgt durch Höhenverstellung des mit Zahntrieb versehenen Tubus. Die Okulare sind mit einer Meßmarke in Gestalt eines Strichkreuzes versehen. Beim Messen wird die Ordinate des Fadenkreuzes auf den Anfang der Meßstrecke beigestellt und die Schlittenstellung an Teilung und Meßtrommel abgelesen. Dann wird der Schlitten so weit verschoben, bis sich die Ordinate des Fadenkreuzes mit dem Ende der Meßstrecke deckt. Der Unterschied beider Ablesungen ergibt die gemessene Länge.

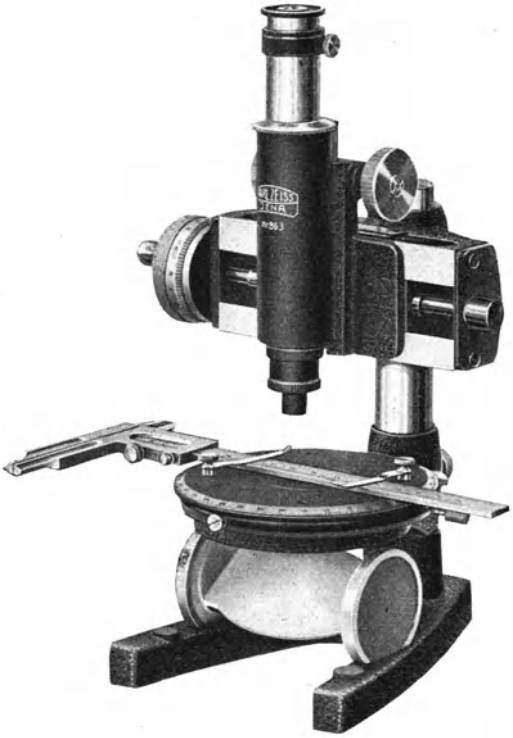


Abb. 2. Meßmikroskop, 0 bis 50 mm (Bauart Carl Zeiss, Jena)

Beim Messen mit dem Abbe-Komparator (Abb. 3) wird die zu messende Strecke unmittelbar mit einer Millimeterskale verglichen. Meßstrecke und Maßstab sind in einer Richtung hintereinander in gleicher Höhe auf einem gemeinsamen Träger angeordnet. Der Träger von Objekt und Maßstab ist eine Stahlplatte (1). Die Platte trägt links das Objekt (2), rechts einen Glasmaßstab (6). Über dem Objekt befindet sich ein Beobachtungsmikroskop (3), über dem Maßstab ein Spezialmeßmikro-

skop (5). Beide Mikroskope sind von einem kräftigen Träger, der mit einem Wärmestrahlungsschutz (4) umgeben ist, gehalten. Die auf Rollenlagern laufende Tischplatte (1) läßt sich unter den Mikroskopen in der Meßrichtung nach Lösen der Klemmschraube (10) bewegen. Die Feinbewegung des Tisches erfolgt mit dem Triebknopf (9) nach Anziehen der Klemmschraube (10). Das Okular des Beobachtungsmikroskops (3) ist mit einer Meßmarke in Gestalt eines Faden-

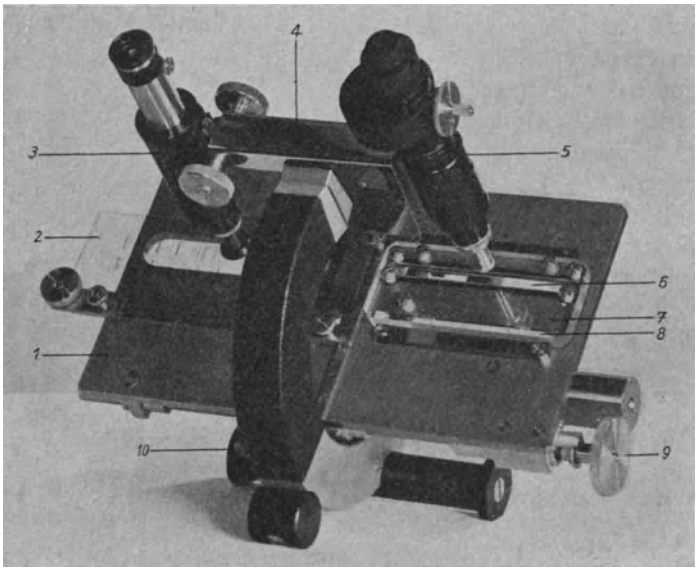


Abb. 3. Abbe-Komparator von Zeiss

1 = Stahltischplatte, 2 = Objekt, 3 = Beobachtungsmikroskop, 4 = Wärmestrahlungsschutz, 5 = Spezialmeßmikroskop, 6 = Glasmaßstab, 7 = Glasdeckplatte, 8 = Thermometer, 9 = Triebfeinbewegung, 10 = Klemmschraube

kreuzes versehen. Der Maßstab hat eine Millimeterteilung von 100 bzw. 200 mm Länge, die auf einem Glasstreifen (6) aufgebracht ist, der von unten gegen eine dicke Glasdeckplatte (7) gedrückt wird. Die Genauigkeit dieser Maßstäbe ist die größte, die sich nach dem augenblicklichen Stand der Technik erreichen läßt. Abgelesen wird der Maßstab mit dem Spezialmeßmikroskop (5), bei dem an Stelle der üblichen Meßspindel eine archimedische Spirale auf einer ebenen Glasplatte angebracht ist. Die Drehung der Glasplatte kann an einer Teilung abgelesen werden, die auf der Platte selbst angebracht ist und

gleichzeitig mit der Spirale im Gesichtsfeld erscheint, s. Abb. 3a (abzulesender Wert: 3,3248 mm). Die gewährleistet Meßgenauigkeit beträgt 1,5 μ. Die erreichte Genauigkeit kann etwa zehnmal so groß sein. Beim Arbeiten mit dem Komparator wird der Probekörper auf der Tischplatte in der geraden Verlängerung des Maßstabes gelagert und das eine Ende der zu messenden Länge mit dem Fadenkreuz des Beobachtungsmikroskops durch Verschieben der Tischplatte zur Deckung gebracht. Hierauf wird der Maßstab abgelesen und dann die Tischplatte verschoben, bis im Beobachtungsmikroskop das andere Ende der Meßstrecke unter dem Fadenkreuz liegt. Es folgt die zweite Ablesung. Die Differenz beider Ablesungen ergibt die gesuchte Länge.

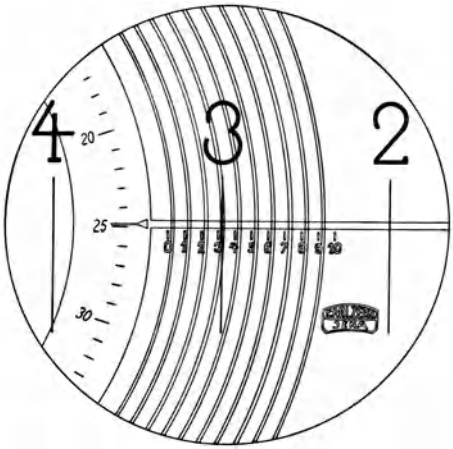


Abb. 3a. Das Sehfeld des Spiralmikroskops (Zeiss)

Bei älteren Geräten besteht der Maßstab aus Silber mit einer Teilung von $^1/_5$ oder $^1/_{10}$ mm. Das Meßmikroskop ist mit einem Okularschraubenmikrometer ausgestattet. Die Wirkungsweise der Okularmeßschraube ist folgende: Im Okular ist eine mit einem Doppelstrich versehene Glasplatte in einer Führung gelagert und kann durch eine Meßspindel über das vom Objektiv des Mikroskops entworfene Bild des Maßstabes hinweggeführt werden. Ist der Maßstab in Zehntelmillimeter, die Trommel der Meßschraube in hundert Teile geteilt, so sind an der Trommelteilung die zweite und dritte Dezimale ablesbar, die vierte kann geschätzt werden.

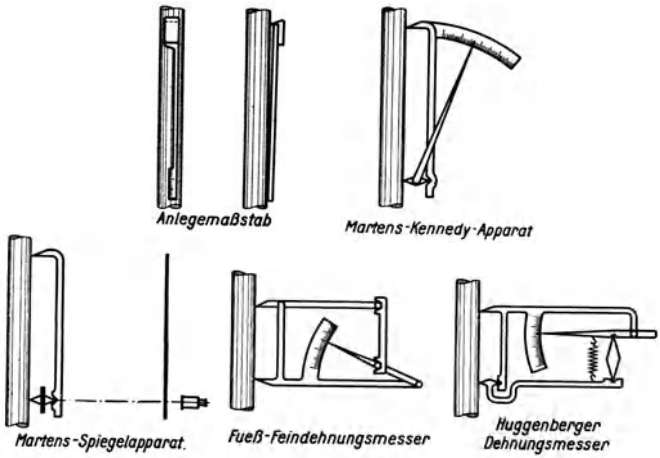
C. Die wichtigsten Geräte zur Messung der Formänderungen

Bei den Formänderungsmessungen ist zu unterscheiden, ob sie an statisch oder schwingend beanspruchten Versuchskörpern durchgeführt werden. Die für diese beiden Verwendungszwecke gebauten Geräte sind sehr verschiedenartig. Ihre Auswahl richtet sich danach,

ob sie für die Untersuchung an Proben oder einfachen Werkstücken in der Prüfmaschine (Meßlänge 20 bis 200 mm), zur Messung des Spannungsverlaufs an Bauteilen oder Maschinen (Meßlänge 2 bis 200 mm) oder zur Feststellung des Spannungsverlaufs an Stellen, wo Spannungsspitzen auftreten, z. B. an Kerben, Hohlkehlen, Nuten, Bohrungen usw. (Meßlänge 0,7 bis 2 mm bei entsprechend geringer Bauhöhe), bestimmt sind.

1. Meßgeräte für statische Untersuchungen

a) Anlege- und Verschiebemaßstäbe. Zur Ermittlung größerer Formänderungen während des Zugversuchs werden Anlegemaßstäbe verwendet (s. Abb. 4, links oben), die am Probestab mit Federklemmen



DVM 1927 TWL 24 509

Abb. 4. Dehnungsmesser

befestigt werden. Der Abstand zwischen der oben liegenden Schneide und der Nullmarke der Millimeterteilung des Anlegemaßstabes begrenzt die Meßlänge, innerhalb der die Längenänderung des Stabes gemessen wird. Der Anlegemaßstab wird so am Probestab befestigt, daß die Nullmarke der unten liegenden Millimeterteilung mit einer Strichmarke der Stabteilung fluchtet. Längt sich der Stab innerhalb der Meßlänge, so ist die Größe der Verlängerung Δl an der jeweiligen Stellung der Strichmarke des Stabes zur Millimeterteilung des Anlegemaßstabes ablesbar. Zur Errechnung der Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ muß man die ab-

gelesene Verlängerung noch durch die Meßlänge l_0 dividieren. Bei den Prozentmaßstäben erübrigt sich diese Rechnung. Hier ist die Teilung des unteren Endes des Anlegemaßstabes in Prozenten der Meßlänge ausgeführt. Bei der Messung mit Anlegemaßstäben kann $^1/_{10}$ des Teilstrichabstandes — gegebenenfalls unter Benutzung einer Lupe — geschätzt werden. Bei den Verschiebemaßstäben, die häufig in der Bauweise der Rechenschieber ausgeführt sind, können 0,1 mm mit Hilfe der als Nonius ausgebildeten Zunge gemessen werden.

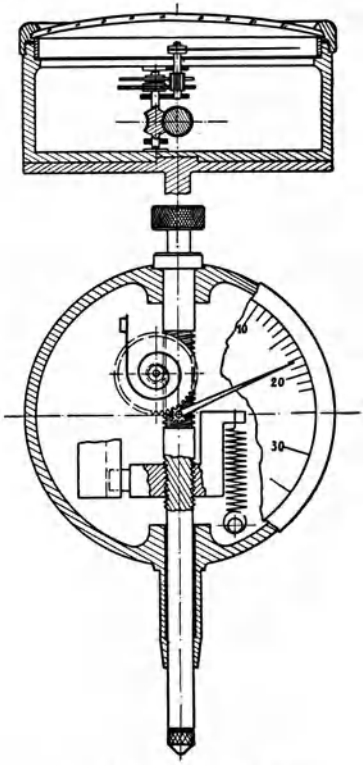


Abb. 5. Meßuhr von Zeiss

b) Schaubildzeichner sind keine Meßgeräte im engeren Sinne. Sie dienen z. B. lediglich dazu, während des Zugversuchs das Belastungs-Verlängerungsschaubild aufzuzeichnen. Der Grundgedanke dabei ist folgender: Eine Trommel, die mit Diagrammpapier belegt ist, wird proportional der Längenänderung des untersuchten Probestabes verdreht. Auf der Trommel gleitet ein Schreibstift, der proportional der Belastung, senkrecht zur Drehrichtung der Trommel, lineare Verschiebungen erfährt. Die Vereinigung beider Bewegungen ergibt einen Kurvenverlauf, der die Verlängerung des Probestabes in Abhängigkeit von der Belastung darstellt.

c) Meßuhren finden in der Werkstoffprüfung überall dort Anwendung, wo Formänderungen in der Größenordnung von 0,01 mm gemessen werden sollen. Meßuhren (Abb. 5) sind Meßgeräte, bei denen der Tastbolzenweg auf einen Zeiger durch Zahnstange oder ähnliches und Zahnräder übertragen wird. Die Uhren sind so gearbeitet, daß der Zeiger jeder, auch einer rückläufigen Bewegung des Tastbolzens folgt. Über Begriffe, Anschlußmaße, Genauigkeit und Meßbereich s. DIN E 878. Die Meßuhr nach Leuner-Staeger (Abb. 6) stellt eine Sonderausführung mit einem Meßbereich von 50 mm dar (normal 10 mm).

Die Skale ist in vier Quadranten zu je 100 Teilstrichen geteilt. Ein Teilstrich entspricht einem Tastbolzenweg von 0,01 mm, eine volle Zeigerumdrehung 4 mm räumlicher Bewegung des Meßpunktes.

d) Feinmeßgeräte. Zur Messung der elastischen Formänderungen und bestimmter Spannungsgrenzen werden die verschiedensten Feinmeßgeräte benutzt, die sich sowohl durch ihren Meßbereich als auch durch die Meßgenauigkeit voneinander unterscheiden. Alle in Abb. 4 gezeigten Feinmeßinstrumente werden stets paarweise am Probestab befestigt, und zwar an zwei gegenüberliegenden Längsfasern.

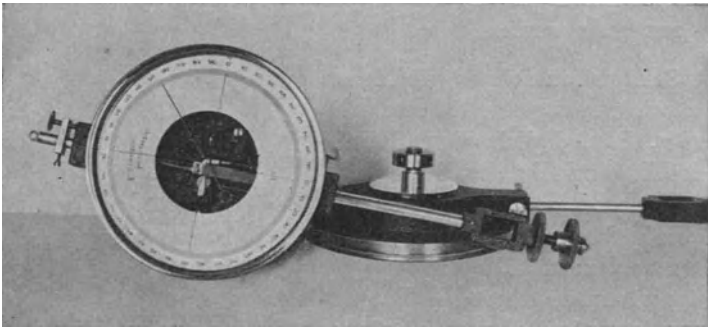


Abb. 6. Meßuhr nach Leuner-Staeger

Die Messung mit jeweils zwei Geräten bietet den Vorteil, daß die Verlängerung aus dem Mittelwert zweier Ablesungen bestimmt werden kann. Bei Verwendung von zwei Spiegelapparaten lassen sich außerdem Bewegungen des Probestabes im Raume, z. B. Schiefstellen zur Zugachse der Zugprüfmaschine, sofort erkennen.

d_1) Martens-Kennedy-Apparat. Abb. 4, rechts oben, zeigt das Grundsätzliche des Martens-Kennedy-Apparates. Er besteht aus einer Meßfeder mit Bogenskale, an der die Drehung eines Prismas durch einen langen Zeiger angezeigt wird. Die Meßfedern sind Stahlschienen mit einer Kerbe am unteren Ende und einer rechtwinklig umgebogenen Schneide am anderen Ende (Abstand zwischen Schneide und Kerbe = Meßlänge). Sie werden mit einer Federklemme parallel zur Stabachse und diametral gegenüber so am Stab angesetzt, daß sich ihre Schneiden an den Probestab anlegen. In die Kerben der Meßfedern wird jeweils die eine Schneide des Prismas gelegt, die andere Prismen-

schneide wird durch die Spannung der Federklemme gegen die Staboberfläche gedrückt. Die Drehung der Prismen entsteht dadurch, daß sich der Probestab bei Zugbelastung verlängert und den Auflagepunkt der beiden am Stabe liegenden Prismenschneiden gegen den in den Kerben der Meßfedern liegenden verschiebt. Die Drehung der Prismen wird durch die fest mit ihnen verbundenen Zeiger an den Bogenskalen angezeigt. Die Skalen haben Millimeterteilung, so daß 0,1 mm noch geschätzt werden können. Die übliche Übersetzung des Martens-Kennedy-Apparates beträgt 1 : 50. Bei dieser Übersetzung entspricht einer Ablesung von 1 mm an der Skale eine Verlängerung der Meßlänge von 0,02 mm. Bildet man statt des arithmetischen Mittels die Summe der Ablesungen beider Apparate, so bedeutet 1 mm Gesamtablesung 0,01 mm Verlängerung.

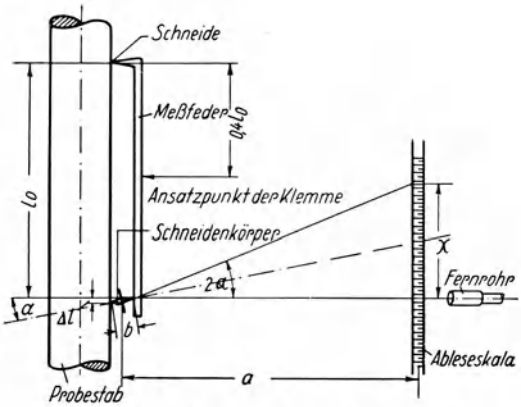


Abb. 7. Schematische Darstellung der Wirkungsweise des Spiegelfeinmeßgerätes von Martens

d_2) Spiegelfeinmeßgerät von Martens, vgl. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 107. Der gebräuchlichste Dehnungsmesser zur Messung elastischer Formänderungen für alle Meßlängen zwischen 50 und 200 mm ist das Spiegelfeinmeßgerät von Martens. Abb. 4, unten links, und Abb. 7 zeigen das Prinzip der Feinmessungen mit dem Spiegelgerät. Die Wirkungsweise ist folgende: Erfährt der Probestab unter der Belastung eine Längenänderung innerhalb der Meßlänge (= Abstand zwischen Schneide und Kerbe der Meßfedern), so wird eine drehende Bewegung der Schneidenkörper, also auch der Spiegel erfolgen. Die Größe der Bewegung kann mit Hilfe der Fernrohre aus der Verschiebung der Spiegelbilder der Skalen gegen das Fadenkreuz der Fernrohre abgelesen werden. Der Zeiger des Martens-Kennedy-Apparates wird also beim Spiegelgerät durch einen Lichtstrahl ersetzt. Zum vollständigen Gerät gehören zwei Spiegelapparate, zwei Meßfedern, eine Klemme, zwei Fernrohre und zwei Ableseskalen. Abb. 8

zeigt die beiden Spiegelgeräte in allen Einzelheiten fertig an einem Rundstab angesetzt. Der Spiegelapparat selbst besteht aus einem Schneidenkörper von rhombischem Querschnitt, an welchem auf der einen Seite Zeiger und Handgriff, am anderen Ende das Verlängerungsstück mit dem Spiegelrahmen und dem Spiegel befestigt sind. Der Rahmen ist um seine waagerechte Achse drehbar angeordnet. Der Spiegel ist im Rahmen in Spitzen gelagert, welche in die Fassung eingelassen sind und in Körnermarken des Spiegels eingreifen. Dadurch kann der Spiegel mit Hilfe einer kleinen Schraube, die auf den Spiegel drückt, auch um seine senkrechte Achse gedreht werden. Die Rückwärtsbewegung des Spiegels wird durch eine kleine Feder bewirkt. Durch diese Art der Spiegellagerung lassen sich die Skalenbilder unabhängig von der Stellung der Schneidenkörper leicht in das Blickfeld und die Nullmarken der Skalen auf das Fadenkreuz der Fernrohre einstellen. Mit Hilfe von zwei Meßfedern und einer Klemme (s. Abb. 8) werden die Spiegelapparate am Stab angesetzt, indem die eine Schneidenkante der Schneidenkörper in die Kerbe der Meßfedern gelegt, die andere Schneidenkante gegen die Staboberfläche gedrückt wird. Die Neigung der Schneidenkörper gegen die Stabachse wird bei unbelastetem Stab mit Hilfe des auf der Handgriffseite der Spiegelapparate angebrachten Zeigers und einer entsprechenden Marke an den Meßfedern eingestellt. Die Spiegelapparate werden diametral zueinander so angesetzt, daß ihre Achsen in genau parallele Lage zueinander und

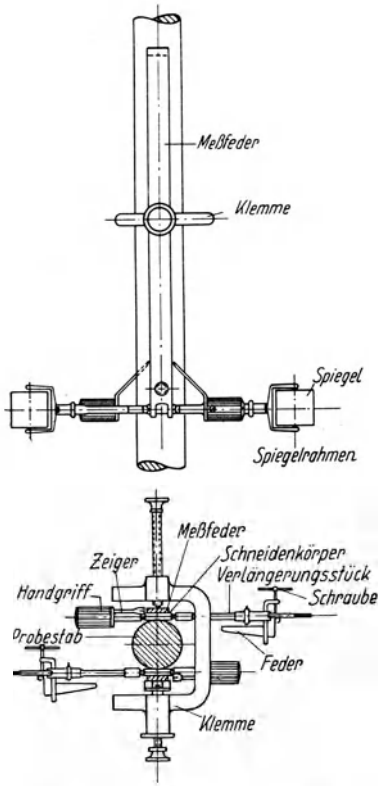


Abb. 8*).
Spiegelfeinmeßgerät von Martens

*) Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Maßgebend ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Vertrieb, G. m. b. H., Berlin SW 68, erhältlich ist

senkrechte Lage zum Probestab kommen. Die Ableseskalen haben Millimeterteilung.

Das Übersetzungsverhältnis des Spiegelfeinmeßgerätes ergibt sich aus folgender Überlegung: Nach Abb. 7 ist die Stabdehnung $\Delta l = b \sin \alpha$, worin b die Breite des Schneidenkörpers und α der vom Spiegel durchlaufende Winkel sind. Die Ablesung x an der Skale ist, da der Lichtstrahl nach dem Reflexionsgesetz den Winkel 2α durchläuft, $x = a \operatorname{tg} 2\alpha$, worin a den Abstand der Skale vom Spiegel bedeutet. Das Übersetzungsverhältnis ist also

$$n = \frac{\Delta l}{x} = \frac{b \cdot \sin \alpha}{a \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}.$$

Da nur sehr kleine Winkel α in Frage kommen, kann mit genügender Annäherung [4] gesetzt werden

$$n = \frac{\Delta l}{x} = \frac{b}{2a}.$$

Der Skalenabstand a (Entfernung zwischen spiegelnder Fläche und Skale) wird nach der Schneidenkörperbreite b von etwa 4,5 mm (wobei b auf 0,001 mm genau ausgemessen wird) so bemessen, daß $b/2 : a = 1 : 500$ ist, d. h. der Skalenabstand beträgt etwa 1125 mm. Mit Hilfe einer Meßlatte wird diese Entfernung eingestellt. Die Fernrohre gestatten bei dieser Anordnung mit Hilfe der Fadenkreuze an dem Bild der etwa zweifach vergrößerten Skale mit Genauigkeit die Ablesung von 0,1 mm. Die Skalen stehen senkrecht zur Fernrohrachse, die auf die Mitte der Spiegelfläche eingestellt ist.

Bei einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 500 entspricht einer Ablesung von $^1/_{10}$ mm an einer Skale eine Verlängerung des Probestabes von $^1/_{5000}$ mm = 0,0002 mm. Auch beim Arbeiten mit dem Spiegelfeinmeßgerät wird statt des arithmetischen Mittels die Summe der Ablesungen beider Skalen gebildet, so daß 0,1 mm Gesamtablesung (Ableseeinheit) 0,0001 mm Verlängerung des Stabes bedeutet. Bei den Messungen soll die größte Längenänderung Δl den Betrag von 0,2 mm nicht überschreiten, da sonst die Näherungsformel für die Vergrößerung nicht mehr zutrifft. Aus dem gleichen Grunde sind die Schneidenkörper so anzusetzen, daß sie etwa bei der Hälfte der zu messenden Längenänderung senkrecht zur Stabachse stehen.

Das Einstellen des Spiegelfeinmeßgerätes erfolgt zweckmäßig in folgendem Arbeitsgang:

1. Ansetzen der Meßfedern mit Hilfe der Klemme am Probestab.
2. Einsetzen und Ausrichten der Spiegelapparate.

3. Aufstellen der Stative mit den Fernrohren und Ableseskalen in etwa 1100 mm Entfernung von den Spiegelapparaten.
4. Einstellen der Fernrohre (Fadenkreuz auf Mitte Spiegel).
5. Durch Drehen der Spiegel um ihre senkrechte Achse (hierzu dient die kleine Schraube am Spiegelrahmen) Skalenbilder in das Blickfeld der zugehörigen Fernrohre bringen.
6. Einstellen des genauen Abstandes a zwischen Spiegel und Skalen unter Verwendung der Meßlatte.
7. Durch Drehen der Spiegel um ihre horizontale Achse die Nullmarke der betreffenden Skale auf den horizontalen Faden des Fadenkreuzes der Fernrohre einstellen.

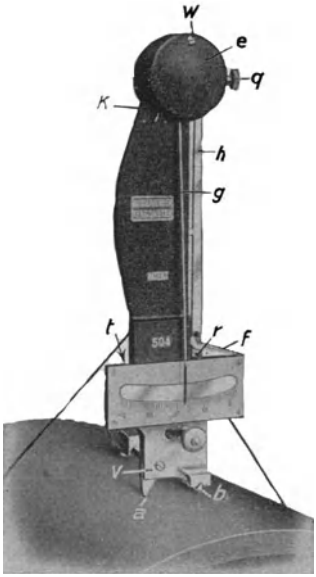


Abb. 9. Huggenberger Tensometer

a = feste Schneide, b = bewegliche Schneide, f = Feststeller, h = Hebel zur Übertragung der Schneidenbewegung auf den Zeiger, g = Zeiger, q = Zeigereinstellschraube, k = Anzeigevorrichtung des Meßbereiches

Andere Spiegelgeräte, die sich von dem Martens-Gerät durch größere Übersetzung, kleinere Meßlängen und geringere Fehlermöglichkeiten unterscheiden, sind die von Bücken, Mathar, für Schubmessungen das von A. Föppl und für Querdehnungsmessungen das von Kuntze. Die Geräte von Geiger, Preuß, Findeisen, Rühl und Berg und für Querdehnungsmessungen das von Sieglerschmidt nehmen neben der Martensschen Anordnung noch eine Hebelübersetzung zu Hilfe [6].

d_3) Tensometer. Die etwas umständliche Art des Ansetzens und Einstellens der Spiegelapparate und das Arbeiten mit Fernrohren wird bei Verwendung hochempfindlicher Zeigerapparate vermieden. Die Vergrößerung wird hier durch eine rein mechanische Übersetzung im Meßgerät erzeugt. Die bekanntesten Geräte dieser Art sind die Huggenberger-Tensometer (s. Abb. 4, unten rechts). Da sie überall leicht ansetzbar sind, werden sie außer bei den mechanischen Prüfungen insbesondere zur Messung des Spannungsverlaufs an Werkstücken verwendet. Das in Abb. 9 gezeigte Tensometer ist für Messungen bestimmt,

die eine hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit erfordern. Die wichtigsten Lagerstellen sind als Schneidenlager ausgebildet. Zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit ist das Zifferblatt mit einem Spiegel versehen. Der ausgewuchtete Zeiger kann beliebig eingestellt werden. Die zu messende Längenänderung wird bei dem Meßgerät der Abb. 9 rund 1200fach vergrößert. Einem Zeigerausschlag von 0,1 mm entspricht somit eine Längenänderung $\Delta l \approx 0{,}00008$ mm. Der Meßbereich beträgt $\pm$ 0,1 mm. Die Geräte werden in verschiedenen Ausführungs-

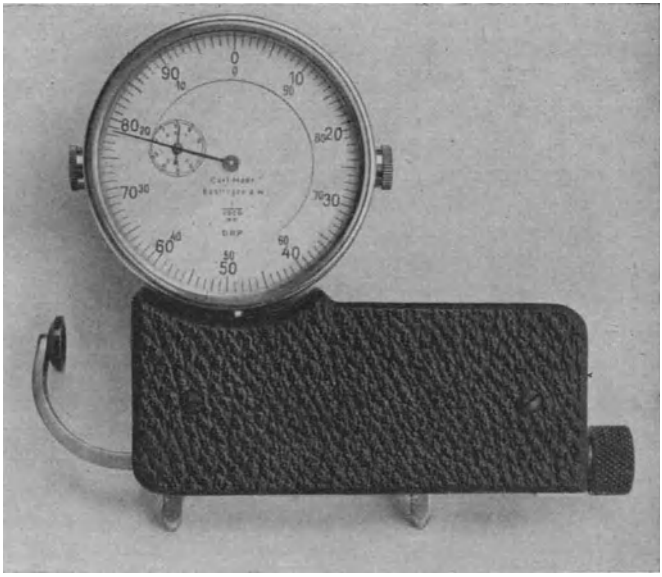


Abb. 10. Setzdehnungsmesser (Bauart Mahr-Esslingen)

formen mit Vergrößerungen von 300, 1000, 1200 und 2000 hergestellt. Durch Benutzung von Verlängerungsstangen kann die normale Meßlänge von 10 bzw. 20 mm beliebig verändert werden. Zahlreiche Aufspannvorrichtungen ermöglichen die Befestigung des Gerätes in jeder Lage an der Meßstrecke. Von den übrigen Zeigerdehnungsmessern seien die von Manet, Mesnager und Böttcher erwähnt [6].

d_4) Setzdehnungsmesser. Der Grundgedanke beim Arbeiten mit Setzdehnungsmessern besteht darin, Meßstrecken durch Körner, Stifte oder Kugeln festzulegen und ihre Änderungen unter Aufsetzen ein und desselben Dehnungsmessers zu verfolgen. Abb. 10 zeigt einen

Setzdehnungsmesser der Firma Mahr-Eßlingen für Meßlängen von 20 bis 70 mm. Der feste Fuß (in der Abbildung rechts) ist durch Austausch von Distanzringen verschiebbar. Ein Winkelhebel überträgt die Verlagerungen des linken Fußes auf den Tastbolzen der Meßuhr. Die Meßuhr zeigt die Längenänderungen der Meßstrecke unmittelbar in 0,001 mm an. Der Meßbereich beträgt 1 mm. Die Anzeichnung der Meßstrecke erfolgt durch Doppelkörner. Als Meßmarken werden nach einem Vorschlag von Pfender Stahlkugeln von $^1/_{16}''$ benutzt. Sie werden mittels Döppers in das zu untersuchende Stück derart eingeschlagen, daß sie sicher festgehalten werden, aber nahezu als Halbkugeln aus der Meßfläche herausstehen. Auf diese Halbkugeln setzen sich die Füße des Dehnungsmessers mit kegeligen Vertiefungen auf. Setzdehnungsmessungen werden vornehmlich zur laufenden Überwachung des Spannungsverlaufs in Bauwerken und bei der Bestimmung von Schrumpfspannungen in Schweißungen durchgeführt.

d_5) Dehnungsmeßgerät mit sehr kleiner Meßstrecke und Anzeige mittels Sperrschicht-Fotozelle (nach Lehr). Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß Dehnungsmesser mit kurzen Meßlängen außer zur Dehnungsmessung beim Zugversuch hauptsächlich zur Bestimmung des Spannungsverlaufs in Maschinenteilen verwendet werden. Bei Meßlängen von 10 bis 20 mm, wie sie die Tensometer aufweisen, ist es jedoch nicht möglich, den Spannungsverlauf gerade an den Stellen zu bestimmen, wo erfahrungsgemäß Spannungsspitzen vorhanden sind. Solche Stellen sind die Querschnittsübergänge und Kerben aller Art, Augen, Querbohrungen usw. Für derartige Messungen ist ein Gerät erforderlich, das bei kleinster Meßstrecke höchste Empfindlichkeit mit geringem Gewicht vereint, wie es Lehr und Granacher [3] entwickelt haben.

Dieses Gerät mit einer Meßstrecke von 2 mm und 10000- bis 50000facher Vergrößerung hat bei einer Gesamthöhe von etwa 40 mm ein Gewicht von etwa 15 g, so daß es auch unter schwierigsten Verhältnissen angesetzt werden kann. Abb. 11 zeigt den Aufbau dieses Feindehnungsmessers. Die Wirkungsweise des Meßgerätes ist folgende: Die Längenänderungen der 2 mm langen Meßstrecke, in deren Enden die Spitzen des Gerätes eingreifen, werden zunächst durch eine doppelte Hebelübersetzung mechanisch etwa fünfzigfach vergrößert. Am Ende des zweiten Hebels sitzt eine Steuerfahne, die gegen eine am Gehäuse des Gerätes sitzende Blende einen Spalt bildet, dessen Breite sich nach

Maßgabe der Längenänderungen der Meßstrecke ändert. Die Fahnen steuern einen von einer kleinen Glühlampe ausgehenden Lichtstrom, der von der Sperrschicht-Fotozelle aufgenommen wird und hier einen Strom erzeugt, der mittels Mikroamperemeter gemessen wird. Die

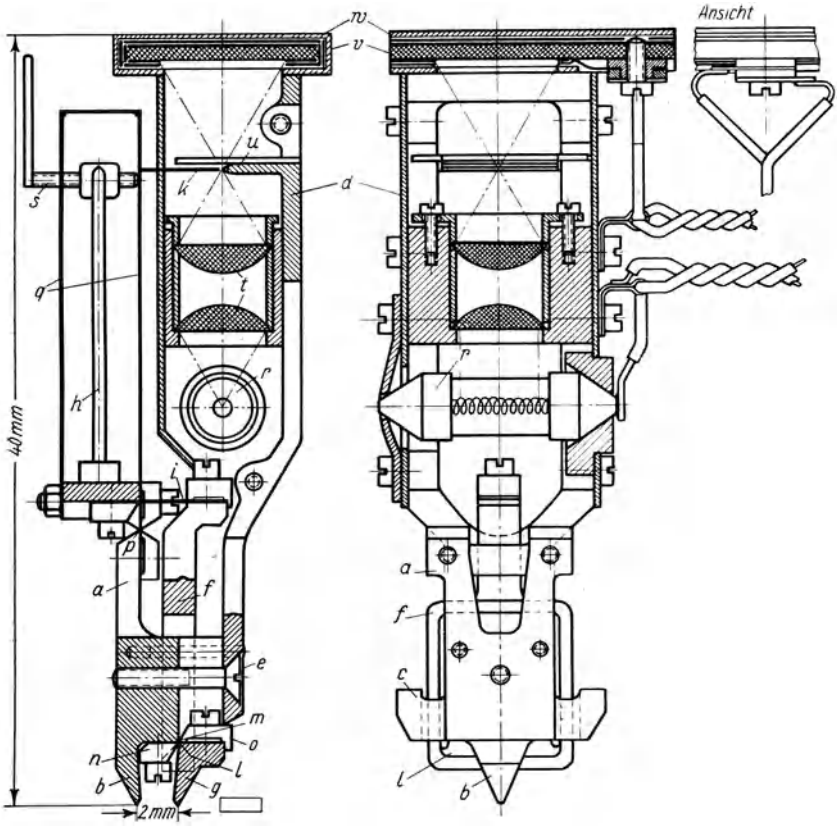


Abb. 11. Aufbau eines Dehnungsmeßgerätes mit 2 mm-Meßstrecke und Anzeige mittels Sperrschicht-Fotozelle

a = Grundgestell, *b* = feste Spitze, *c* = seitliche Schneiden für die Aufspannung, *d* = Gehäuse für die Optik, *e* = Befestigungsschraube für das Gehäuse *d*, *f* = Rähmchen, *g* = bewegliche Spitze, *h* = Anzeigehebel, *i* = Stoßband, *k* = Steuerfahne, *l* = Schneiden des Rähmchens, *m* = Querfederband für das Rähmchen, *n*, *o* = Klemmschuhe für *m*, *p* = doppeltes Federbandgelenk des Anzeigehebels *h*, *q* = Federnde Parallelführung für die Steuerfahne *k*, *r* = Lämpchen, *s* = Stellschraube der Nullpunktregelung, *t* = Kondensor, *u* = feste Fahne mit Blende, *v* = Sperrschicht-Fotozelle, *w* = Glimmerisolierung

(Aus: Forschung auf dem Gebiete des Ing.-Wesens, 7. Band, Heft 2, VDI.-Verlag G. m. b. H., Berlin)

Stärke dieses Stromes ist der Längenänderung der Meßstrecke verhältnisgleich. Voraussetzung für die Genauigkeit der Messung ist, daß der Heizstrom des Lämpchens während der Versuchsdauer keinen Schwankungen unterliegt.

Das Gerät wird in einer mit einem Doppelkörner vorgezeichneten Meßstrecke angesetzt. Zum Aufspannen dienen die beiden seitlich am Grundgestell sitzenden Schneiden *c*, in welche die Pfannen eines den Abmessungen des zu untersuchenden Werkstückes angepaßten Spannbügels aus Leichtmetall eingreifen.

2. Meßgeräte für dynamische Untersuchungen

Für „Schwellbeanspruchungen", bei denen die Kräfte zwischen praktisch gleichbleibenden Lastgrenzen während des Versuchs wirken, genügt der Spiegelapparat nach Martens in etwas abgeänderter Form, bei dem ein durch einen Lichtspalt abgeblendeter Lichtstrahl über beide Spiegel auf eine Milchglasskale geworfen wird und die Endwerte abgelesen werden können. Ist jedoch der Versuchskörper schnell wechselnden Belastungen ausgesetzt, so genügen die für statische Messungen verwendeten Geräte nicht mehr. Bei der Mehrzahl der Geräte für die Erfassung von Längenänderungen bei ungleichmäßigem Kräfteverlauf handelt es sich um „Dehnungsschreiber", die den zeitlichen Verlauf der Dehnungen einer Meßstrecke in genügend vergrößertem Maßstabe verzerrungsfrei aufzeichnen. Sie lassen sich grundsätzlich einteilen in Dehnungsschreiber für große und ihrer Bestimmung nach ruhende Bauwerke oder Maschinenteile und in Dehnungsschreiber für schnellbewegte Maschinenteile. Auf Grund ihrer Konstruktion unterscheidet man:

1. Geräte mit mechanischer Schreibvorrichtung (Tinten- oder Ritzschreiber).
2. Geräte mit optischem Schreibwerk.
3. Elektrische Geräte mit Aufzeichnung durch Oszillographen.
   a) Kapazitive Dehnungsmesser.
   b) Induktive Meßgeräte.

Von diesen Meßgeräten sei nur der mechanisch arbeitende Glasritz-Dehnungsschreiber der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt [7] erwähnt, der die Längenänderungen in natürlicher Größe mit einer Diamantspitze in eine Glastrommel ritzt, die durch einen kleinen Motor

gedreht wird. Das äußerst einfach gebaute Gerät gestattet eine ausgesprochene Langzeit-Registrierung. Die Auswertung des „Schriebes" erfolgt unter dem Meßmikroskop bei etwa 200facher Vergrößerung. Bezüglich der Bau- und Arbeitsweise der anderen Meßgeräte muß auf das einschlägige Schrifttum verwiesen werden.

D. Kraftmesser der Prüfmaschinen

Die Prüfmaschinen haben folgende Aufgaben:

1. Die erforderlichen Kräfte zu erzeugen,
2. die auf die Probe wirkenden Kräfte zu messen.

Die Kräfte sollen stoßfrei erzeugt, dazu augenblicklich und genau angezeigt werden. Entsprechend dieser Aufgabenstellung sind für Prüfmaschinen drei Teile kennzeichnend: Das äußerst kräftig gehaltene Maschinengestell, der Krafterzeuger und der Kraftmesser. Der Krafterzeuger bringt durch geeignete Vorrichtungen die für die Durchführung der Untersuchungen erforderlichen Kräfte zur Wirkung auf die Probe. Der Kraftmesser dient zur Bestimmung der jeweils auf die Probe wirkenden Kräfte. Aufgabe des Maschinengestells ist es, die vom Kraftmesser aufgenommene Kraft wieder auf die Antriebsvorrichtung zurückzuleiten. Es ergibt sich also folgender Kraftschluß: Krafterzeuger —Probe—Kraftmesser—Maschinengestell—Krafterzeuger.

Für den Krafterzeuger kann entweder ein mechanischer oder ein hydraulischer Antrieb benutzt werden. Beim mechanischen Antrieb, den man für kleinere Kräfte bevorzugt, wird zur Erzeugung der axialen Bewegung eine Schraubenspindel benutzt. Die Konstruktionsgrundsätze für den mechanischen Antrieb der Prüfmaschinen unterscheiden sich in nichts von denen des allgemeinen Maschinenbaus. Beim hydraulischen Antrieb ist mit dem Maschinengestell ein auf einer Seite offener Zylinder verbunden, in dem ein Kolben durch eine Druckflüssigkeit bewegt wird. Das eine Ende des Kolbens ragt aus dem Zylinder heraus und überträgt die von der Druckflüssigkeit ausgeübte Kraft entweder unmittelbar oder durch zwischengeschaltete Übertragungsorgane auf den Einspannkopf und damit auf die Probe. Der Kolben kann entweder durch Einschleifen oder mit Hilfe von Ledermanschetten gegen den Zylinder abgedichtet werden. Die Abdichtung mit Ledermanschetten eignet sich besonders für Druckwasserbetrieb, während man bei Verwendung von

Öl oder Glycerin als Druckflüssigkeit eingeschliffene Kolben bevorzugt. Die Erzeugung des Druckes in der Preßflüssigkeit geschieht durch Pumpen. Die auf den Probekörper ausgeübten Kräfte können mit hydraulischen Meßvorrichtungen oder mechanischen Waagen bestimmt werden. Zu den hydraulischen Meßvorrichtungen gehören:

a) Federmanometer,
b) Meßdosen,
c) Pendelmanometer.

Bei den mechanischen Waagen unterscheidet man:

a) Federwaagen,
b) Hebelwaagen,
c) Laufgewichtswaagen,
d) Neigungswaagen.

1. Hydraulische Kraftmesser

a) Federmanometer. Bei sehr großen Prüfmaschinen mit hydraulischem Antrieb durch Preßwasser wird der Flüssigkeitsdruck p im Zylinder zweckmäßig durch Federmanometer gemessen. Die auf die Probe wirkende Kraft ist dann

$$P = p \cdot f\,[\mathrm{kg}]\,^{1)},$$

wenn f der Kolbenquerschnitt des Arbeitskolbens in cm^2 ist. Infolge der Kolbenreibung und des Gewichtes der mit dem Kolben unmittelbar

---

[1]) Anmerkung des Herausgebers: Wegen der in diesem Heft benutzten Einheit der Kraft — kg — ist einiges Grundsätzliches zu sagen. Das kg ist laut Maß- und Gewichtsgesetz — die letzte Fassung wurde am 13. 5. 1935 verkündet — die Einheit der Masse und gehört zum absoluten Maßsystem. Auch international ist das kg in gleichem Sinne seit langem festgelegt worden. Dennoch ist als Einheit der Kraft im technischen Maßsystem das kg immer weiter benutzt worden. Das ist auf die Dauer ein unhaltbarer Zustand. Manche technischen und mehr noch physikalisch-technischen Zweige kommen dabei in die allergrößten Schwierigkeiten. In einer gleich schwierigen Lage ist der Unterricht sowohl in der Schule, wie in der Hochschule. Es mag sein, daß unter anderen auch die Kreise der Werkstoffprüfung diese Schwierigkeiten nicht empfinden, da sie allein mit dem technischen Maßsystem zu tun haben. Trotzdem sind die Schwierigkeiten durch den doppelsinnigen Gebrauch der Einheit kg so groß, daß sich auch die davon weniger betroffenen Kreise damit vertraut machen müssen, daß hier eine einschneidende, Eindeutigkeit schaffende Regelung getroffen werden muß. Da es un-

verbundenen Teile der Prüfmaschine geht jedoch ein Teil dieser Kraft verloren. Er läßt sich errechnen, indem man vor dem Versuch den Druck p_1 bestimmt, der bei Leergang der Maschine vom Manometer angezeigt wird. Die tatsächlich auf die Probe ausgeübte Kraft ist dann:

$$P = (p - p_1) \cdot f\,[\mathrm{kg}].$$

Eine schematische Darstellung der Kraftmessung mittels Federmanometer findet sich in Abb. 12, untere Reihe, Mitte.

---

möglich ist, die gesetzliche und internationale Regelung, wie es bisher geschah, außer acht zu lassen, muß über kurz oder lang ein vernünftiger Ausweg gefunden werden. Man könnte versucht sein, die gesetzlichen und internationalen Verabredungen umzustoßen. Damit würde aber die Angelegenheit mit so viel neuen Schwierigkeiten behaftet werden, daß dann die Aussicht auf eine sinnvolle eindeutige Regelung gänzlich geschwunden wäre. Dagegen ist der vom Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen und von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (siehe Amtsblatt der PTR **15**, 40, 1939) beschrittene Weg auf das beste geeignet, aus allen vorhandenen Schwierigkeiten mit einem Schlage auf die einfachste Weise herauszukommen. Wird als Einheit der Kraft im technischen Maßsystem das Kilopond (kp) genommen, dann gelten die gesetzliche und die internationale Regelung für das kg, im technischen Maßsystem ist nichts weiter zu tun, als statt des g ein p zu setzen; Zahlenwerte sind nicht zu ändern. Damit ist alles in vorbildlicher Eindeutigkeit; die vielen Kümmernisse, die durch den doppelten Sinn des kg entstanden, sind mit einem Schlage beseitigt.

Wenn nun davon abgesehen wurde, in diesem Heft die letzte Folgerung zu ziehen, so wird dennoch auf die Notwendigkeit, daß in diesem Punkte eine Änderung eintreten muß, mit allem Nachdruck hingewiesen. Der Vorschlag, das Zeichen kg mit einem Sternchen zu versehen, sobald es als Einheit der Kraft gelten soll, ist als eine unzureichende Lösung abzulehnen. Wenn auch in der Werkstoffprüfung, wie bereits gesagt, die Dringlichkeit für die Verwendung des kp nicht sehr hervortritt, so wird doch der Versuch empfohlen, sich auch hier mit dem kp vertraut zu machen und darüber hinaus aufmerksam zu verfolgen, wie auf anderen Gebieten eine geradezu wohltuende Eindeutigkeit erzielt wird, wenn man streng unterscheidet zwischen kg und kp.

Die oben erwähnte Verordnung der PTR enthält folgendes: Die Einheit der Kraft im technischen Maßsystem ist das Kilopond; es ist die Kraft, die einem Körper von der Masse eines Kilogramms je Sekunde eine Geschwindigkeitsänderung von 9,806 65 Meter in der Sekunde erteilt. Der tausendste Teil des Kiloponds ist das Pond; der tausendste Teil des Ponds das Millipond. Tausend Kiloponds heißen ein Megapond (diese Größe ist zu setzen für die Einheit Tonne als Einheit der Kraft; denn auch die Tonne ist eine Masseneinheit im absoluten Maßsystem).

Abkürzung: Megapond = Mp; Kilopond = kp; Pond = p; Millipond = mp.

b) Meßdosen. Eine andere Form der hydraulischen Kraftmessung stellt die Verwendung der sogenannten Meßdose dar, siehe Abb. 12, obere Reihe, zweites Bild von links. Die Meßdose besteht aus einem zylindrischen Gehäuse aus Stahl, in dem eine Messingblech- oder Gummimembran ausgespannt ist, unter der sich Wasser oder Glyzerin befindet. Auf der Membran ruht der Dosendeckel. Auf diesen Deckel

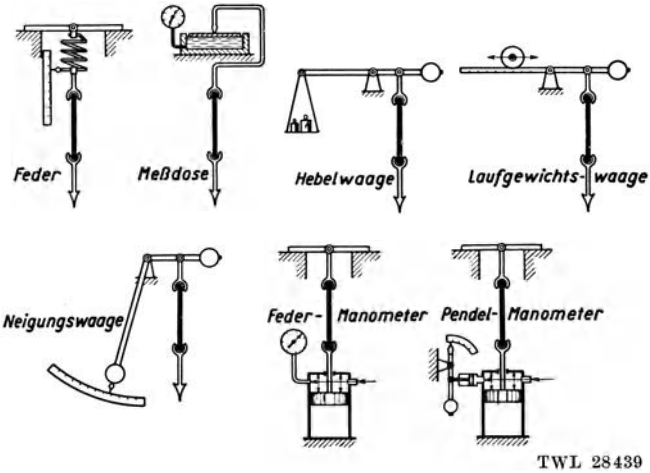


Abb. 12.
Schematische Darstellung der verschiedenen Arten der Kraftmessung an Materialprüfmaschinen

wird die vom Probekörper aufgenommene Kraft übertragen. Durch den auf den Dosendeckel ausgeübten Druck biegt sich die elastische Platte durch und in der allseitig eingeschlossenen Dosenflüssigkeit wird ein Druck erzeugt, der an einem Manometer abgelesen werden kann. Die auf die Probe ausgeübte Kraft ergibt sich dann mit großer Genauigkeit aus der Fläche des Meßdosendeckels und dem Flüssigkeitsdruck in der Meßdose.

c) Pendelmanometer. Pendelmanometer sind Vorrichtungen, die dazu dienen, Flüssigkeitsdrücke durch den Ausschlag eines Pendels zu messen. Grundsätzlich stellen sie Neigungswaagen dar, die durch Bewegung eines Kolbens — des sogenannten Meßkolbens — betätigt werden. Der Arbeitszylinder der Prüfmaschine ist mit dem Meßzylinder des Pendelmanometers durch Rohrleitungen verbunden, so daß auf den Meßkolben der gleiche Flüssigkeitsdruck wirkt wie auf den

Arbeitskolben. In Abb. 12, rechts unten, ist das Grundsätzliche eines Pendelmanometers dargestellt. Pendelmanometer finden im allgemeinen Anwendung bei Prüfmaschinen, bei denen sowohl der Arbeitskolben als

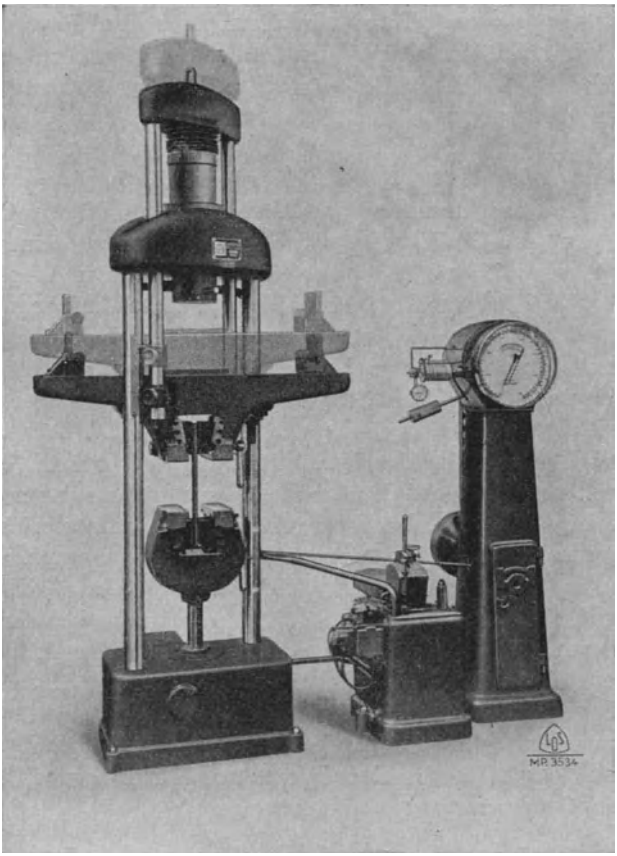


Abb. 13.
Universalprüfmaschine mit Pendelmanometer für 35 t Höchstleistung
(Bauart Losenhausen)

auch der Meßkolben gehärtet und sorgfältig in die Zylinder eingeschliffen sind und die mit Öldruck arbeiten. Um die Kolbenreibung im Meßzylinder aufzuheben, wird der Meßkolben durch einen Motor um seine Achse gedreht. Das kugelgelagerte Pendel überträgt seinen Ausschlag

mittels einer auf Rollen geführten Zahnstange und Trieb auf den Zeiger der Anzeigevorrichtung. In der Regel hat das Pendelmanometer drei Meßbereiche, und zwar für Vollast, Halblast und Fünftellast. Der Meßbereich wird durch Austauschen der Pendelgewichte verändert.

Abb. 13 zeigt eine Universalprüfmaschine der Bauart „Losenhausen" für 35 t Höchstleistung. Die Anlage setzt sich zusammen aus der eigentlichen Prüfmaschine mit hydraulischem Antrieb, aus einer Hochleistungspumpe und einem Pendelmanometer.

Die Prüfmaschine baut sich auf aus dem Grundkasten, den beiden außenliegenden Drucksäulen und einem festen Querhaupt, das den Arbeitszylinder mit dem eingeschliffenen Kolben trägt. An diesem Kolben hängt ein Umführungsrahmen, bestehend aus einem oberen Querhaupt, zwei Zugsäulen (innenliegend) und einem Biegetisch, an dem der obere Einspannkopf befestigt ist. Der Umführungsrahmen wird durch den Kolben nach oben bewegt und überträgt die ausgeübte Zugkraft auf den oberen Spannkopf. Als Preßflüssigkeit kommt Öl zur Verwendung, das durch die elektrisch betriebene stufenlose Preßpumpe dem oben liegenden Arbeitszylinder zugeführt wird. Der Arbeitszylinder ist mit dem Meßzylinder durch Rohrleitungen verbunden. Die durch den Öldruck auf die Fläche des Arbeitskolbens und damit auf die Probe ausgeübte Kraft kann daher laufend an der Anzeigevorrichtung des Pendelmanometers abgelesen werden. Der untere Spannkopf ist mit dem Grundkasten fest verbunden und durch eine Spindel in der Höhenlage verstellbar. Die Vorrichtung für Biegeversuche besteht aus dem in Rollenlagern an den Maschinensäulen reibungsfrei geführten Biegetisch. Für Faltversuche lassen sich die beiden Auflager des Biegetisches auf den vorgeschriebenen Abstand einstellen und können gegen seitliches Ausweichen durch Keile gesichert werden. Für Druck- und Knickversuche wird je eine Druckplatte auf dem Biegetisch und unter dem festen Querhaupt angebracht.

2. Mechanische Kraftmesser

a) Federwaage. Abb. 12, obere Reihe links, zeigt das Grundsätzliche der Kraftmessung mit der Federwaage. Der Vorzug einer Federwaage als Kraftmesser liegt in der Einfachheit der Bauform. Die elastische Formänderung einer Schraubenfeder dient als Kräftemaßstab. Da einerseits zur genauen Messung verhältnismäßig große Formänderungen erforderlich sind, andererseits die Formänderungen bis zur

Höchstlast rein elastisch sein müssen, findet die Federwaage nur bei kleineren Prüfmaschinen Anwendung. Besondere Sorgfalt ist bei Spiralfedern auf die Aufhängevorrichtungen zu verwenden. Die Feder muß allseitig beweglich sein, damit sie sich frei ausdehnen bzw. verkürzen kann.

b) Hebelwaage. Die Kraftmessung mit der Hebelwaage ist in Abb. 12, drittes Bild von links, schematisch dargestellt. Kennzeichnend für die Hebelwaage ist, daß die Hebelübersetzung unverändert bleibt, während die Gewichte zur Lastbestimmung verändert werden. Infolge des notwendigen Aufsetzens und Abhebens der Gewichte ist die Bedienung umständlich. Zur Umgehung dieser Unbequemlichkeit werden vielfach die Gewichtsscheiben mechanisch aufgesetzt und abgehoben. Eine derartige Vorrichtung hat außerdem den Vorteil, daß mit ihr die Gewichte stoßfrei aufgesetzt und dadurch Erschütterungen des Probestabs vermieden werden. Zur Erzielung feinerer Abstufungen muß jedoch auch hier mit kleinen Aufsatzgewichten gearbeitet werden.

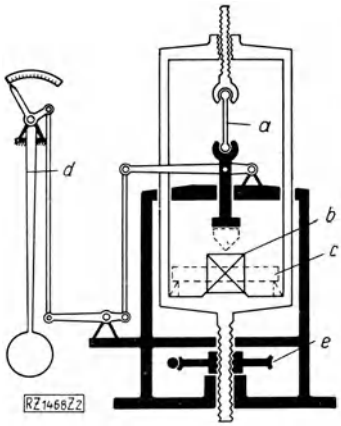


Abb. 14. Schematische Darstellung der Hebelanordnung einer Universalprüfmaschine mit Neigungswaage und mechanischem Antrieb (Bauart Mohr & Federhaff)

(Aus: VDI-Zeitschrift, Bd. 72, 1928, VDI-Verlag G. m. b. H., Berlin)

c) Laufgewichtswaage. Die Laufgewichtswaage (s. Abb. 12, oben rechts) arbeitet bei veränderlicher Hebelübersetzung mit gleichbleibendem Belastungsgewicht. Auch die Laufgewichtswaage ermöglicht große Genauigkeit der Messung bei langsamer Versuchsausführung; jedoch erfordert bei laufender Kraftmessung das ständige Nachstellen des Laufgewichts zur Erhaltung der Gleichgewichtslage des Hebels eine gewisse Übung.

d) Neigungswaage. Die Neigungswaage (s. Abb. 12, unten links) mißt in der Art der Briefwaage die Größe der am kurzen Hebelarm angreifenden Stabkraft durch die Neigung eines Hebels bzw. eines Pendels. Sie wird unter den mechanischen Kraftmessern im Prüfmaschinenbau besonders deshalb bevorzugt, weil mit ihr bei allmählich steigender Belastung die auf den Probestab zur Wirkung

kommende Kraft laufend gemessen werden kann. Die Bestimmung kennzeichnender Spannungsgrenzen ist auf diese Art besonders einfach. Die konstruktive Durchbildung der Neigungswaage ist jedoch nicht einfach, da bei Verwendung nur eines Hebels sehr hohe Beanspruchungen in den Lagerstellen auftreten. Man ist daher besonders bei größeren Prüfmaschinen gezwungen, zu Bauarten mit mehreren Hebeln und dementsprechend einer Vielzahl von Schneiden und Pfannen überzugehen.

In Abb. 14 ist die Hebelanordnung der Neigungswaage einer Universalprüfmaschine mit elektrischem Antrieb schematisch dargestellt. Durch die Antriebsvorrichtung wird ein Biegetisch — als Auflager für Druck- und Biegeproben — und mit ihm der in einem Umführungsrahmen sitzende obere Einspannkopf für die Aufnahme der Probestäbe bei Zugversuchen gehoben. Sowohl beim Zug- als auch beim Druckversuch wird die vom Versuchsstück aufgenommene Kraft auf das Hebelsystem und von hier durch Zugstange und Hebel auf das von der Maschine getrennt stehende Pendel übertragen, dessen Ausschlag das Maß für die Belastung ist. Das Pendel wirkt durch Zahnstange und Zahnrad auf den Zeiger der Lastanzeige, an deren Skale die jeweils auf die Probe zur Wirkung kommende Kraft laufend abgelesen werden kann.

E. Meßgeräte zur Prüfung der Kraftanzeige

Werkstoffprüfmaschinen, die für maßgebliche Versuche benutzt werden, sind nach DIN 1604 (Richtlinien für die Überwachung von Werkstoffprüfmaschinen) in gewissen Zeitabständen Hauptuntersuchungen bzw. Zwischenprüfungen zu unterziehen. Die Untersuchung erstreckt sich auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit der Belastungsmessung. Nach DIN 1604 bedeutet „Genauigkeit" den Grad der Übereinstimmung zwischen der mit dem Nachprüfgerät festgestellten und der vom Belastungsmesser der Prüfmaschine angezeigten Kraft. Als „Fehler der Belastungsanzeige" wird die Abweichung von der Übereinstimmung in % der betreffenden Belastung bezeichnet.

Zulässig sind in der Metallprüfung Fehlergrenzen der Belastungsanzeige von $\pm 1\,\%$. Als „Zuverlässigkeit" wird die Unveränderlichkeit der Genauigkeit bei aufeinanderfolgenden Untersuchungen bezeichnet. Zur Erfassung der „Empfindlichkeit" wird festgestellt, wie bei Zu- und

Abnahme der Belastung die Belastungsanzeige den am Versuchsstück gemessenen Belastungsänderungen folgt.

Grundsätzlich könnte bei der Prüfung der Kraftanzeige so vorgegangen werden, daß der Fehler des Belastungsmessers durch unmittelbare Gewichtsbelastung bestimmt wird. Bei größeren Prüfmaschinen wären Übersetzungshebel einzubauen, d. h. durch mittelbare Gewichtsbelastung zu prüfen. Diese Verfahren haben jedoch den Nachteil, daß bei der Prüfung nicht der gleiche Kraftschluß vorhanden ist wie beim Versuch und somit Fehler, die durch den starren Einbau der Proben bedingt sind, nicht erfaßt würden. Es wurden daher Nachprüfgeräte entwickelt, die mit Hilfe der an der Prüfmaschine vorhandenen Einspannvorrichtungen eingebaut werden [8].

1. Kontrollstäbe und -druckkörper

Kontrollstäbe und Kontrolldruckkörper sind Rundstäbe bzw. Zylinder aus hochwertigem Stahl (Zugfestigkeit 120 kg/mm^2, Elastizitätsgrenze 70 kg/mm^2), die bei der Prüfung bis etwa 35 kg/mm^2 beansprucht werden. Ihre elastischen Formänderungen werden als Maß für die auf sie wirkenden Kräfte benutzt. Sie stellen also Federdynamometer mit sehr geringer aber gleichbleibender Federung dar, deren elastische Formänderungen mit dem Spiegelfeinmeßgerät von Martens gemessen werden. Sind die Formänderungswerte für bestimmte Belastungen bekannt (Sollwerte), so ergibt sich aus dem Vergleich der bei einer Maschinenprüfung festgestellten Formänderungswerte mit den Sollwerten unmittelbar der Fehler der Belastungsanzeige. Die Sollwerte der Kontrollgeräte werden durch Prüfung auf Maschinen mit unmittelbarer Gewichtsbelastung bzw. auf Sonder-Prüfmaschinen nach einem genau festliegenden Versuchsschema bestimmt. Der Sitz der Meßfederschneiden wird am Kontrollstab durch eine Ringmarke gekennzeichnet, die so angeordnet ist, daß die Meßfedern symmetrisch zur Stabmitte sitzen. Zwei Paar einander gegenüberliegende und parallele Längsmarken kennzeichnen den Sitz der Meßfedern am Stabumfang. Die Spiegelapparate werden so angesetzt, daß ihre Schneiden unter der halben Höchstbelastung senkrecht zum Stab stehen. Um Zufälligkeiten auszuschalten, werden gewöhnlich vier bis sechs Reihen bei verschiedenen Stablagen und verändertem Sitz des Spiegelfeinmeßgerätes durchgeführt. Abb. 15 zeigt einen 100 t-Kontroll-Zugstab, eingebaut in eine Sonder-Prüfmaschine zur Unter-

suchung von Kontrollgeräten für 300 t Zug. Bei dieser Sonder-Prüfmaschine werden die auf die Kontrollgeräte wirkenden Kräfte hydrau-

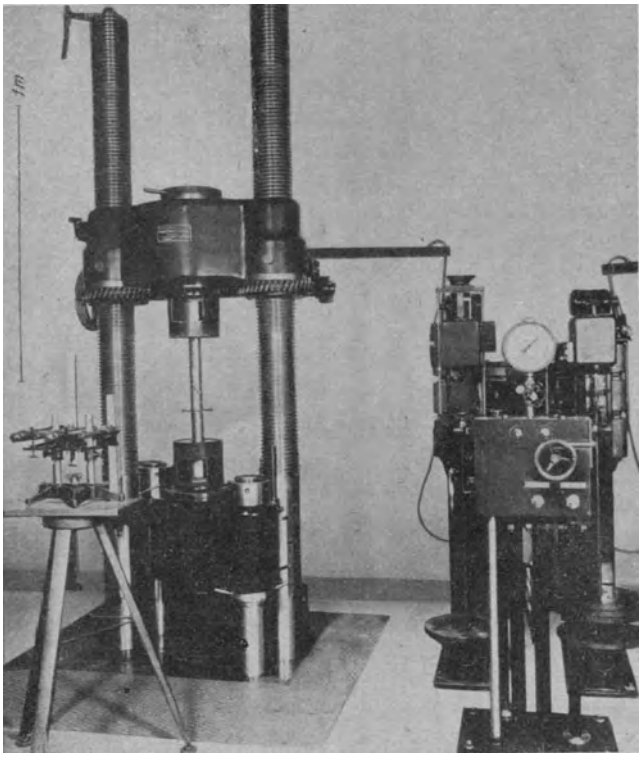


Abb. 15. Sonder-Prüfmaschine zur Untersuchung von Kontrollgeräten für 300 t Zug. Eingebaut ein 100 t-Kontroll-Zugstab

lisch übersetzt und in zwei Druckwaagen mit unmittelbarer Gewichtsbelastung gemessen.

2. Federkraftprüfer

Insbesondere für kleinere Kräfte werden Federkraftprüfer verwendet, das sind Stahlkörper, die ringförmige, flachelliptische, rhombische oder U-Form haben und bei denen die durch die Kräfte hervorgerufenen elastischen Formänderungen durch hebelübersetzte Meßuhren oder mit dem Spiegelfeinmeßgerät von Martens gemessen werden.

Abb. 16 stellt einen von der Abteilung Meßwesen des Staatlichen Materialprüfungsamtes, Berlin-Dahlem, entwickelten Kontroll-Zugbügel für 4 t Höchstlast mit angesetzten Spiegelapparaten und den zugehörigen Einspannteilen dar. Die elastischen Formänderungen der Bügel sind mit 0,5 bis 0,7 mm — d. h. 5000 bis 7000 Ablese-

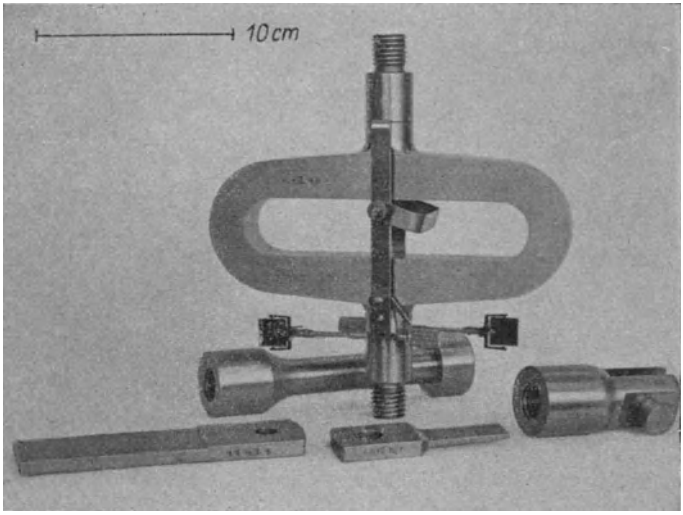


Abb. 16. Kontroll-Zugbügel für 4 t Höchstlast (Bauart Staatliches Materialprüfungsamt. Berlin-Dahlem)

einheiten bei Verwendung des Spiegelfeinmeßgerätes von Martens mit normalem Übersetzungsverhältnis — so groß, daß unvermeidliche Beobachtungsfehler keinen störenden Einfluß auf das Endergebnis haben.

3. Kraftprüfer mit Quecksilberfüllung

Die bekanntesten Kraftprüfer dieser Art sind der Platten-Kraftprüfer und der Hohlkörper-Kraftprüfer. In beiden Kraftprüfern ist ähnlich wie bei den Meßdosen in einem Stahlkörper ein flacher zylindrischer Hohlraum ausgespart, der mit Quecksilber gefüllt ist und mit einem Meßgefäß in Verbindung steht.

Beim Platten-Kraftprüfer werden zwei kreisrunde Biegungsplatten, die den Hohlraum einschließen, durch einen Kranz von Schrauben fest verbunden. Der Hohlraum des Hohlkörper-Kraftprüfers wird durch

Ausdrehen aus dem Vollen auf die erforderliche Form gebracht und durch ein Einsatzstück fest verschlossen. Abb. 17 zeigt einen Hohlkörper-Kraftprüfer mit Meßgefäß der Bauart Wazau. Die Wirkungsweise des Kraftprüfers ist folgende: Der Hohlraum steht mit einem kleinen Zylinder des Meßgefäßes in Verbindung. Im unteren Teil des Zylinders befindet sich ein Kolben, der mittels einer Meßschraube (Schraublehren-

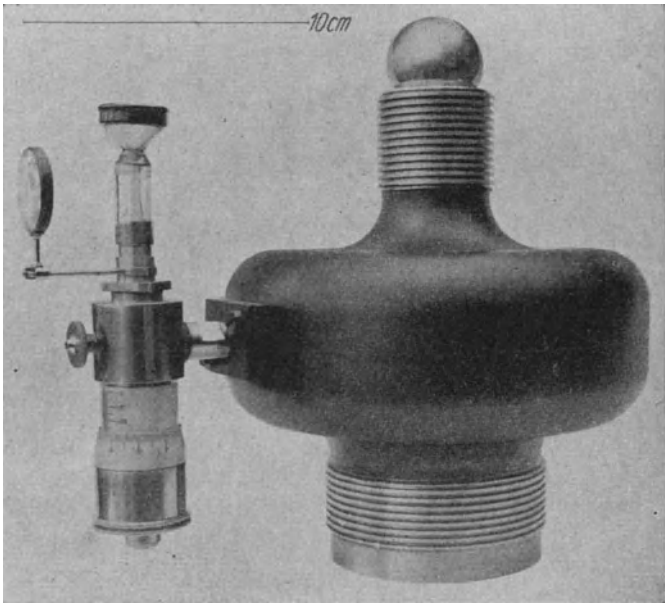


Abb. 17. 20 t-Zug- und Druck-Kraftprüfer mit Quecksilberfüllung (Bauart Wazau)

Bauart) verschiebbar ist; das Oberteil trägt ein mit Strichmarke versehenes Kapillarrohr. Vor Belastung des Kraftprüfers wird der Stand der Quecksilberkuppe mit der Meßschraube auf die Strichmarke des Kapillarrohres eingestellt. Bei Zugbeanspruchung vergrößert sich der Hohlraum des Kraftprüfers und das Quecksilber fällt im Kapillarrohr; bei Druckbeanspruchung steigt das Quecksilber. Durch Drehen der Meßschraube wird der Kolben so lange im Zylinder bewegt, bis die Kuppe der Quecksilbersäule in der Kapillare wieder in Höhe der Strichmarke steht. Der Kolbenweg dient als Maß für die Größe der Belastung und kann an der Meßtrommel abgelesen werden.

III. Prüfverfahren[1])

A. Festigkeitsprüfung bei ruhender Beanspruchung

Von den meisten Konstruktionsteilen verlangt man, daß sie sich wie starre Körper verhalten, d. h. sie dürfen unter Einwirkung äußerer Kräfte ihre Form nicht ändern. Aus der Physik ist bekannt, daß es vollkommen feste Körper nicht gibt. Unter einem festen Körper versteht man daher einen Stoff, der seine äußere Form nicht von selbst oder unter der Wirkung der Schwerkraft aufgibt, sondern der auch jedem Versuch, seine äußere Form gewaltsam zu ändern, einen Widerstand entgegensetzt. Diese Eigenschaft eines Stoffes, die beim Walzen, Schmieden, Ziehen usw. deutlich in Erscheinung tritt, wird als „Verformungswiderstand" bezeichnet. Das „Formänderungsvermögen" kennzeichnet die Eigenschaft der Werkstoffe, unter einer äußeren Krafteinwirkung ihre Form vorübergehend (elastisch) oder bleibend (plastisch) zu ändern. Die Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Verformungswiderstand und Verformungen (bis zur Zerstörung des Stoffzusammenhanges) ist Gegenstand der statischen Festigkeitsprüfung. Je nach der Art der angreifenden Kräfte und der auftretenden Formänderungen werden unterschieden: Zug-, Druck-, Biege- Verdreh- und Scherversuche. Damit die gewonnenen Ergebnisse vergleichbar sind, wurden für die Ausführung der Versuche und die zu verwendenden Probenformen Normen geschaffen. Aus dem gleichen Grunde wurden auch nur mechanisch einfache Beanspruchungen gewählt und bei diesen das Verhalten der Werkstoffe beobachtet. Um schnelle Vergleichsmöglichkeiten zu schaffen, werden die Kräfte als Spannungen auf die Flächeneinheit des beanspruchten Querschnittes, die Formänderungen als spezifische Verformungen auf die Längen- bzw. Querschnittseinheit bezogen. Aus Gründen der Anschaulichkeit wird die Abhängigkeit zwischen äußeren Kräften und Formänderungen in Kraft-Verformungsschaubildern dargestellt.

---

[1]) Schrifttum s. [9, 10, 11, 13, 16, 17, 19, 22, 23, 27, 28].

1. Der Zugversuch[1])

Wird ein stabförmiger Körper von der Querschnittsfläche F_0 in Längsrichtung wirkenden Kräften ausgesetzt, die ihn zu verlängern streben, so erfährt er eine Zugbeanspruchung. Unter der Voraussetzung, daß die Kraft P genau in der Stabachse wirkt und sich gleichmäßig über die Querschnittsfläche F_0 verteilt, erfährt jede Flächeneinheit eine ganz bestimmte Beanspruchung, die Spannung:

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \, [\mathrm{kg/mm^2}].$$

(Der Berechnung von Spannungen wird in der Werkstoffprüfung grundsätzlich der ursprüngliche Querschnitt zugrunde gelegt.) Unter der Belastung, die durch die Kraft P bervorgerufen wird, tritt eine Formänderung des Stabes ein. Diese äußert sich in einer Verlängerung und einer Querschnittsverminderung. Die ursprüngliche Länge l_0 des Stabes geht in die Länge l, der ursprüngliche Querschnitt F_0 in den Querschnitt F über. Demnach ist die Längenänderung

$$\Delta l = l - l_0.$$

Das Verhältnis der Längenänderung Δl zur ursprünglichen Meßlänge l_0 bezeichnet man als Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}.$$

Da sowohl Δl als auch l_0 in Längeneinheiten gemessen werden, ist ε eine dimensionslose Zahl. In der Praxis wird meistens nur die sogenannte Bruchdehnung δ bestimmt. Es ist dies die beim Zugversuch nach dem Bruch gemessene bleibende Dehnung

$$\delta \text{ in } \% = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

wobei l die Meßlänge der Probe nach dem Bruch ist. Setzt man $\frac{l - l_0}{l_0} = \varepsilon$, so ergibt sich $\delta = 100 \cdot \varepsilon$; da in der Dehnung vor dem Bruch jedoch stets noch ein Teil der Formänderung elastisch ist, ist die Bruchdehnung δ in der Regel kleiner.

Die Querschnittsänderung ist:

$$\Delta F = F_0 - F.$$

---

[1]) [20].

Auch die Querschnittsänderung pflegt man im allgemeinen nach dem Bruch des Stabes zu messen und in Prozent, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt F_0, anzugeben. Es ist dann die Bruchquerschnittsverminderung

$$\psi \text{ in } \% = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100,$$

wobei F der Bruchquerschnitt ist.

Kennzeichnend für den Zugversuch ist, daß er in jedem Fall bis zum Bruch des Probestabes durchgeführt werden kann und daher stets zahlenmäßige Angaben eines Festigkeitswertes und Kennziffern für das Formänderungsvermögen liefert. Diese Tatsache in Verbindung mit der verhältnismäßig einfachen und zuverlässigen Bestimmung der Kennziffern sichern ihm eine überragende Bedeutung unter den Festigkeitsprüfungen, obwohl die Kennziffern des Zugversuchs ebenso wie die der anderen Festigkeitsprüfungen nur einen Gütemaßstab darstellen und keine sichere Beurteilung des Betriebsverhaltens der Werkstoffe zulassen. Denn die meisten Brüche treten infolge von langdauernden ruhenden oder schwingenden Beanspruchungen ein, die weit unterhalb der Fließgrenze der verwendeten Werkstoffe liegen. Für die laufende Erzeugung ist der Zugversuch jedoch ein bewährtes Mittel, um die Gleichmäßigkeit der verschiedenen Lieferungen eines Werkstoffs festzustellen.

Das Verhalten metallischer Werkstoffe beim Zugversuch wird am anschaulichsten dargestellt durch die Zerreißschaubilder. Trägt man die während eines Zugversuchs laufend gemessene Längenänderung Δl in Abhängigkeit von der jeweils auf den Probestab wirkenden Zugkraft P auf, so erhält man das Kraft-Verlängerungsschaubild. Bezieht man die Längenänderung auf die ursprüngliche Meßlänge l_0 und die Kräfte auf den Ausgangsquerschnitt F_0 des Probestabes, so ergibt sich das Spannungs-Dehnungsschaubild. Abb. 18 zeigt vier kennzeichnende Ausbildungsformen von Zerreißschaubildern. Bei spröden Werkstoffen (Gußeisen, gehärteten Stählen) tritt schon nach geringen Verformungen der Bruch ein (Abb. 18a). Bei zähen Werkstoffen (Abb. 18b und 18c) wird nach Erreichen einer bestimmten Spannungsgrenze die Dehnungszunahme für gleiche Spannungsbeträge immer größer, bis schließlich das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erschöpft ist und der Probestab reißt. Der Bruch kann entweder im ansteigenden Ast der Schaulinie erfolgen, d. h. die Spannung steigt stetig bis zum Bruch an

(Gußmessing), oder sie erreicht einen Höchstwert und sinkt bei zunehmender Dehnung des Probestabes wieder zu kleineren Werten ab (Aluminium, Blei, hochlegierte und vergütete Stähle). Den eingehenden Betrachtungen sei eine Sonderform des Spannungs-Dehnungsschaubildes (Abb. 18d), wie sie häufig für weichere Stahlsorten beobachtet wird, zugrunde gelegt:

Im ersten Versuchsabschnitt können die Spannungen stetig gesteigert werden, ohne daß größere Formänderungen auftreten. Die Linie der Dehnungen ε als Funktion der Spannungen σ verläuft gerade, unter einem kleinen Winkel zur Ordinate. Gleichen Spannungsstufen entsprechen gleichgroße Dehnungszunahmen, es besteht Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung. Diejenige Spannung, bei der

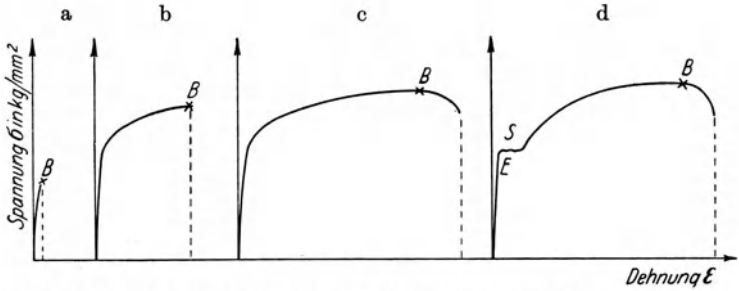


Abb. 18. Kennzeichnende Ausbildungsformen der Spannungs-Dehnungsschaubilder

die Dehnung aufhört proportional der Spannung zuzunehmen, wird als Proportionalitätsgrenze σ_P bezeichnet. Danach beginnt die Kurve sich schwach zu krümmen, die Formänderungen nehmen schneller zu als die Spannungen, die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung hat aufgehört. Im Punkte S geht die Schaulinie in eine Parallele zur horizontalen Achse über. Es bedeutet dies großes, oft plötzliches Anwachsen der Dehnungen ohne Spannungserhöhung, man sagt, das Material „fließt". Die Fließgrenze oder Streckgrenze σ_S ist also die Spannung, bei der trotz zunehmender Formänderung die Kraftanzeige der Prüfmaschine erstmalig unverändert bleibt oder zurückgeht. Bei Rundstäben aus weichem Stahl kann dieser Abfall ganz erheblich sein.

Eine scharf ausgeprägte Streckgrenze findet sich jedoch nur beim Stahl, und auch hier fehlt sie bei hochgekohlten oder legierten Stahlsorten. Die Nicht-Eisenschwermetalle und Leichtmetalle haben keine

ausgeprägte Streckgrenze. Da man aber auch für die obengenannten Werkstoffe eine kennzeichnende, vergleichbare Spannungsgrenze, ähnlich der Streckgrenze anzugeben wünscht, wurde die 0,2-Dehngrenze eingeführt. Nach DIN 1602 ist die 0,2-Grenze die Spannung, bei der die bleibende Verlängerung, d. h. die Verlängerung nach Entlastung des Probestabes, 0,2 % der ursprünglichen Meßlänge l_0 beträgt. Bei einer Meßlänge von 100 mm würde die 0,2-Grenze also die Spannung sein, bei der nach Entlastung 0,2 mm bleibende Verlängerung gemessen werden.

Nach Beendigung des Fließens steigt die Kurve allmählich wieder bis zu ihrem Höchstlastpunkt bei B, der Werkstoff erfährt also nach Aufhören des Fließens bei starker Dehnung wieder Spannungssteigerung. Die zum Punkt B gehörende Spannung σ_B wird als Zugfestigkeit bezeichnet. Die Zugfestigkeit ist also der Quotient aus der von der Zugprüfmaschine angezeigten höchsten Last P_{max} und dem Anfangsquerschnitt F_0 des Stabes

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}.$$

Bis etwa zu dieser Spannung ist die Dehnung auf Grund einer gleichmäßig über den Stab verteilten Querschnittsabnahme entstanden. Hiernach tritt von der zufällig schwächsten Stelle ausgehend eine örtliche Einschnürung ein, die so weit fortschreitet, bis der Verformungswiderstand des Werkstoffes überwunden ist und der Stab zerreißt. Das Schaubild läßt Zunahme der Dehnung trotz Spannungsabfall erkennen.

Wie wenig dieses praktische Schaubild, dessen Spannungen auf den ursprünglichen Probenquerschnitt bezogen sind, die wahren Spannungsverhältnisse im Probenstab wiedergibt, zeigt sich, wenn man die Belastungen auf den jeweiligen Querschnitt bezieht. Besonders groß wird der Unterschied nach Überschreiten der Höchstlast. Während das übliche Spannungs-Dehnungsschaubild eine Spannungsabnahme zeigt, ergibt sich aus der „wahren" Zugkurve, daß auch in diesem Bereich die Spannung im Werkstoff wächst. Aber auch die „wahren" Spannungen geben noch kein einwandfreies Bild der tatsächlichen Spannungsverhältnisse im Probenstab. Besonders nach Ausbildung der örtlichen Einschnürung, wo kein einachsiger Spannungszustand mehr vorliegt und auch keine gleichmäßige Verteilung der Normalspannungen vorhanden sein dürfte, läßt auch die „wahre" Spannung nicht ohne

weiteres ein Urteil über den tatsächlich vorhandenen Verformungswiderstand des Werkstoffs zu. Man sieht daher in der Praxis von der Bestimmung der „wahren" Spannungen ab und begnügt sich mit der Feststellung der Zugfestigkeit. Bei örtlich einschnürenden Stoffen kann die Zugfestigkeit als Maßstab für den mittleren Verformungswiderstand dienen. Dagegen hat bei Stoffen, die ohne örtliche Einschnürung reißen, die Zugfestigkeit die Bedeutung des Trennungswiderstandes. Als Berechnungsgrundlage für Konstruktionen dient bei rein statischer Beanspruchung die Streckgrenze bzw. 0,2-Grenze unter Hinzunahme eines Sicherheitsfaktors, da bei Beanspruchung oberhalb der Streckgrenze die Formänderung einen unzulässig hohen Betrag annimmt. Bruchdehnungs- und Bruchquerschnittsverminderung bilden beim praktischen Zugversuch das Maß für das Formänderungsvermögen des Werkstoffes. Für den Konstrukteur ist das Formänderungsvermögen insofern von Bedeutung, als Werkstoffe mit gutem Formänderungsvermögen eine gewisse Gewähr gegen Zerstörung und Rißbildung bei örtlichen Überbeanspruchungen bieten.

Die Spannung im Punkte E des Schaubildes kennzeichnet die sogenannte Elastizitätsgrenze des Werkstoffes. Sie fällt praktisch mit der Proportionalitätsgrenze zusammen. Da es vollkommen elastische ebensowenig wie vollkommen starre Körper gibt, gilt zur Zeit als Elastizitätsgrenze die Spannung, bei der nach Entlastung die bleibende Dehnung je nach Vereinbarung 0,003 bis 0,01 % der ursprünglichen Meßlänge l_0 beträgt, d. h. praktisch gleich Null ist. Oberhalb der E-Grenze setzt sich die am belasteten Probestab gemessene Gesamtdehnung aus einem elastischen Anteil, dessen Größe bei verschiedenen Spannungen an der verlängerten Proportionalitätsgeraden abgegriffen werden kann, und dem ständig zunehmenden plastischen Anteil zusammen.

Bis zur Proportionalitätsgrenze ist das Verhältnis

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

konstant. Die Zahl E nennt man den Elastizitätsmodul des Materials. E gibt die Belastung bezogen auf die Einheit des Querschnitts an, unter der ein Stab seine Länge verdoppeln würde, vorausgesetzt, daß der Werkstoff bis zu dieser Belastung vollkommen elastisch wäre. Für Flußstahl beträgt der E-Modul ungefähr 21000 kg/mm². Der Kehrwert des E-Moduls ist die Dehnzahl α.

Bis zur Proportionalitätsgrenze gelten ferner folgende aus der Festigkeitslehre bekannten Beziehungen:

$$\alpha = \frac{1}{E} = \frac{\varepsilon}{\sigma}.$$

Es ist also die Dehnung $\varepsilon = \alpha \cdot \sigma$. Diese Beziehung zwischen Dehnung und Spannung wird als Hookesches Gesetz bezeichnet. Da

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

ist

$$\Delta l = \alpha \cdot \sigma \cdot l_0,$$

d. h. die Verlängerung ist proportional der Spannung, der Dehnzahl und der Länge der Meßstrecke. Mit Hilfe dieser Beziehung werden in der

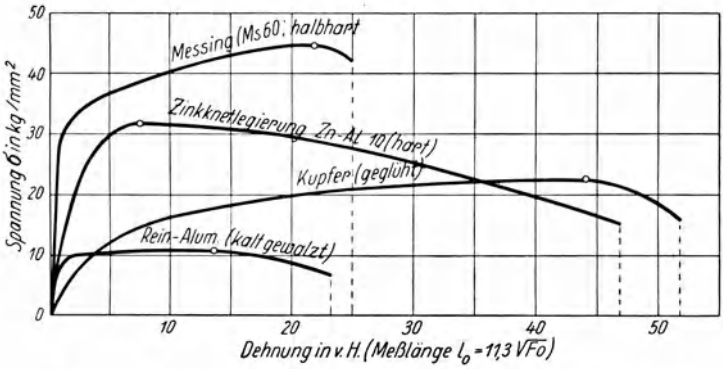


Abb. 19. Spannungs-Dehnungsschaubilder verschiedener Metalle

Praxis die Spannungsmessungen an Maschinenteilen aller Art durchgeführt, soweit die auftretenden Spannungen innerhalb des elastischen Bereichs liegen [15].

Die Spannungs-Dehnungsschaubilder verschiedener Metalle, sowie die gleicher Metalle mit verschiedener Vorbehandlung, unterscheiden sich sowohl durch die Lage des Höchstlastpunktes, die Gesamtdehnung und den allgemeinen Verlauf der Schaulinien, s. Abb. 19. Kennzeichnend für die Schaubilder der meisten Nichteisenschwermetalle und Leichtmetalle ist das verhältnismäßig schnelle Anwachsen der Dehnung bei Erhöhung der Spannung. Dadurch sind ein kleiner Elastizitätsmodul und eine niedrige Elastizitätsgrenze bedingt.

Das Spannungs-Dehnungsschaubild läßt außer der Beurteilung der während der einzelnen Versuchsabschnitte auftretenden Längenänderungen auch Rückschlüsse auf das Arbeitsvermögen der zu prüfenden Werkstoffe zu. Auf der Abszisse des Spannungs-Dehnungsschaubildes wurde die auf die Flächeneinheit ausgeübte Kraft aufgetragen. Die auf der Ordinate eingezeichnete Dehnung stellt lineare Bewegungen der Längeneinheit, also Wege dar. Das Produkt aus Kraft und Weg ist Arbeit. Beim Zugversuch ist es die Arbeit, welche aufgewendet werden muß, um die Formänderungen zu erzeugen, die schließlich zum Bruch des Stabes führen. Die vom Schaubild umschlossene Fläche ist also ein Maß für die Arbeit, die die Raumeinheit des Werkstoffes der Formänderung entgegenzusetzen vermag. Man bezeichnet diese Arbeit als Arbeitsvermögen. Der Flächeninhalt des Spannungs-Dehnungsschaubildes läßt sich durch Ausmessen mit dem Planimeter oder mit Hilfe von Näherungsverfahren (Aufteilen in Rechtecke) bestimmen. Die Dimension für das Arbeitsvermögen ergibt sich aus den Dimensionen für die Arbeit (kgmm) und den Rauminhalt (mm^3) zu $kgmm/mm^3$.

Die Kennziffern des normalen Zugversuchs (Streckgrenze bzw. 0,2-Grenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Bruchquerschnittsverminderung) werden an Probestäben bestimmt, da es nur in Ausnahmefällen (Betoneisen, Drähte, Seile, Rohre und ähnliches) möglich ist, den Werkstoff in der Form zu prüfen, in der er später verwendet wird.

Da auf Grund zahlreicher Untersuchungen feststeht, daß sowohl Form und Abmessungen als auch die Herstellungsweise der Zerreißstäbe das Versuchsergebnis beeinflussen können, sind in den Normen die wichtigsten Angaben über die Probestabformen und Abmessungen festgelegt.

Die nach DIN 1605, Bl. 2, festgelegten Stabformen und Meßlängen sind in nachstehender Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Herstellung der durch verhältnismäßig große Abmessungen festliegenden Normalstäbe aus den zu untersuchenden Werkstücken ist nur selten möglich. Die meisten Versuche werden daher an Proportionalstäben durchgeführt. Es sind dies Stäbe, bei denen die Abmessungen so gewählt sind, daß sie in bestimmtem Verhältnis zu denen der Normalstäbe stehen. Mit diesen geometrisch ähnlichen Probestäben lassen sich auf Grund des Ähnlichkeitsgesetzes vergleichbare Versuchsergebnisse erzielen. In erster Linie ist dabei auf proportionale Bemessung der Meßlänge zu achten. Maßgebend hierfür ist das Verhältnis der Meßlänge l_0 zur Wurzel aus dem Stabquerschnitt F_0. Dieser Quotient ist

für den langen Normalrundstab $200 : \sqrt{314} = 11{,}3$. Die Meßlänge l_0 für den langen Proportionalstab errechnet sich daher aus $11{,}3\sqrt{F_0}$. Für den kurzen Proportionalstab gilt $l_0 = 5{,}65\sqrt{F_0}$. Auf Grund dieser Beziehung ist es auch nur möglich, bei Untersuchungen an Flachstäben vergleichbare Werte zu erhalten. Beim Flachstab wird die Dicke des Stabes meistens gegeben sein, weil es üblich ist, Zerreißproben aus Blechen usw. mit Walzhaut zu prüfen. Man wird also bei der Probenherstellung aus den zu prüfenden Blechen Streifen von solcher Breite

Tabelle 1

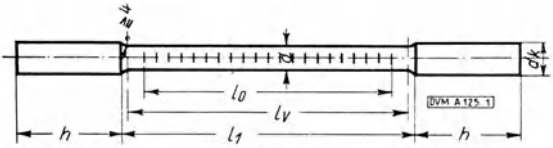
Zu unterscheiden sind folgende Probestabformen	Maße in mm			Querschnitt F_0 mm²	Zeichen für die Bruchdehnung
	Prismatische oder zylindrische Länge l_p (mindestens)	Meßlänge l_0	Durchmesser*) d		
1. Langer } Normalstab	$l_0 + d$	$10\,d = 200$	20	314	δ_{10}
2. Kurzer } Normalstab		$5\,d = 100$			δ_5
3. Langer } Proportionalstab		$10\,d = 11{,}3 \cdot \sqrt{F_0}$	beliebig	beliebig	δ_{10}
4. Kurzer } Proportionalstab		$5\,d = 5{,}65 \cdot \sqrt{F_0}$			δ_5

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

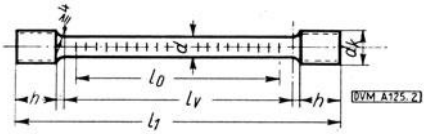
Für Abnahmeversuche wird auch der Langstab ($l_0 = 200$ mm, F_0 beliebig) und der Kurzstab ($l_0 = 100$ mm, F_0 beliebig) aus wirtschaftlichen Gründen verwendet. Die Zeichen für die Bruchdehnung sind dann δ_l und δ_k. Im Ausland sind vielfach Stäbe mit kleineren Meßlängenverhältnissen (bis $l_0 = 2\sqrt{F_0}$) im Gebrauch. Diese Stäbe ergeben Bruchdehnungen, die nicht ohne weiteres mit den normgerechten δ_5 und δ_{10} vergleichbar sind.

herausarbeiten, daß unter Beibehaltung der ursprünglichen Dicke des Bleches der Querschnitt des Flachstabes passende Abmessungen erhält. Es gilt hierbei nur eine Einschränkung: das Seitenverhältnis darf nicht größer als 1 : 4 sein. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 125 enthält nähere Angaben über Probenahme, Kennzeichnung und Bearbeitung der Probestäbe, sowie alle für die Herstellung der Probestäbe erforderlichen Maße. Abb. 20 zeigt die Probestabformen dieses Normblattes. Sonderformen für Probestäbe sind in DIN DVM-Prüfverfahren A 109 für Gußeisen, A 114 für dünne Bleche und A 120 für Schweißungen festgelegt. Vorschriften für die Probenahme bei Zugversuchen mit Gußeisen enthält DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 108. Für Temperguß gelten DIN 1692, für Stahlguß DIN 1681.

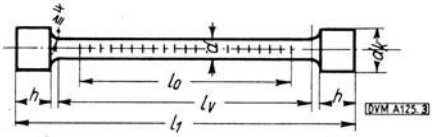
Rundstäbe mit glatten Zylinderköpfen



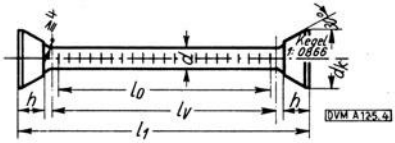
Rundstäbe mit Gewindeköpfen



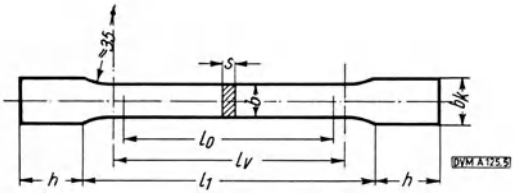
Rundstäbe mit Schulterköpfen



Rundstäbe mit Kegelschulterkopf



Flachstäbe mit Köpfen für Beißkeile



Flachstäbe mit Hammerköpfen

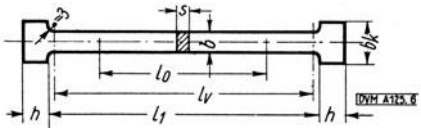


Abb. 20. Formen der Probestäbe für Zugversuche nach DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 125 *)

*) Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Maßgebend ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Vertrieb, G. m. b. H., Berlin SW 68, erhältlich ist

Die Probestäbe werden an den Köpfen durch geeignete (s. u.) Einspannvorrichtungen gefaßt und in der Prüfmaschine befestigt. Der Probestab wird durch axiale Bewegung des einen Einspannkopfes beansprucht. Da beim Zugversuch zusätzliche Biegebeanspruchungen auf jeden Fall vermieden werden müssen, sind die Einspannvorrichtungen der Prüfmaschine so beschaffen, daß Bewegungsmöglichkeiten nach allen Seiten bestehen. Dadurch kann sich bei beginnender Belastung die Längsachse des Probestabes von selbst in die Zugachse der Prüfmaschine einstellen. Konstruktiv wird diese Vorbedingung zur Erzielung einwand-

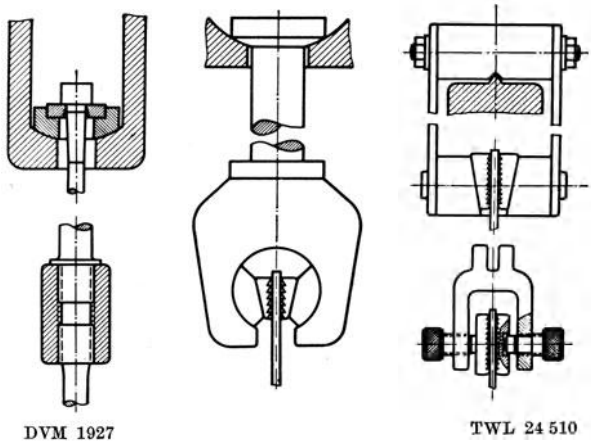


Abb. 21. Einspannungen für Zerreißstäbe (Rund- und Flachstäbe)

freier Ergebnisse durch Gelenke, Schneiden oder Kugelschalen erreicht (s. Abb. 21). Die Köpfe der Probestäbe werden in der Praxis je nach den vorhandenen Einspannvorrichtungen, den Eigenschaften und Abmessungen des zu prüfenden Werkstoffes ausgebildet.

In Abb. 21, links oben, ist die Einspannung eines Rundstabes mit Schulterkopf dargestellt. Unterhalb des Kopfes umfaßt ein geteilter Ring den Stabschaft. Die beiden Ringhälften liegen in einem geschlossenen Ring, dessen untere Fläche kugelförmig gestaltet ist und auf einer entsprechend bearbeiteten Fläche des Einspannkopfes der Prüfmaschine ruht. Die darunterliegende Skizze zeigt die Einspannung eines Rundstabes mit Gewindekopf. Das oben in der Gewindemuffe sitzende Verlängerungsstück wird im Einspannkopf der Prüfmaschine in der gleichen Weise befestigt, wie bei einem Rundstab

mit Schulterkopf. Abb. 21, Mitte und oben rechts, zeigen Einspannvorrichtungen für Flachstäbe. Der Stabkopf wird durch prismatische Keile (Beißkeile) eingespannt, deren Berührungsflächen aufgerauht oder mit Feilenhieb versehen sind. Bei Verwendung von Keileinspannungen für Drähte und Rundmaterial werden die Keile mit entsprechender Nut versehen. Rohre müssen an den Enden mit gutsitzenden Stahlstopfen versehen werden, um ein Zusammendrücken durch den Keildruck zu vermeiden. Sehr feine Drähte und dünne Bleche lassen sich auch mit parallelen Klemmbacken einspannen, die dann entsprechend lang zu wählen sind (s. Abb. 21, unten rechts). Die meisten Keileinspannungen sind aus Gründen der Zeitersparnis als „Schnellspannvorrichtungen" ausgebildet.

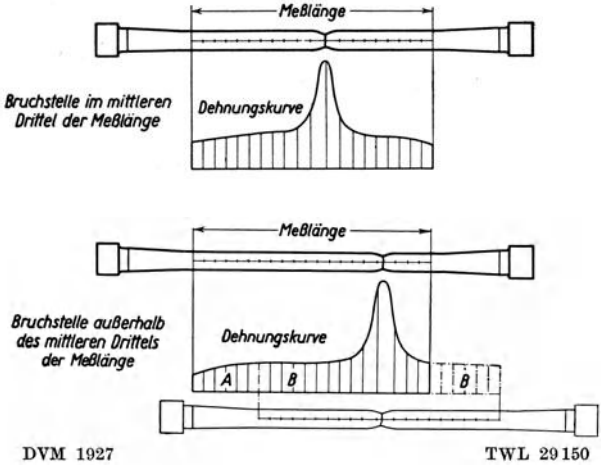


Abb. 22. Ausmessen der Bruchdehnung

Der Hauptgrund für die Normung der Probestäbe war die Festlegung einer Meßlänge für die Bestimmung der Bruchdehnung. Bei Werkstoffen, die beim Zugversuch eine Einschnürung zeigen, ist hinsichtlich der Bruchdehnung zu unterscheiden zwischen der sogenannten Gleichmaßdehnung und der Einschnürdehnung. Während sich die Gleichmaßdehnung über die ganze Länge des Stabes erstreckt, nehmen an der Einschnürdehnung nur die in der nächsten Umgebung der späteren Bruchstelle liegenden Stabquerschnitte teil. Die Dehnung dieser Stabteile ist im Vergleich zur Dehnung weiter von der Bruchstelle entfernt liegender Stabteile sehr groß (s. Abb. 22). Durch die

Kopfform des Probestabes können die Bruchdehnungswerte ebenfalls beeinflußt werden, da durch die Stoffanhäufung im Kopf die Bewegung der anschließenden Stoffteile behindert wird, wodurch die Dehnung der Stabteile in der Nähe des Kopfes kleiner ausfällt. Um eine Beeinträchtigung der Dehnung durch die Stabköpfe zu vermeiden, liegt daher Anfang und Ende der Meßlänge etwa um die Größe des Stabdurchmessers vom Übergang zum Stabkopf entfernt. Da weiter die Dehnung durch einen ungleichmäßigen Stabquerschnitt beeinflußt werden kann, ist bei Herstellung der Probestäbe auf Gleichmäßigkeit des Stabquerschnittes besonders zu achten.

Zur Messung der Bruchdehnung wird auf dem Stabschaft die Meßlänge durch Marken (Körner) abgegrenzt, oder der Stab wird mit einer Teilung versehen. Bei Flachstäben wird die Teilung auf beiden Schmalseiten aufgetragen und als maßgeblicher Dehnungswert das Mittel aus beiden Meßergebnissen genommen. Die Bruchdehnungsmessung

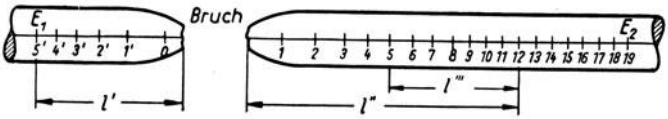


Abb. 23. Bruchdehnungsmessung an einem geteilten, langen Proportionalstab

zwischen Körnern ist nach dem vorher Gesagten nur zulässig bei Werkstoffen, die ohne starke Einschnürung reißen, bei denen also die Gleichmaßdehnung überwiegt. Denn bei Werkstoffen mit starkem Einschnürvermögen ist die Bruchdehnung außer von der Meßlänge abhängig von der Lage des Bruches. Die Bruchdehnung ist am größten, wenn der Bruch in Stabmitte liegt. Wird bei derartigen Werkstoffen die Bruchdehnung zwischen Endmarken gemessen, so kann nach DIN 1605, Bl. 2, ein Versuch, bei dem der Probestab innerhalb eines Enddrittels der Meßlänge reißt, bei unzureichender Dehnung wiederholt werden. Da man vor dem Versuch selten weiß, ob bei dem zu prüfenden Werkstoff die Gleichmaßdehnung oder die Einschnürdehnung überwiegt, um auf jeden Fall aber den Einfluß der Bruchlage auszuschalten, wird die Bruchdehnung wie folgt bestimmt: Man teilt vor dem Versuch die errechnete Meßlänge l_0 von z. B. 120 mm in 24 Teile zu je 5 mm. Angenommen, durch den Bruch wird der Stab in ein längeres und ein kürzeres Bruchstück geteilt, dann wird die dem Bruch am nächsten liegende Teilmarke mit 0, die folgenden Teilmarken der beiden Bruch-

stücke werden nach den Endmarken zu mit 1, 2, 3 usw. bzw. 1′, 2′, 3′ usw. bezeichnet, s. Abb. 23. Danach werden folgende Messungen vorgenommen, durch die der Bruch ideell in die Stabmitte verlegt wird:

Messung 1. Am kürzeren Bruchstück wird der Abstand zwischen der Endmarke E_1 und dem Bruch gemessen (Länge l'). Da der Bruchverlauf meist unregelmäßig ist, muß darauf geachtet werden, daß die Messung bis zu entsprechenden Stellen der Bruchfläche vorgenommen wird. Aus diesem Grunde wird der Stab vor dem Versuch mit einem Längsriß versehen.

Messung 2. Am längeren Bruchstück werden zunächst die der halben Meßlänge (60 mm) entsprechenden Teilungen, im Beispiel 12, von Marke 0 beginnend, abgezählt. Der Abstand vom Bruch bis zum 12. Teilstrich wird am Längsriß entlang gemessen (Länge l'').

Messung 3. Am kürzeren Bruchstück fehlen an der halben Meßlänge, gerechnet von der Marke 5′ aus, noch 7 Teile. Da dem Meßverfahren die Tatsache zugrunde gelegt ist, daß der Dehnungsverlauf beiderseitig der Bruchstelle symmetrisch ist, können die am kürzeren Bruchstück fehlenden 7 Teilungsintervalle durch die entsprechenden am längeren Bruchstück ersetzt werden. Man hat also vom Teilstrich 12 des längeren Bruchstückes die sieben Teilungsintervalle nach dem Bruch hin auszuzählen und ihre Länge zu messen (Länge l'''). Die Verlängerung nach dem Bruch ist dann:

$$\Delta l = l' + l'' + l''' - l_0,$$

und die Dehnung

$$\delta_{10} = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\,[\%].$$

Die obigen Ausführungen lassen erkennen, daß die Bruchdehnung allein nicht zur Beurteilung des Formänderungsvermögens eines Werkstoffs ausreicht. Ein Werkstoff, dessen Bruchdehnung überwiegend aus Einschnürdehnung besteht, ist anders zu beurteilen als ein Werkstoff mit gleich großer Dehnung, die aber überwiegend von einer Gleichmaßdehnung herrührt. Aus diesem Grunde wird bei der Beurteilung der Werkstoffe hinsichtlich ihres Formänderungsvermögens die Untersuchung auch auf die Bruchquerschnittsverminderung ausgedehnt. Der Bruchquerschnitt wird mit Hilfe von Schieblehren oder Schraublehren bestimmt. Hierbei ist darauf zu achten, daß man wirklich an der schwächsten Stelle mißt. Bei sehr unregelmäßigem Verlauf der Bruch-

fläche kann man sich helfen, indem man beide Stabhälften aneinander legt und dann mißt. Da viele Werkstoffe nicht zylindrisch einschnüren, müssen zwei zueinander senkrechte Durchmesser gemessen werden. Der Mittelwert gilt dann mit genügender Genauigkeit als maßgeblicher Durchmesser für die Berechnung der Bruchquerschnittsverminderung. Bei Flachstäben mit örtlicher Einschnürung ist der Querschnitt an der Bruchstelle verzerrt und eine genaue Ausmessung daher schwierig. Nach DIN 1605, Bl. 2, erhält man bei gleichem Werkstoff annähernd gleiche Werte wie beim Rundstab, wenn Breite und Dicke des Bruchquerschnitts an der dünnsten Stelle gemessen werden.

Beim Zugversuch ohne Feinmessung sind also in der Regel folgende Kennziffern zu bestimmen: σ_S, σ_B, δ_{10} und ψ.

Zu beachten ist beim Versuch der Einfluß der Versuchsgeschwindigkeit. Große Belastungsgeschwindigkeit, d. h. kurze Versuchsdauer, können sowohl eine zu hohe Streckgrenze als auch eine Erhöhung der Zugfestigkeit ergeben. Bei allen Versuchen ist daher auf Einhaltung der in DIN 1605 festgelegten Belastungsgeschwindigkeit von maximal 1 kg/mm² s zu achten. Unterhalb dieser Belastungsgeschwindigkeit ist bei Stahl die Abweichung der Kennziffern nur gering. Der Gang der Versuchsausführung ist folgender:

1. Ausmessen des Probestabes,
2. Berechnen und Aufbringen der Meßlänge bzw. der Teilung,
3. Ermittlung der voraussichtlichen Höchstlast aus dem Probenquerschnitt und der angenommenen Zugfestigkeit,
4. Einspannen des Probestabes in die Zug-Prüfmaschine,
5. Belasten und fortlaufendes Beobachten der Kraftanzeige der Prüfmaschine zur Ermittlung der charakteristischen Belastungsstufen (die Streckgrenze wird nur angegeben, wenn sie aus dem Stillstand oder dem Abfall der Kraftanzeige zu ermitteln ist),
6. Ausmessen der Verlängerung und des Stabdurchmessers an der Bruchstelle zur Erreichung von Bruchdehnung und Bruchquerschnittsverminderung.

Beobachtet man einen Probestab beim Versuch, so zeigen sich nach Überschreiten der Fließgrenze Oberflächenveränderungen. Walzzunder oder Rost springen von den Stäben ab, blanke Stäbe werden rauh. Zuweilen sind Fließfiguren, die sogenannten Lüderschen oder Hartmannschen Linien zu beobachten, die sich gegenseitig überschneidend unter 45 bis 60° zur Stabachse geneigt verlaufen.

Zur erschöpfenden Kennzeichnung eines Werkstoffs gehört außer der Angabe der Kennziffern eine Beschreibung des Bruchaussehens. Die wichtigsten Bruchformen sind: „Trichterbildung mit ebenem Grund", „Trichterbildung" und „Ebene Bruchfläche mit glattem oder zackigem Rand". Das Aussehen der Bruchfläche ist je nach dem Werkstoff: matt, kristallinisch glänzend, grobkörnig, feinkörnig, samtartig, schuppig, sehnig, blättrig usw. Es ist jedoch abwegig, allein auf Grund des Bruchaussehens bestimmte Angaben über die Werkstoffe zu machen.

Zugversuche mit Feinmessungen sind erforderlich zur Bestimmung der 0,2-Grenze, der Elastizitätsgrenze (ermittelt als 0,003- bis 0,01-Grenze), des Elastizitätsmoduls E und der Dehnungszahl α. Feinmessungen werden grundsätzlich nur an bearbeiteten Rund- oder Flachstäben durchgeführt. Die Feinmeßlänge richtet sich nach den zur Verwendung gelangenden Feinmeßgeräten. Spiegelfeinmeßgeräte werden in der unter II C d_2 angegebenen Weise angesetzt. Zum Ansetzen der Tensometer werden Klammern benutzt, die durch allseitige Verstellmöglichkeiten große Anpassungsfähigkeit besitzen. Nach dem Ansetzen werden die Tensometer leicht angeklopft, um bei Belastung des Probestabes ein Rutschen der Schneiden zu verhindern. Um Lageänderungen des Probestabes und damit Ablesungsfehler zu vermeiden, wird zweckmäßig eine kleine Vorlast, die Null-Last, aufgebracht, unter der die erste Ablesung an den Feinmeßgeräten erfolgt. Beim Entlasten muß die Nullast etwas unterschritten und von unten kommend eingestellt werden, um etwaigen toten Gang der Prüfmaschine und der Meßgeräte auszuschalten. Zur Ermittlung der E-Grenze und der 0,2-Grenze ist mehrmaliges Entlasten erforderlich. Werden dabei die notwendigen Ableseeinheiten für die bleibende Verlängerung nicht genau erreicht oder überschritten, so zeichnet man unter Zugrundelegung der ermittelten Werte für die bleibende Längenänderung das Belastungs-Verlängerungsschaubild und entnimmt ihm die zu z. B. 0,01 bzw. 0,2% bleibender Verlängerung gehörende Belastung.

Der Elastizitätsmodul kann bestimmt werden:

1. Mit Hilfe von wiederholten Be- und Entlastungen des Probestabes zwischen einer Nullast und einer gleichbleibenden Oberlast, die so gewählt werden muß, daß praktisch keine bleibenden Verlängerungen auftreten. Dann ist:

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{F_0 \cdot \Delta l} \text{ kg/mm}^2,$$

wobei ΔP der Belastungsunterschied in kg, l_0 die Feinmeßlänge in mm, F_0 der Ursprungsquerschnitt des Probestabes in mm², und Δl die mittlere Gesamtverlängerung in mm für ΔP ist.

2. Durch Be- und Entlasten des Probestabes zwischen einer Nulllast und verschiedenen Laststufen auch außerhalb des elastischen Bereichs. In obiger Formel bedeutet dann Δl die elastische Verlängerung, die aus der Gesamtverlängerung, vermindert um die bleibende Verlängerung (gemessen nach Entlastung des Probestabes), errechnet wird.

3. Als Kehrwert aus der Dehnzahl α. Zur Bestimmung von α sind keine Entlastungen erforderlich. $\alpha = \varepsilon/\sigma$ errechnet sich aus der bei bestimmten Belastungsstufen unterhalb der Proportionalitätsgrenze ermittelten Dehnung und der zugehörigen Spannung.

Die wichtigsten Fertigfabrikate, die im Zugversuch geprüft werden, sind Seile und Ketten. Bei Seilversuchen werden üblicherweise nur Bruchlast und Reißlänge bestimmt (Reißlänge = Belastung, unter der das an einem Ende frei aufgehängte Seil infolge seines Eigengewichts reißen würde = Bruchlast : Metergewicht). Gesamtverlängerung, elastische und bleibende Verlängerung des ganzen Seiles können ermittelt werden, s. DIN DVM 1201 (Drahtseile, Richtlinien für Prüfverfahren). Für die Versuchsdurchführung werden zweckmäßig Prüfmaschinen liegender Bauart benutzt. Bei hochwertigen Stahlseilen ist es nicht üblich, die am ganzen Strang ermittelte Reißlänge für den Gütenachweis heranzuziehen, sondern die rechnerische Bruchbelastung (Produkt aus der Summe der Querschnitte der einzelnen Drähte und der durch den Versuch ermittelten Zugfestigkeit des Drahtwerkstoffs).

Bei der Kettenprüfung ist zwischen dem Reck- und dem Bruchversuch zu unterscheiden. Die Recklast ist etwa gleich der zweifachen, die Bruchlast gleich der vierfachen Nutzlast.

Beim Reckversuch dürfen unter Last keine Beschädigungen an den Kettengliedern auftreten, zumindest sind schadhafte Stellen auszuwechseln, und der Reckversuch ist zu wiederholen. Beim Bruchversuch darf die Kette erst nach Erreichen der vorgeschriebenen Bruchlast reißen, damit die Bedingungen nach DIN 685 (Geprüfte Ketten, Richtlinien für die Anforderung an Rundgliederketten) erfüllt sind.

Die im Zugversuch bei Raumtemperatur ermittelten Werkstoffkennziffern ändern sich mit der Temperatur. Die Änderung der Kennziffern eines normalen Kohlenstoffstahls mit höheren Wärmegraden zeigt

Abb. 24. Um die Werkstoffe im Behälterbau, bei Transformatoren, Feuerungsteilen usw. richtig einsetzen zu können, ist es wichtig, ihre Kennziffern bei den Wärmegraden zu ermitteln, denen sie während des praktischen Betriebs ausgesetzt sind. Der Zugversuch bei hohen Temperaturen wird grundsätzlich in derselben Weise wie bei Raumtemperatur durchgeführt, nur daß der Probestab während der Versuche durch eine Erwärmungsvorrichtung auf der ge-

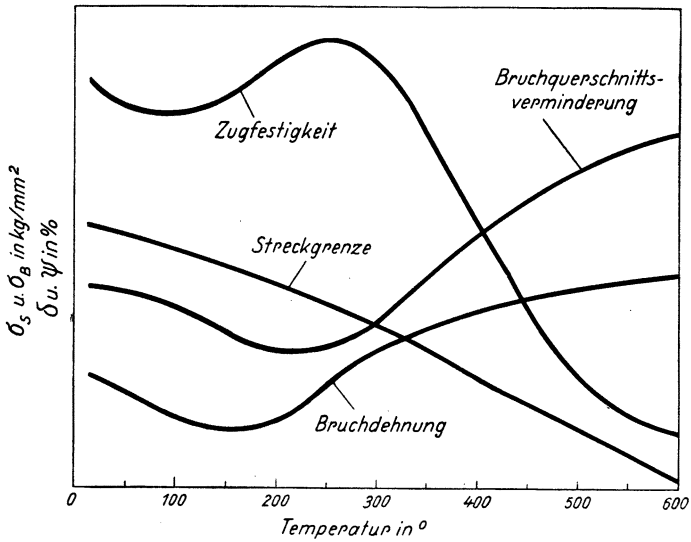


Abb. 24. Festigkeitseigenschaften von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur

(Aus: Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, 2. Auflage, 1937. Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf)

wünschten Temperatur gehalten wird. Da die Warmstreckgrenze und die Warmzugfestigkeit in starkem Maße von der Versuchsdauer abhängig sind, lassen sich vergleichbare Versuchsergebnisse nur unter völlig gleichen Versuchsbedingungen erzielen. Unter der Warmstreckgrenze versteht man die Spannung an der Fließ- oder Streckgrenze bei Wärmegraden über Raumtemperatur. Bei scharfer Ausprägung wird die Warmstreckgrenze aus dem Stillstand bzw. Abfall der Kraftanzeige der Prüfmaschine bestimmt. Ist keine deutlich ausgeprägte Streckgrenze vorhanden — für Stahl ist das von etwa 250° an der Fall —, so wird an ihrer Stelle die 0,2-Grenze bestimmt.

Zum Erwärmen des Probestabes werden zweckmäßig elektrisch beheizte Öfen mit Flüssigkeits- oder Luftbad benutzt. Grundsätzlich sind an die Öfen folgende Forderungen zu stellen: Sie müssen handlich, d. h. nicht zu groß und zu schwer sein. Der Probestab und die Feinmeßgeräte müssen sich schnell in den Ofen einbauen lassen und die ganze Versuchseinrichtung muß leicht in der Prüfmaschine befestigt werden können. Die Wärmekapazität des Ofens darf nicht zu groß sein, damit das Einstellen der Versuchstemperatur nicht zeitraubend ist. Andererseits muß sie groß sein, damit die für Zugversuche bei hohen Temperaturen zulässigen Temperaturunterschiede eingehalten werden können. Besonders wichtig ist, daß durch die Ofenbauart eine über die ganze Länge des Probestabes gleichmäßige Temperatur sichergestellt ist. In DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 112, sind alle für die Ausführung von Zugversuchen bei hohen Temperaturen wichtigen Angaben zusammengestellt. Danach dürfen die Temperaturunterschiede im Stab $\pm 2^0$ nicht überschreiten. Die Temperatur wird bei Verwendung eines Luftbadofens mit zwei bis drei Thermoelementen gemessen, die am Stab befestigt werden und gegen die strahlende Wärme des Ofens durch Asbestpappe geschützt sein müssen. Mit dem Versuch kann begonnen werden, wenn nach eingetretenem Temperaturausgleich die Stabtemperatur mindestens 5 Minuten lang auf der Höhe der Prüftemperatur gehalten wurde. Die Belastungsgeschwindigkeit soll 0,5 kg/mm²s nicht überschreiten. Bei der Bestimmung der 0,2-Grenze soll eine Vorlast aufgebracht werden, die etwa 10 % der bei der 0,2-Grenze zu erwartenden Last beträgt. Unter dieser Last erfolgt die erste Ablesung an den Feinmeßgeräten. Dann wird auf etwa 80 % der bei der 0,2-Grenze zu erwartenden Last belastet. Der Stab bleibt 2 Minuten unter Last und wird dann auf die Vorlast entlastet. Die bleibende Dehnung wird 30 Sekunden nach Entlastung abgelesen. Der gleiche Vorgang wiederholt sich bei stufenweise gesteigerter Belastung, bis die 0,2-Grenze erreicht oder überschritten ist. Die jeweilige Laststeigerung soll etwa die Hälfte der Vorlast betragen. Zur genauen Ermittlung der 0,2-Grenze kann die bleibende Dehnung in Abhängigkeit von der Belastung zeichnerisch aufgetragen werden. Handelt es sich um Abnahmeversuche, bei denen nur ein Mindestwert für die bei einer bestimmten Temperatur zu ermittelnde 0,2-Grenze vorgeschrieben ist, so wird nur einmal bis zu dieser Spannung belastet und wieder entlastet. Überschreitet die nach 30 Sekunden festgestellte bleibende Dehnung den Betrag von 0,2 % nicht, so gilt die Bedingung als erfüllt.

Die Warmstreckgrenze dient als Berechnungsgrundlage bis zu Temperaturen, bei denen im selbsttätig aufgezeichneten Belastungs-Verlängerungsschaubild noch ein Knick zu erkennen ist [32]. Soll die 0,2-Grenze als Grundlage für die Beurteilung der zulässigen Spannungen herangezogen werden, so muß sichergestellt sein, daß der Einfluß der Belastungsdauer auf die Höhe der 0,2-Grenze nur gering ist.

Die Zeitabhängigkeit der Dehnung unlegierter Stähle wird besonders groß bei Temperaturen über 400°. Oberhalb dieser Temperaturgrenze führen daher auch Belastungen unter der Streckgrenze zu einem stetigen, mehr oder weniger schnell abklingenden Dehnen des Stahles, „Kriechen" genannt. Zur Kennzeichnung des Verhaltens der Werkstoffe bei langdauernden Zugbeanspruchungen werden daher Dauerstandversuche durchgeführt. Ermittelt wird die Dauerstandfestigkeit [24], [25], das ist diejenige Grenzzugspannung, unter der ein anfängliches Dehnen des Werkstoffs im Laufe der Zeit noch zum Stillstand kommt, bei deren Überschreitung aber mit einem dauernden Dehnen bis zum Eintritt des Bruches zu rechnen ist. Die Ermittlung der „wahren" Dauerstandfestigkeit ist insofern schwierig, als die Dehnungen bei vielen Werkstoffen noch nach sehr langer Zeit fortschreiten und es nicht einmal sicher ist, ob das Dehnen überhaupt zum Stillstand kommt. Da Versuche von langer Zeitdauer für die Praxis untragbar sind, ist in DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 117, ein abgekürztes Verfahren vorgeschlagen, nach dem zur Zeit gearbeitet wird. Mit Hilfe dieses Verfahrens läßt sich ein ausreichender Näherungswert für die „wahre" Dauerstandfestigkeit bestimmen. Die Versuche werden mit mehreren gleichartigen Probestäben bei verschiedener aber gleichbleibender Belastung und gleichbleibender Temperatur durchgeführt. Entgegen der Begriffsbestimmung für die „wahre" Dauerstandfestigkeit sucht man jedoch nicht den Spannungswert zu ermitteln, bei dem die Dehnung nach sehr langer Zeit vollkommen aufhört oder sehr geringe Beträge annimmt, sondern man bestimmt diejenige Zugspannung, bei der die Dehnung innerhalb einer bestimmten Versuchszeit (45 Stunden) einen festgesetzten Betrag nicht überschreitet. Dieser Betrag wurde so gewählt, daß nach den gesamten bisherigen Erfahrungen mit Sicherheit ein Abklingen des Kriechens zu erwarten ist.

Die Ermittlung der Dauerstandfestigkeit erfordert die Durchführung von drei bis fünf Versuchen mit verschiedenen, der voraussichtlichen Dauerstandfestigkeit angepaßten Belastungen, für die je ein neuer Probestab zu verwenden ist. Nach DIN Vornorm, DVM Prüf-

verfahren A 118, darf die Probestabtemperatur während der ganzen Versuchsdauer um höchstens $\pm 3\,\%$ schwanken. Als Belastungs-

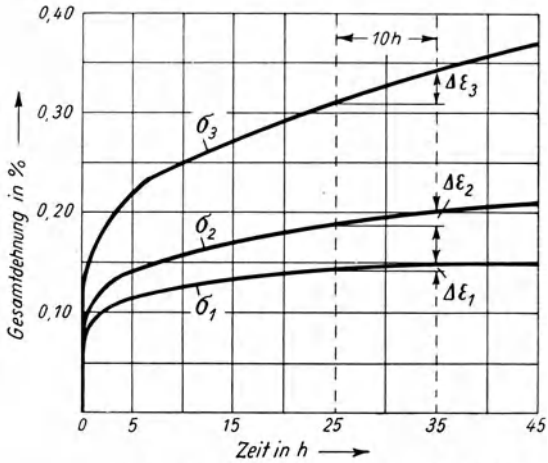


Abb. 25. Bestimmung der Dehngeschwindigkeit

vorrichtung sind Anordnungen mit Gewichtsbelastung mit oder ohne Hebelübersetzung zu bevorzugen. Die Meßeinrichtung muß Längenänderungen von mindestens 0,001 % der Meßlänge abzulesen gestatten oder selbsttätig aufzeichnen. Während der Versuchszeit wird die Zeit-Dehnungsschaulinie genau aufgenommen. Falls sie nicht selbsttätig aufgezeichnet wird, liest man zu ihrer zeichnerischen Festlegung die Dehnung in entsprechenden Zeitabständen ab. Aus den Zeit-Dehnungsschaulinien wird für jeden Versuch die Dehngeschwindigkeit zwischen der 25. und 35. Stunde ermittelt (siehe

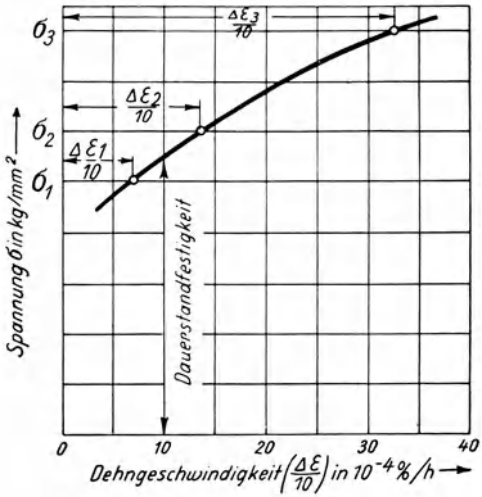


Abb. 26. Bestimmung der Dauerstandfestigkeit

Abb. 25). Die Dehngeschwindigkeit ist gleich der Differenz der Dehnung $\Delta \varepsilon$ zwischen der 35. und 25. Stunde, dividiert durch die Zeitspanne in Stunden. Die Dehngeschwindigkeiten werden in Abhängigkeit von der Zugspannung aufgetragen (s. Abb. 26). Aus der erhaltenen Schaulinie wird die Dauerstandfestigkeit als die Beanspruchung ermittelt, die einer Dehngeschwindigkeit von $10 \cdot 10^{-4}\,\%$ je Stunde entspricht.

Außer der Dehngeschwindigkeit wird bei den Dauerstandversuchen die bleibende Dehnung ermittelt, die den Wert von 0,2 % nach 45 Stunden nicht überschreiten soll. Handelt es sich um Abnahmeversuche, bei denen nur festzustellen ist, ob bei der vorgeschriebenen Temperatur und Belastung die Dehngeschwindigkeit zwischen der 25. und 35. Stunde den Betrag $10 \cdot 10^{-4}\,\%$ je Stunde und die bleibende Dehnung nach 45 Stunden den Betrag von 0,2 % nicht überschreitet, so genügt ein Versuch.

Die Prüfeinrichtungen zur Durchführung von Dauerstandversuchen müssen so beschaffen sein, daß sie gleichbleibende Temperatur und Belastung des Probestabes, sowie die sichere Aufnahme des Dehnverlaufs gewährleisten. Eine bewährte Konstruktion zeigt Abb. 27. Der im Innern des Ofens liegende Probestab wird zwischen zwei Spannbolzen befestigt. Der obere Spannbolzen ruht kugelig gelagert im Ständerkopf. Der untere Spannbolzen ist im Einspannkopf befestigt und überträgt die durch ein Hebelsystem im Verhältnis 1 : 50 übersetzte Last auf den Stab. Be- und Entlastung erfolgt durch einen mit einem umkehrbaren Motor gekuppelten Spindeltrieb, durch den ein Belastungsteller gesenkt bzw. gehoben wird. Der Ofen ist mit einem Ausdehnungs-Temperaturregler ausgerüstet, der sich unmittelbar auf der Heizwicklung befindet, die Temperatur also an der Erzeugungsstelle regelt. Hierdurch wird eine Regelgenauigkeit von $\pm 1^0$ erreicht. Die Temperaturmessung erfolgt durch Thermoelemente. Um das Verzundern des Probestabes zu vermeiden, können die Versuche im Vakuum durchgeführt werden. Die Längenänderung des Probestabes wird zwischen zwei angedrehten Tellern gemessen. Auf dem oberen Teller sitzt ein Quarzrohr, durch das ein Quarzstab geführt wird, der bis auf den unteren Teller reicht. Das Quarzrohr trägt ein Meßgerät, das im wesentlichen aus einer Spindel und einem Ritzel besteht, die spielfrei gelagert sind und miteinander in Eingriff stehen. Auf dem Ritzel sitzt ein kleines Glasprisma. Die ganze Meßeinrichtung ist in einem staubdichten Gehäuse angeordnet. Dehnt sich der Probestab innerhalb der

Meßlänge, so folgt die unter Federspannung stehende Spindel dem Quarzstab und verursacht eine Drehung des Prismas. Hierdurch wird der registrierende Lichtstrahl (Strahlengang: Lampe—Blende—feststehendes Prisma—drehbares Prisma) abgelenkt und zeichnet auf einer mit lichtempfindlichem Millimeterpapier bespannten Registriertrommel,

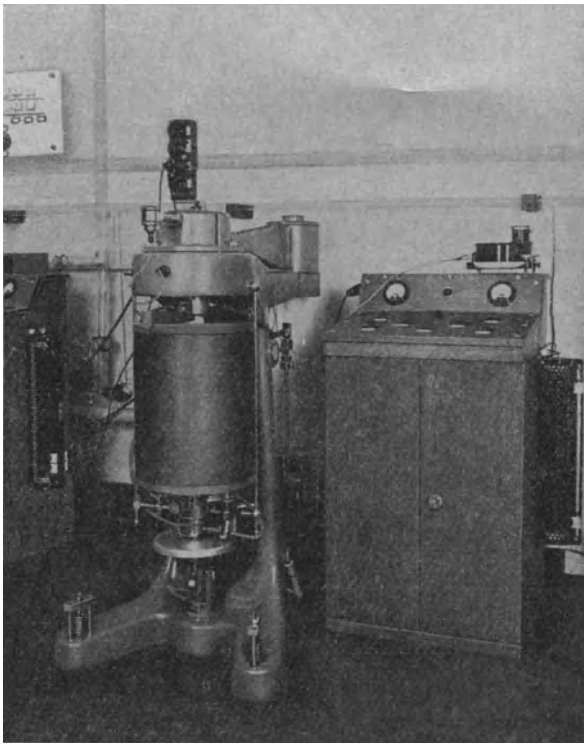


Abb. 27. NEA-Dauerstandprüfer

die durch einen Synchronmotor angetrieben wird, die etwa 1000fach vergrößerten Längenänderungen in Abhängigkeit von der Zeit auf [31].

Nach DIN-Vornorm, VDM-Prüfverfahren A 118, werden die Dauerstandversuche wie folgt durchgeführt: Der Probestab wird in den auf Versuchstemperatur erwärmten Ofen eingebaut. Die unbelastete Probe wird mindestens 4 Stunden lang vorgewärmt. Nach Erreichen der Versuchstemperatur in der Probe wird eine Vorlast von höchstens

1 kg/mm² aufgebracht und das Meßsystem eingestellt. Wenn die Stabtemperatur und die Anzeige des Meßgeräts unter der Vorlast 5 Minuten unverändert geblieben sind, wird die der voraussichtlichen Dauerstandfestigkeit entsprechende Gesamtlast aufgebracht. Während der hiermit beginnenden Versuchszeit von 45 Stunden wird die Zeit-Dehnungsschaulinie aufgenommen. Nach 45 Stunden wird auf die Vorlast entlastet und nach 10 Minuten die bleibende Dehnung festgestellt.

2. Der Druckversuch

Ein Körper ist auf Druck beansprucht, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken, die ihn zu verkürzen streben. Die Art der Beanspruchung unterscheidet sich von der Zugbeanspruchung also nur durch die entgegengesetzte Kraftrichtung. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache sind alle für die Zugfestigkeit entwickelten Begriffe und Gesetze auch für Druckversuche gültig.

Setzt man voraus, daß bei einer Druckbeanspruchung die äußeren Kräfte auch gleichmäßig über den Probenquerschnitt verteilt angreifen, so ist die in jedem Querschnitt hervorgerufene Normalspannung

$$\sigma_d = \frac{P}{F_0}$$

(F_0 = Ausgangsquerschnitt). Die Formänderung beim Druckversuch äußert sich in Kraftrichtung als Höhenverminderung. Da mit jeder Längenänderung eine Querschnittsänderung verbunden ist, tritt senkrecht zur Kraftrichtung eine Verdickung ein.

Für die Zusammendrückung gilt $\Delta l = l_0 - l$.

Die Zusammendrückung, bezogen auf die ursprüngliche Meßlänge l_0, wird als Stauchung bezeichnet:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0};$$

wie beim Zugversuch ist innerhalb des elastischen Bereichs

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma_d}.$$

Die Querschnittsvergrößerung in % des ursprünglichen Querschnitts F_0 ist:

$$\psi \text{ in } \% = \frac{F - F_0}{F_0} \cdot 100.$$

Die Querschnittsvergrößerung verläuft nicht gleichmäßig über die ganze Länge des Probekörpers. Sie wächst vielmehr von beiden Endflächen nach der Mitte zu, so daß zylindrische Probekörper aus formänderungsfähigen Werkstoffen Tonnenform annehmen. Diese Erscheinung beruht auf der Behinderung der Querdehnung durch die Reibung zwischen den Endflächen des Probekörpers und den Druckplatten der Prüfmaschine. Das bei einem Druckversuch aufgenommene Spannungs-Stauchungsschaubild ähnelt bei Metallen dem Zerreiß-Schaubild. Werkstoffe, die beim Zugversuch Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung zeigen, weisen auch beim Druckversuch bis zur Proportionalitätsgrenze für gleiche Spannungszunahmen gleiche Stauchungen auf. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze tritt ähnlich wie beim Zugversuch „Fließen" ein. Die zugehörige Spannung σ_{dF}, die der Streckgrenze beim Zugversuch entspricht, nennt man Quetschgrenze. Im weiteren Verlauf der Spannungs-Stauchungsschaulinie wird wegen der Zunahme der Querschnittsvergrößerung die Höhenverminderung formänderungsfähiger Werkstoffe für gleiche Belastungsstufen immer kleiner. Bei gut verformbaren Metallen tritt im allgemeinen kein Bruch ein. Auch eine Höchstlast kann nicht angegeben werden, da jede Belastungssteigerung eine Vergrößerung des Probenquerschnitts und damit erhöhte Lastaufnahmefähigkeit zur Folge hat. Bei weniger gut verformbaren oder spröden Werkstoffen (Gußeisen) erfolgt der Bruch unter der höchsten erreichten Last. Diese Höchstlast, bezogen auf den ursprünglichen Probenquerschnitt, wird als Druckfestigkeit bezeichnet:

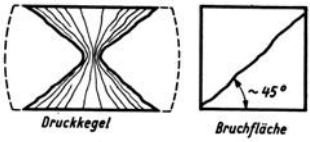
$$\sigma_{dB} = P_{max}/F_0.$$

Bei Werkstoffen ohne ausgeprägten Fließbereich geht die Schaulinie in stetiger Krümmung aus dem geradlinigen Anstieg für kleine Verformungen in den plastischen Bereich über. An Stelle der Quetschgrenze wird dann die 0,2-Grenze bestimmt, das ist die Spannung, die eine bleibende Höhenverminderung von 0,2 % der ursprünglichen Probenhöhe hervorruft. Das Auftreten von Mantelrissen an tonnenförmig ausbauchenden Proben kann nicht als charakteristische Belastungsgrenze gewertet werden, da sie im allgemeinen die Tragfähigkeit der Probe nicht merklich beeinträchtigen. Als Gütemaßstab für Druckversuche mit stark verformbaren Werkstoffen kommt daher der 0,2-Grenze eine überragende Bedeutung zu.

Die für Druckversuche kennzeichnenden Bruchformen zeigt Abb. 28. Die Ausbildung der an der Formänderung nicht teilnehmenden

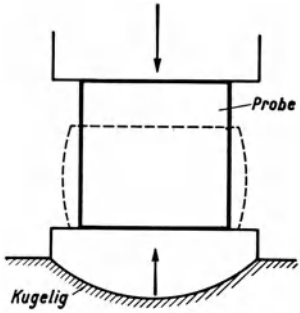
„Rutschkegel" ist auf die Behinderung der Querdehnung an den Endflächen zurückzuführen. Im Bereich plastischer Formänderungen gleitet daher der restliche Werkstoff der Probe an den „Rutschkegeln" entlang. Bei wenig verformbaren oder spröden Werkstoffen erfolgt zuweilen auch der Bruch in diesen Flächen größter Schiebungen. Normalerweise äußert sich die Kegelbildung im Innern des Werkstoffs jedoch nur durch einen unter 45° zur Probenachse verlaufenden Bruch.

Die Druckversuche werden entweder in Druckpressen oder in Universal-Prüfmaschinen durchgeführt. Nach DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 106, werden für Druckversuche zylindrische Probekörper von 10 bis 30 mm Durchmesser benutzt, deren Höhe gleich dem Durchmesser ist. Die Stirnflächen der Proben müssen planparallel und senkrecht zur Probenachse sein. Vergleichbare Ergebnisse sind



1929 TWL 25 232

Abb. 28. Brucherscheinungen an Druckkörpern



1929 TWL 25 232

Abb. 29. Schema des Druckversuchs

nur bei gleichem Bearbeitungsgrad der Endflächen und gleichem Zustand der Druckplatten (rauh oder glatt, trocken oder geschmiert) zu erzielen. Nach DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 106, müssen die Druckplatten eben, poliert und härter als der zu prüfende Werkstoff sein. Die Proben selbst sind allseitig fein zu schleifen oder zu schlichten. Bei der Prüfung muß die Probe genau zentrisch in der Achse der Prüfmaschine liegen. Um eine gleichmäßige Druckverteilung über den Probenquerschnitt zu erreichen, muß eine der beiden Druckplatten der Prüfmaschine kugelig gelagert sein, s. Abb. 29. Feinmessungen werden an längeren Proben (2,5 bis 3 d) in sogenannten Umschlußapparaten mit Stempelführung vorgenommen.

Vor dem Versuch wird die Probe genau ausgemessen. Das Anreißen einer Meßlänge erübrigt sich, da — von Feinmessungen abgesehen — die Probenlänge gleich der Meßlänge ist. Die Stauchung wird mit Millimeter- oder Prozentmaßstäben, Meßuhren, Spiegelfeinmeßgeräten

oder Tensometern gemessen. Bei Feinmessungen mißt man die Stauchung an der Probe selbst, beim normalen Druckversuch wird sie aus der Bewegung der beiden Druckplatten bestimmt, indem je ein Meßgerät zu beiden Seiten der Probe angeordnet wird.

3. Der Knickversuch

Knickversuche sind Druckversuche mit Stäben, deren Länge im Verhältnis zum Querschnitt sehr groß ist. Bei derartigen schlanken Proben ruft die in Richtung der Längsachse wirkende Druckkraft nicht allein Druckspannungen in den einzelnen Stabquerschnitten hervor, sondern auch Biegespannungen. Die Biegespannungen sind bedingt durch ausmittige Belastung, Ungleichmäßigkeit des Werkstoffs usw. Sie haben das Ausknicken des Stabes zur Folge. Die zum unaufhaltsamen Ausknicken erforderliche axiale Druckbelastung wird als Knicklast bezeichnet. Da die Werkstoff-Kennziffern die Ergebnisse des Knickversuchs im allgemeinen nicht beeinflussen, schaltet er als reine Güteprüfung aus. Für die Beurteilung der Tragfähigkeit und Spannungsverteilung in Konstruktionsteilen kann er dagegen von ausschlaggebender Bedeutung sein. Für die beim Knickversuch möglichen Einspannungsverhältnisse gelten die Euler-Formeln. Bei dem in der Werkstoffprüfung am häufigsten angewandten Belastungsfall wirkt die Last bei frei beweglich gelagerten Stabenden in Richtung der ursprünglichen Probenachse. Die Knicklast ist dann

$$P_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2},$$

worin E der Elastizitätsmodul des Werkstoffs, I das kleinste für die Ausbiegung in Betracht kommende Trägheitsmoment und l die Knicklänge ist.

Die Durchführung von Knickversuchen bietet erhebliche Schwierigkeiten, sowohl hinsichtlich der einwandfreien Lagerung der Stabenden als auch hinsichtlich der axialen Belastung. Um eine gute Beweglichkeit der Stabenden zu erreichen, werden die sauber bearbeiteten Endflächen mit Druckstücken hinterlegt. Die Druckstücke sind gegen den Kolben bzw. das Widerlager der Prüfmaschine kugelig zu lagern. Infolge der geringen Berührungsfläche zwischen Kugel- und Druckplatte können jedoch Verformungen der Druckplatte auftreten, wodurch die Versuchs-

ergebnisse stark beeinflußt werden. Aus diesem Grunde werden häufig Schneidenlager benutzt, deren Berührungsfläche größer ist. Die Lagerung in Schneiden hat jedoch den Nachteil, daß die freie Beweglichkeit der Stabenden nur in einer Richtung — senkrecht zu den Schneidenkanten — gegeben ist. Zweckmäßige Lagerung der Druckplatte und geeignete Verstellorgane bieten hier aber den Vorteil, den Stab in zwei Richtungen um kleine Beträge verstellen zu können. Dadurch wird es möglich, die Schwerpunktachse des Stabes auf die Druckachse der Maschine auszurichten. Die schnelle Durchführung des Ausrichteverfahrens ermöglicht ein von Zimmermann angegebenes Rechnungsverfahren, welches die an den Stabenden jeweils wirkenden sogenannten „Fehlerhebel" zugrunde legt.

Beim Versuch be- und entlastet man die Probe abwechselnd unter Messung des Ausbiegens. Hat die Probe in zwei oder mehr Richtungen nahezu das gleiche Trägheitsmoment, so müssen die Messungen in zwei zueinander senkrechten Richtungen durchgeführt werden. Gemessen wird in der Stabmitte, in der Nähe der Stabenden und, falls erforderlich, noch zwischen diesen Stellen. Als Meßgeräte finden vornehmlich Leuner-Uhren Verwendung, die bei hoher Ablesegenauigkeit genügend große Meßwege besitzen. Ermittelt werden beim Knickversuch:

1. Die Bewegung der verschiedenen Meßpunkte in den beiden Meßebenen zur Bestimmung der Biegelinie,
2. die Zusammendrückung des ganzen Stabes,
3. der Beginn des bleibenden Ausknickens,
4. die Höchst- oder Knicklast, unter der der Stab unaufhaltsam ausknickt.

4. Der Biegeversuch

Kennzeichnend für den Biegeversuch gegenüber dem Zug- und Druckversuch ist das gleichzeitige Auftreten von Zug- und Druckspannungen, zu denen bei den meisten Belastungsfällen noch Schubspannungen hinzukommen. Während nämlich beim Zug- und Druckversuch die Formänderungen durch Einzelkräfte hervorgerufen werden, sind beim Biegeversuch Kräftepaare wirksam. Bei dem in Abb. 30 dargestellten Belastungsfall ruft die am freien Ende des eingespannten Stabes angreifende Einzelkraft P stets eine gleich große Gegenkraft Q hervor. Beide Kräfte bilden im Abstand x ein Kräftepaar mit dem Moment $M = P \cdot x$. Diesem äußeren Moment hält das gleich große

Moment eines im Stab sich ausbildenden Kräftepaares das Gleichgewicht. Es ruft im oberen Teil des Stabquerschnitts Zugkräfte, im unteren Teil Druckkräfte hervor. Zwischen beiden Querschnittsteilen liegt die „neutrale Faserschicht", in der weder Druck- noch Zugkräfte auftreten. Die Gültigkeit des Hookschen Gesetzes vorausgesetzt, ergibt sich eine lineare Verteilung der Spannungen nach Abb. 31, deren Größe

$$\sigma_z = \frac{M_b \cdot e_z}{I}; \qquad \sigma_d = \frac{M_b \cdot e_d}{I}$$

ist, wobei σ_z und σ_d die Randspannungen auf der Zug- und Druckseite, M_b das Biegemoment, I das äquatoriale Trägheitsmoment und e_z bzw. e_d die Abstände der äußersten Faser von der neutralen Faserschicht sind. Da I/e gleich dem Widerstandsmoment W und bei sym-

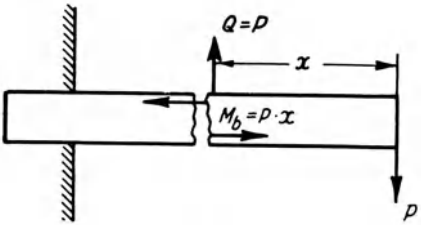


Abb. 30.
Kräfte am einseitig eingespannten Stab, belastet durch Einzelkraft am freien Ende

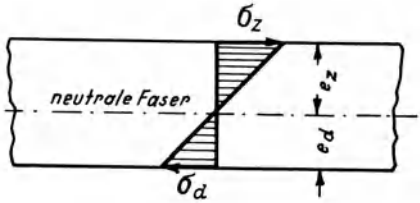


Abb. 31. Spannungsverteilung im Querschnitt eines innerhalb des elastischen Bereichs auf Biegung beanspruchten Stabes

metrischen Querschnitten $e_z = e_d$ ist, ergibt sich für die in der Werkstoffprüfung üblichen Querschnitte (Kreis, Vierkant usw.) die Randspannung zu

$$\sigma = \frac{M_b}{W}. \tag{1}$$

Für die Durchführung von Biegeversuchen wird aus versuchstechnischen Gründen im allgemeinen der in Abb. 32 dargestellte Belastungsfall gewählt. Die größte Biegespannung tritt bei dieser Versuchsanordnung in der Mitte der Probe auf. Sind P die Einzelkraft und l die Stützweite, so ist das größte Biegemoment

$$M_{b\,max} = \frac{P \cdot l}{4}, \tag{2}$$

die höchste auftretende Randspannung

$$\sigma_{max} = \frac{M_{b\,max}}{W} = \frac{P \cdot l}{4 \cdot W}, \tag{3}$$

die größte Durchbiegung

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot l^3}{E \cdot I} = \frac{1}{12} \cdot \frac{\sigma_{max} \cdot l^2}{E \cdot e}. \tag{4}$$

Die Belastung wird beim Biegeversuch entweder unmittelbar durch Gewichte aufgebracht, oder die Versuche werden in Universalprüfmaschinen durchgeführt. Damit die Versuche nicht durch zusätzliche

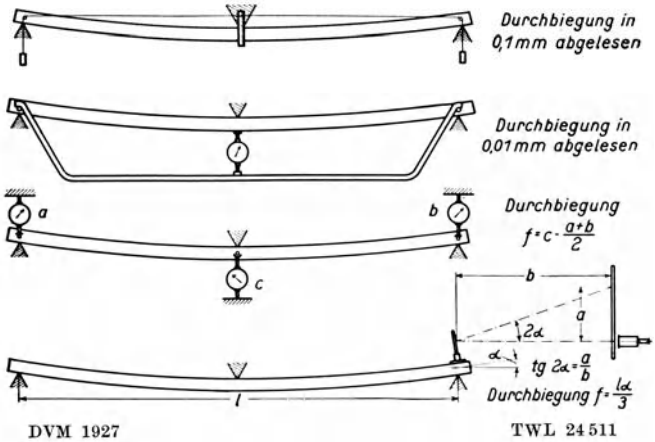


Abb. 32. Biegeversuch, Messung der Formänderung

Reibung der Probestäbe an den Auflagern beeinflußt werden, verwendet man abgerundete Widerlager oder drehbare Auflagerrollen. Aus dem gleichen Grunde werden auch die Druckstücke abgerundet. Die Durchbiegung wird grundsätzlich in der neutralen Faserschicht gemessen. Als Meßgeräte kommen vornehmlich Zeiss-Uhren zur Anwendung. Die gebräuchlichsten Meßverfahren zeigt Abb. 32. In der untersten Skizze ist ein Verfahren dargestellt, bei dem an Stelle der Durchbiegung der Winkel gemessen wird, um den sich die Probestabenden beim Durchbiegen des Stabes heben. Für den Durchbiegungswinkel α gilt nach der Elastizitätstheorie die Gleichung

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{P \cdot l^2}{16 \cdot E \cdot I}. \tag{5}$$

Nach Gleichung (4) ist die Durchbiegung f in Stabmitte

$$f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I},$$

d. h. die Durchbiegung f kann mit Hilfe des Durchbiegungswinkels α errechnet werden.

$$f = \frac{l \cdot \operatorname{tg} \alpha}{3}. \tag{6}$$

Die Messung des Durchbiegungswinkels wird mit Hilfe von festen Spiegeln durchgeführt, die zweckmäßig in der neutralen Faserschicht des Stabes über den Auflagern angebracht werden. Die Drehung der Spiegel wird wie beim Spiegelfeinmeßgerät nach Martens an Skalen mit Hilfe von Fernrohren abgelesen. Ist a die Skalenablesung und b der Skalenabstand, dann ist

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{a}{b}$$

(2α ist bedingt durch die reflektierende Wirkung des Spiegels). Da für kleine Winkel $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$ (Winkel im Bogenmaß gemessen) gesetzt werden kann, so ist

$$f = \frac{l \cdot \alpha}{3} = \frac{l \cdot a}{6b}.$$

Als reine Güteprobe für formänderungsfähige Werkstoffe kommt der Biegeversuch selten zur Anwendung. Sein Verlauf ähnelt dem des Zugversuchs, man findet auch hier Proportionalitäts-, Elastizitäts- und Fließgrenze. Da die Ergebnisse jedoch von der Querschnittsform und der Stützweite abhängig sind, ergeben nur Versuche an geometrisch ähnlichen Stäben vergleichbare Werte.

Am häufigsten wird der Biegeversuch bei der Prüfung von Gußeisen angewendet. Der Zugversuch gibt hier infolge Fehlens von Dehnung und Einschnürung keinen Aufschluß über die unterschiedliche Zähigkeit der verschiedenen Gußeisensorten. Dagegen kann beim Biegeversuch aus der Durchbiegung des Probestückes im Augenblick des Bruches auf die Zähigkeit des Werkstoffs geschlossen werden. DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 108 und A 110, enthalten alle erforderlichen Angaben über Probenahme, Probestäbe und Versuchsdurchführung. Danach wird der Regelversuch an getrennt gegossenen unbearbeiteten Probestäben von $d = 30$ mm Durchmesser und 650 mm Länge bei

einer Stützweite von $20\,d = 600$ mm durchgeführt. Die Durchbiegung im Augenblick des Bruches wird auf 0,1 mm aus der Bewegung des Druckstückes gemessen. Die Belastung im Augenblick des Bruches ist auf 10 kg genau anzugeben. Die Messung der Durchbiegung auf 0,1 mm ist hinreichend genau, da bei Biegeversuchen bereits im elastischen Gebiet die Durchbiegungen erheblich größer sind als die entsprechenden Verlängerungen beim Zugversuch. Für einen Stab von $d = 2\,e = 30$ mm Durchmesser und $l = 600$ mm Meßlänge ergibt der Vergleich zwischen der Durchbiegung f beim Biegeversuch und der Verlängerung Δl beim Zugversuch, gleiche Spannungen vorausgesetzt, z. B. folgendes:

$$f = \frac{1}{12} \cdot \frac{\sigma \cdot l^2}{E \cdot e} \qquad \text{(Biegeversuch)},$$

$$\Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E} \qquad \text{(Zugversuch)},$$

$$f = \frac{1 \cdot l}{12 \cdot e} \cdot \Delta l = \frac{1 \cdot 600}{12 \cdot 15} \Delta l,$$

$$f \approx 3{,}3\,\Delta l.$$

Die aus einer angegossenen Leiste oder aus dem Gußstück herausgearbeiteten Proben sollen einen Durchmesser von 10 mm und eine Länge von 220 mm haben. Diese Stäbe werden bei einer Stützweite von 200 mm geprüft, die Durchbiegung wird auf 0,05 mm genau gemessen. Für beide Stababmessungen soll die Biegefestigkeit, d. h. die Spannung, bei der der Bruch eintritt, auf 0,5 kg/mm² angegeben werden. Zur Berechnung der Biegefestigkeit dient die aus der Elastizitätslehre abgeleitete Formel

$$\sigma_{bB} = \frac{P \cdot l}{4 \cdot W}\,[\text{kg/mm}^2]$$

(für den kreisförmigen Querschnitt ist $W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}\,[\text{mm}^3]$). Der Elastizitätsmodul des Werkstoffs kann aus der elastischen Durchbiegung f, der zugehörigen Belastung P und dem Trägheitsmoment I des Stabquerschnitts berechnet werden:

$$E = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot f \cdot I}\,[\text{kg/mm}^2]$$

(für den kreisförmigen Querschnitt ist $I = \frac{\pi\, d^4}{64}\,[\text{mm}^4]$).

5. Scher- und Lochversuche

Während beim Zug- und Druckversuch die Kraft senkrecht zum Probenquerschnitt in Richtung der Stabachse wirkt und Normalspannungen hervorruft, greifen beim Scherversuch die äußeren Kräfte in der Querschnittsebene senkrecht zur Stabachse an und erzeugen Schubspannungen. Je nachdem, ob die Probe in einem Querschnitt oder gleichzeitig in zwei Querschnitten durchgeschert wird, spricht man von einschnittiger oder zweischnittiger Scherung. Die ermittelte Festigkeit wird bewußt nicht als Schubfestigkeit, sondern als Scherfestigkeit bezeichnet, da unabhängig von der Art der Versuchsanordnung neben den Schubspannungen auch Biegespannungen aufreten. Unter Annahme gleichmäßiger Spannungsverteilung über dem ganzen Querschnitt gilt

$$\tau = \frac{P}{F}.$$

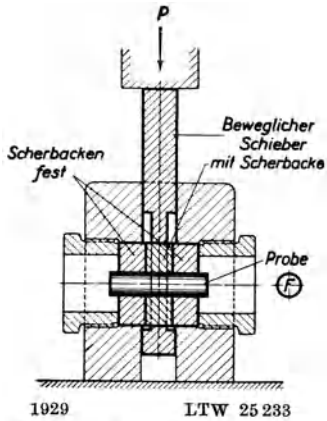


Abb. 33. Zweischnittiger Scherversuch. Scherspannung $\tau = \frac{P}{2F}$

Das übliche Prüfverfahren ist das zweischnittige, da es eine sichere Führung der Messer bei gleichzeitiger sicherer Probenlagerung gestattet. Die Versuche werden an zylindrischen Proben in einer Vorrichtung durchgeführt, die entweder durch Druck oder Zug betätigt wird. Für das zweischnittige Gerät sind im Normvorschlag DVM A 141 Ausführungsformen enthalten. Die in Abb. 33 dargestellte Vorrichtung besteht aus einem Gehäuse, in dem drei auswechselbare, kreisrunde Scherbacken mit zylindrischer Bohrung nebeneinander angeordnet sind. Die beiden äußeren Backen liegen fest, die mittlere sitzt in einem beweglichen Schieber. Vor dem Versuch wird die Scherprobe in die Bohrung der drei Scherbacken eingeführt. Mit Hilfe der beiden großen Verschlußmuttern werden die seitlichen Scherbacken so eingestellt, daß der Schieber mit der mittleren Backe eben noch zwischen ihnen gleiten kann. Die Vorrichtung wird als Druckkörper in eine Prüfmaschine eingebaut. Es wird die Belastung P

bestimmt, bei der die Probe durchschert. Die Scherfestigkeit des untersuchten Werkstoffs ist dann

$$\tau_{aB} = \frac{P}{2F} = \frac{P}{2\,\frac{\pi d^2}{4}}\ [\mathrm{kg/mm^2}],$$

wenn d der Probendurchmesser in mm ist. Zwischen Scherfestigkeit und Zugfestigkeit besteht für formänderungsfähige Werkstoffe die angenäherte Beziehung

$$\tau_{aB} = 0{,}8\,\sigma_{zB}.$$

Die Bestimmung der Scherfestigkeit ist besonders wichtig für die Beurteilung von Nietwerkstoffen. Allerdings ergaben neuere Untersuchungen an Leichtmetallnietdraht eine starke Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Prüfgeschwindigkeit, so daß vergleichbare Ergebnisse nur bei Einhaltung einer bestimmten Schergeschwindigkeit zu erwarten sind [26].

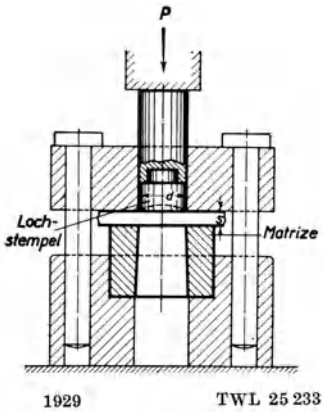


Abb. 34. Lochversuch. Lochfestigkeit $\tau = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot s}$

Bei Blechen läßt sich der Scherversuch nicht durchführen. An seine Stelle tritt der Lochversuch. Während das Scheren die Trennung eines Körpers durch Zerschneiden bewirkt, wird beim Lochen ein der Stempelgröße entsprechendes Stück herausgeschert, d. h. die Schnittfläche ist beim Lochversuch nicht eben, sondern zylindrisch. Ist P die zum Durchscheren erforderliche Kraft, d der Stempeldurchmesser und s die Probendicke, dann ist die Lochfestigkeit

$$\tau_l = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot s}\ [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Lochversuche werden mit einer Vorrichtung gemäß Abb. 34 durchgeführt. Sie enthält im Unterteil eine Matrize, im Oberteil wird ein Stempel geführt, in dessen unterem Ende der eigentliche Lochstempel sitzt. Durch die seitlich angeordneten Bolzen werden beide Teile der Vorrichtung in bestimmter Lage zueinander gehalten. Die Versuchsergebnisse sind abhängig von dem Verhältnis zwischen Stempel- und

Matrizendurchmesser, der Form der Stempelstirnfläche (eben oder ausgehöhlt) und der Probendicke. Als Güteprobe findet der Lochversuch nur bei der Prüfung dünner Bleche Anwendung.

6. Der Verdrehversuch

Ein an einem Ende eingespannter Rundstab ist auf Verdrehen beansprucht, wenn an seinem freien Ende ein Kräftepaar wirkt, dessen Ebene senkrecht zur Stabachse steht. Das äußere Drehmoment ruft dabei eine Verdrehung der Stabquerschnitte hervor, wodurch die ursprünglich parallel zur Stabachse verlaufenden geraden Längsfasern die Form von Schraubenlinien annehmen. Ursprünglich ebene Querschnitte bleiben dagegen eben. Nach Abb. 35 wird der spitze Winkel zwischen der durch Verdrehen entstehenden Schraubenlinie und der Erzeugenden des Zylinders als Schiebung γ bezeichnet. In einem beliebigen Querschnitt wird zwischen dem Radius eines Punktes der ursprünglichen und dem der verschobenen Faserlage ein Winkel ψ gebildet. Der Verdrehwinkel ψ ist demnach die im Bogenmaß gemessene gegenseitige Verdrehung zweier zur Achse senkrechter paralleler Querschnitte im Abstand l. Für die Längeneinheit wird die Verdrehung als Drillung $\vartheta = \psi/l$ bezeichnet. Aus dem Verdrehwinkel ψ ergibt sich nach Abb. 35 durch die Beziehung

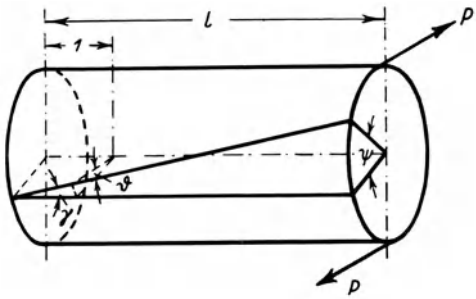


Abb. 35. Beziehungen zwischen Schiebung und Verdrehwinkeln

$$\gamma \cdot l = \psi \cdot \frac{d}{2}$$

die Schiebung zu

$$\gamma = \frac{\psi \cdot d}{2 \cdot l}. \tag{1}$$

Die Schub- oder Verdrehspannung τ, die durch das Drehmoment M_d im Stabquerschnitt erzeugt wird, wächst mit dem Abstand von der Stabachse. Auf einem Kreis um die Achse herrschen jedoch gleiche

Spannungen. Für die Berechnung und den Versuch ist wie beim Biegeversuch die Spannung in den Randfasern maßgebend. Die Schiebungen γ und die zugehörigen Schubspannungen τ sind ähnlich wie bei Körpern mit Normalspannungen im elastischen Bereich nahezu proportional. Das Verhältnis von Spannung zu Schiebung ergibt den Schub- oder Gleitmodul

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \tag{2}$$

Der Kehrwert des Gleitmoduls G wird als Schubzahl β bezeichnet

$$\beta = \frac{\gamma}{\tau} \cdot \tag{3}$$

Der Gleitmodul G ist mit dem Elastizitätsmodul E durch die Gleichung

$$G = \frac{E}{2} \cdot \frac{m}{(m+1)} \tag{4}$$

verknüpft, worin m die Poissonsche Zahl bedeutet, die erfahrungsgemäß zwischen 3 und 4 schwankt. Angenähert gilt also $G = 0{,}38\,E$.

Die Versuche werden an Proben mit kreis- oder kreisringförmigem Querschnitt durchgeführt. Dann gilt für den elastischen Bereich die Gleichung

$$\tau = \frac{M_d \cdot \frac{d}{2}}{I_p} \cdot \tag{5}$$

Hierin ist τ die größte Randspannung, M_d das Drehmoment, I_p das polare Trägheitsmoment und d der Durchmesser des Probestabes. Für den Kreis ist

$$I_p = \frac{\pi\, d^4}{32},$$

so daß die Gleichung (5) übergeht in

$$\tau = \frac{16 \cdot M_d}{\pi \cdot d^3} \cdot \tag{6}$$

Wie beim Zugversuch die Dehnung ε, so wird beim Verdrehversuch die Schiebung γ in Abhängigkeit von der Spannung bestimmt. Die Aufzeichnung der Schiebung γ in Abhängigkeit von der Schubspannung τ

ergibt Kurven, die bis zum Erreichen der Höchstspannung denen des Zugversuchs ähnlich sind. Ein Spannungsabfall vor dem Bruch — entsprechend dem Einschnürvorgang beim Zugversuch — tritt nicht ein. Wohl aber lassen sich charakteristische Spannungsgrenzen feststellen, die wie beim Zugversuch als Proportionalitäts-, Elastizitäts- und Fließgrenze (0,2-Grenze) bezeichnet werden.

Zur Bestimmung der Schiebung γ mißt man am einfachsten den Verdrehwinkel ψ, s. Gleichung (1). Bei Grobmessungen, die für größere Verdrehwinkel in Frage kommen, wird eine kreisförmige Skale mittels Spitzschrauben und Ring konzentrisch am Probestab befestigt. Der ebenfalls mit Ring und Spitzschrauben in der Entfernung l befestigte gekröpfte Zeiger gibt dann bei Belastung oder nach Entlastung die gesamte bzw. bleibende Verdrehung an, s. Abb. 36. Für Feinmessungen werden zwei Spiegel im Abstande l_0 am Probestab befestigt (s. Abb. 37). Das Drehmoment $M_d = P \cdot r$ bewirkt nach Anheben des Waagenhebels in die horizontale Lage (Nullstellung) eine Verdrehung der Stabquerschnitte und damit eine Drehung der Spiegel, für die an den Skalen die Werte a und b abgelesen werden. Die entsprechenden Drehwinkel des Stabes, φ_1 und φ_2, ergeben sich aus den Skalenablesungen a und b und dem Skalenabstand A wie folgt:

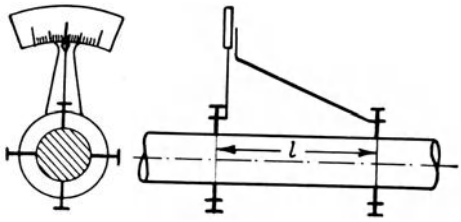


Abb. 36. Grobmessung der Verdrehung mit Zeiger und Skale (schematisch)

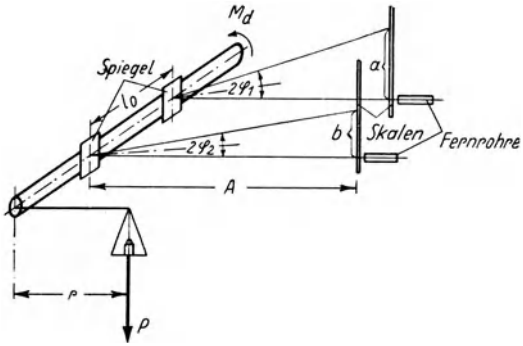


Abb. 37. Feinmessung der Verdrehung mit Spiegel und Fernrohr (schematisch)

$$\operatorname{tg} 2\,\varphi_1 = \frac{a}{A}; \qquad \operatorname{tg} 2\,\varphi_2 = \frac{b}{A}\,.$$

Da für Elastizitätsmessungen nur sehr kleine Winkel φ in Frage kommen, kann — ähnlich wie beim Spiegelfeinmeßgerät von Martens — mit genügender Annäherung gesetzt werden:

$$\varphi_1 = \frac{a}{2A}; \quad \varphi_2 = \frac{b}{2A}.$$

Aus dem Unterschied $\varphi_1 - \varphi_2$ findet sich der Verdrehwinkel für die Meßlänge l zu

$$\psi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{a-b}{2A}.$$

Mit den beim Feinmeßversuch meßbaren Größen ergibt sich dann die Schiebung durch Einsetzen in Gleichung (1) zu

$$\gamma = \frac{(a-b)\,d}{2\,l_0 \cdot 2\,A}.$$

Bei der Versuchsausführung ist folgendes zu beachten: Bestimmte Beziehungen zwischen Stabdurchmesser und Meßlänge sind nicht fest-

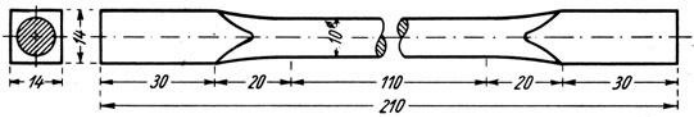


Abb. 38. Probestab für Verdrehversuche

gelegt. Abb. 38 zeigt eine im Staatlichen Materialprüfungsamt, Berlin-Dahlem, benutzte Probestabform. Die Versuche werden auf sogenannten Torsionsmaschinen durchgeführt. Die Einspannung des Probestabes erfolgt in drehbaren Gehäusen, von denen das eine zur Erzeugung der Verdrehung z. B. über ein Zahnradvorgelege angetrieben wird, während am anderen das auf die Probe wirkende Drehmoment mittels Hebel- oder Neigungswaage gemessen wird, s. Abb. 39. Um zusätzliche Biegebeanspruchungen zu vermeiden, müssen die Gehäusemitten genau mit der Stabachse übereinstimmen. Die Einspannvorrichtung muß so ausgebildet sein, daß in ihr keine zusätzlichen Verdrehungen auftreten können. Eine Abgrenzung der Meßlänge durch Ringmarken ist wegen der Kerb-Empfindlichkeit torsionsbeanspruchter Proben zu vermeiden. Zur Berechnung der Verdrehfestigkeit dient die aus der Elastizitätslehre abgeleitete Formel

$$\tau_t = \frac{16 \cdot M_d}{\pi \cdot d^3} \; [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Formänderungsfähige Werkstoffe können vor dem Bruch mehr oder weniger zahlreiche Verdrehungen ertragen. Die Höhe der Verdrehfestigkeit ist dann abhängig von der Verdrehgeschwindigkeit. Für die Beurteilung derartiger Werkstoffe ist daher in erster Linie die Fließgrenze maßgebend. Normalerweise verteilt sich die Verdrehung gleichmäßig über die ganze Länge des Stabes. Verformt sich die Probe nicht

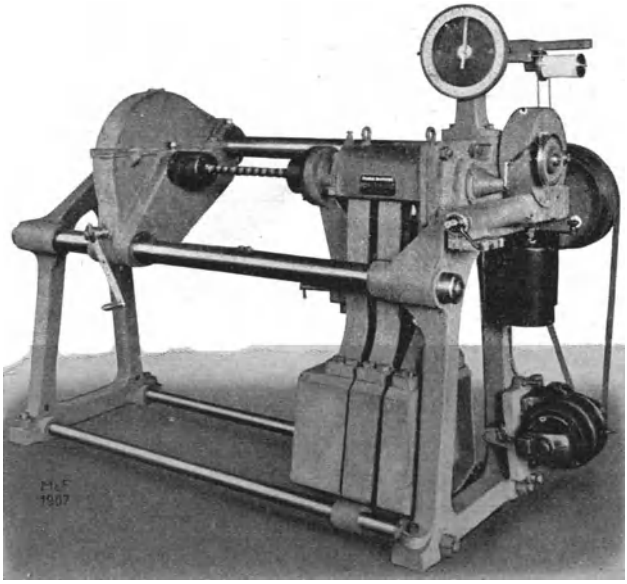


Abb. 39. Torsionsmaschine mit Neigungswaage
(Bauart Mohr & Federhoff)

gleichmäßig, so ist dies ein Zeichen für Ungleichmäßigkeit des Werkstoffs. Der Bruch erfolgt bei spröden Werkstoffen (Gußeisen) oft auf einer Schraubenfläche, die etwa 45° zur Stabachse geneigt ist. Formänderungsfähige Probestäbe zeigen als Bruchform eine ebene Fläche, die senkrecht zur Stabachse liegt, oder Aufspaltungen in Richtung der Stabachse. Hier wird also der Bruch überwiegend durch Schubspannungen hervorgerufen, während bei spröden Werkstoffen die Bruchform auf das Zusammenwirken von Schub- und Normalspannungen zurückzuführen ist.

B. Festigkeitsprüfung bei schlagartiger Beanspruchung

Bei den Festigkeitsprüfungen mit ruhender Beanspruchung steht den Werkstoffen für die Formänderungsarbeit eine verhältnismäßig lange Zeit zur Verfügung. Zur Beurteilung des Verhaltens der Werkstoffe bei stoßweiser Beanspruchung können daher die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung bei ruhender Beanspruchung nicht herangezogen werden. Um das Verhalten der Werkstoffe bei schlagartiger Beanspruchung kennenzulernen, werden Schlagfestigkeitsprüfungen vorgenommen. Die Versuche werden in Fallwerken oder Pendelschlagwerken durchgeführt, wobei das Gewicht eines frei fallenden bzw. um eine Achse schwingenden Körpers auf die ruhende Probe wirkt. Die verschiedenen Schlagfestigkeitsprüfungen unterscheiden sich wie die Prüfverfahren mit ruhender Beanspruchung durch die Angriffsrichtung der Kraft. Es werden Schlagversuche bei Beanspruchung der Proben auf Zug, Druck und Biegung durchgeführt. Bei den in Fallwerken durchgeführten Schlagstauch- und Schlagbiegeversuchen werden die Proben durch das Gewicht eines Fallbären, der aus bestimmter Höhe fällt, beansprucht. Das Maß für die zur Wirkung kommende Kraft ist das Produkt aus Bärgewicht und Fallhöhe, die Schlagarbeit. Der Bewertung des Werkstoffs wird die bis zum Bruch bzw. ersten Anriß aufgewendete Arbeit und die durch eine bestimmte Schlagarbeit hervorgerufene Stauchung bzw. Durchbiegung zugrunde gelegt. Die Formänderung der Versuchsstücke wird beim Schlagstauch- und Schlagbiegeversuch nach jedem einzelnen Schlag gemessen. Schlagbiegeversuche werden vor allem der Beurteilung von Eisenbahnmaterial (Schienen, Radreifen, Lokomotivachsen) zugrunde gelegt. Als reine Güteprüfung sind die in Fallwerken durchgeführten Schlagversuche von untergeordneter Bedeutung.

Eine große Bedeutung dagegen hat der auf Pendelschlagwerken durchgeführte Kerbschlagversuch [29], [18] erlangt. Der Kerbschlagversuch ist ein Schlagbiegeversuch, der vorwiegend mit Stahl durchgeführt wird. Die Beobachtung, daß ein Stahl, der bei Festigkeitsprüfungen mit ruhender Beanspruchung gutes Formänderungsvermögen zeigt, bei schlagartiger Beanspruchung und Vorhandensein von Kerben mitunter praktisch völlig verformungslos bricht, gab den Anstoß zur Entwicklung dieses Prüfverfahrens. Durch den Kerbschlagversuch soll also die Neigung der Werkstoffe zum Trennungsbruch untersucht

werden, der ohne warnende Verformung eintritt und daher sehr gefährlich ist. Beim Versuch liegt die in der Mitte gekerbte Probe bei vorgeschriebener Auflagerentfernung auf zwei Widerlagern des Pendelschlagwerks. Der um eine waagerechte Achse schwingende Pendelhammer schlägt mit der gehärteten Hammerschneide gegen die dem Kerb gegenüberliegende Stelle der Probe. Festgestellt wird die zum Durchschlagen der Probe verbrauchte Schlagarbeit. Die Ursprungsarbeit muß so bemessen sein, daß die Probe mit einem Schlag zerstört wird. Als Kerbschlagzähigkeit wird die auf den Querschnitt am Kerbgrund

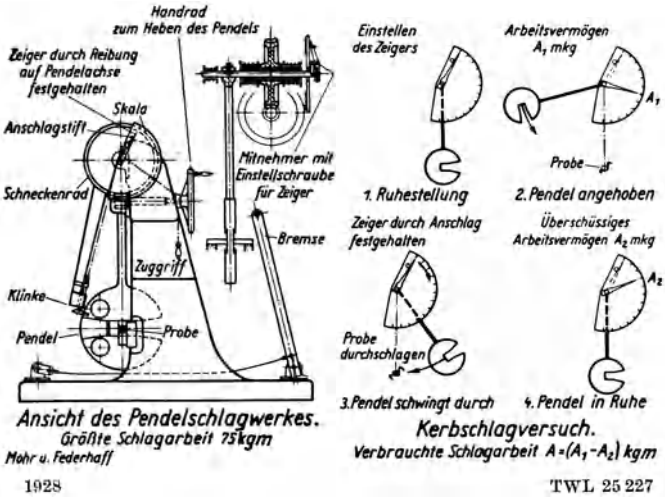


Abb. 40. Pendelschlagwerk und Kerbschlagversuch

bezogene verbrauchte Schlagarbeit bezeichnet. Da die Ergebnisse der Kerbschlagversuche stark von den Versuchsbedingungen beeinflußt werden, sind in dem Versuchsbericht anzugeben: Art, Abmessungen und Versuchstemperatur der Probe, Ursprungsarbeit, verbrauchte Schlagarbeit, Kerbschlagzähigkeit, sowie Form und Aussehen der Bruchfläche.

Auf Vorschlag des DVM sind zur Zeit als Prüfmaschinen für die Normproben Pendelschlagwerke nach Charpy von 10 bis 30, 75 und 250 kgm größter Schlagarbeit in Gebrauch, s. Abb. 40 und 41. Die gebräuchlichsten Probenformen zeigt Abb. 42. Der Pfeil deutet die Schlagrichtung an. Der Kerb wird entweder durch Bohren und Auf-

sägen oder durch Fräsen bzw. Schleifen hergestellt. Die Probe nach Abb. 42a wird als Charpy-Probe bezeichnet und ist für 75 kgm-Pendelschlagwerke bestimmt. Die Probe nach Abb. 42b ist nach DIN Vornorm,

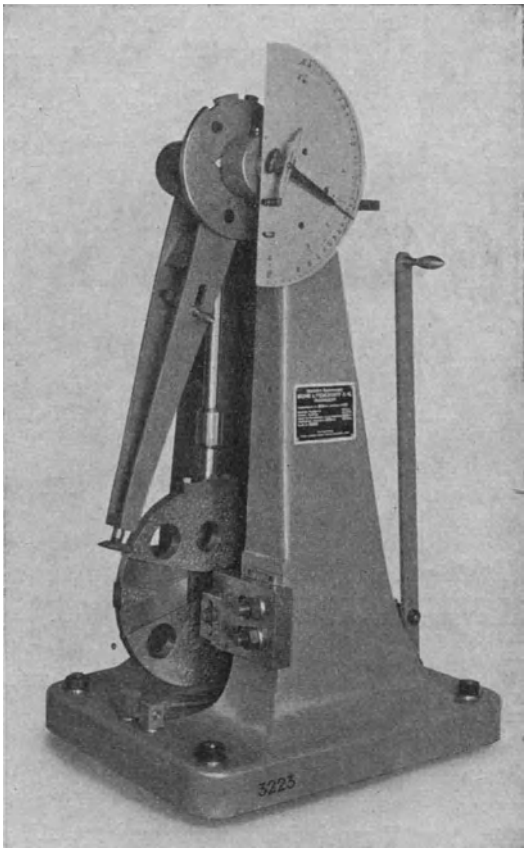


Abb. 41. Pendelschlagwerk von 30 kgm größter Schlagarbeit (Bauart Mohr & Federhoff)

DVM-Prüfverfahren A 115 vorgesehen. Dieses Normblatt enthält auch die wichtigsten Angaben über die Durchführung des Kerbschlagversuchs. Danach ist für die DVM-Probe ein Pendelschlagwerk von 10 bis 30 kgm größter Schlagarbeit zu benutzen. Für Stahlguß empfiehlt sich die Charpy-Probe mit einer Dicke $b = 30$ mm, um einen möglichst

großen Raumanteil dieses grobkristallinen Werkstoffs zu erfassen. Für Bleche ist eine Dicke b gleich der Blechdicke üblich, so daß die Walzhaut erhalten bleibt. Im übrigen wird die DVM-Probe wegen ihres geringen Werkstoffbedarfs bevorzugt.

Das Maß für die Beurteilung der Werkstoffe nach dem Kerbschlagversuch ist die spezifische Schlagarbeit, d. h. die für 1 cm² des zerstörten Querschnitts verbrauchte Schlagarbeit. Sie wird als Kerbschlagzähigkeit a_k bezeichnet und hat die Dimension kgm/cm². Es werden zwei Bruchformen unterschieden: der Trennungsbruch von körnigem Aussehen (kleine Kerbschlagzähigkeit) und der Verformungsbruch von sehnigem Aussehen (hohe Kerbschlagzähigkeit).

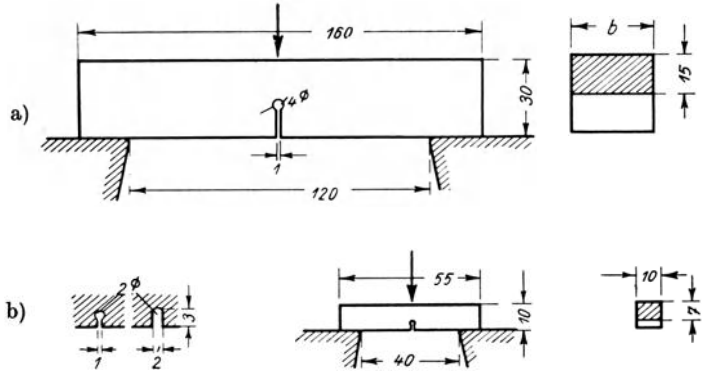


Abb. 42. Kerbschlagproben
a) Charpy-Probe, b = 30 mm; b) DVM-Probe

Die Ergebnisse des Kerbschlagversuchs können keine Konstruktionsunterlage bilden, da sie keinen Aufschluß über das Verhalten der Werkstoffe im elastischen Bereich geben. Da aber beim Stahl die Kerbschlagzähigkeit stark von der Formgebung und Warmbehandlung abhängt, ist der Kerbschlagversuch zur Nachprüfung der richtigen Walz-, Schmiede- und Wärmebehandlung, zur Feststellung der Empfindlichkeit des Stahles gegen Altern und seiner Neigung zur Anlaßsprödigkeit gut geeignet.

Brüche im Betrieb werden nur selten durch einmalige heftige Stöße verursacht, häufiger dagegen durch vielmals wiederholte schwächere Stöße. Um diese Art der Beanspruchung versuchstechnisch zu erfassen, werden Dauerschlagversuche durchgeführt. Bestimmt wird die

Dauerschlagfestigkeit auf sogenannten Dauerschlagwerken. Abb. 43 zeigt in schematischer Darstellung ein Universal-Zwillings-Dauerschlagwerk der Bauart Krupp. Das Schlagwerk besteht im wesentlichen aus einem Hammer, der an einer Nockenwelle hängt. Bei jeder Umdrehung der Nockenwelle fällt der Hammer einmal auf die Probe. Die Nockenwelle des Hammerantriebs ist mit einem Zählwerk verbunden und bewegt gleichzeitig über ein Verbindungsgestänge den Mitnehmer der Biegeprobe. Der Biegeprobe kann so zwischen zwei Schlägen eine Drehung bis zu 180° erteilt werden. Die Versuche werden mit zweckmäßig gestaffelter Schlagarbeit durchgeführt und die Zahl der bis zum Bruch ertragenen Schläge aufgezeichnet. Als Dauerschlaghaltbarkeit gilt die größte Schlagarbeit, die dauernd ohne Bruch ertragen wird. Versuche mit nur einer Schlagarbeit, bei denen die größte Schlagzahl als Maß der Dauerfestigkeit gilt, stellen nur ein rohes Vergleichsverfahren dar. Da Biegeproben aus weichen Werkstoffen an der Schlagstelle örtlich stark verformt werden, versieht man diese Proben mit einer umlaufenden Nut. Man verhindert so, daß der beanspruchte Querschnitt von der Hammerbahn getroffen wird. Die ermittelten Werte beziehen sich dann auf gekerbte Proben.

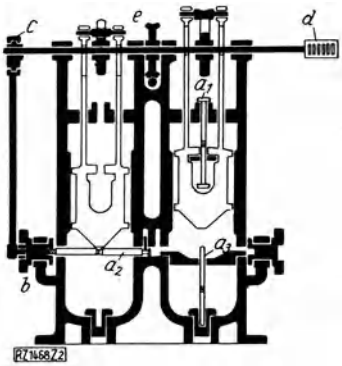


Abb. 43.
Universal-Zwillings-Dauerschlagwerk

a_1 = Probe für Zugversuch, a_2 = Probe für Biegeversuch, a_3 = Probe für Stauchversuch, b = Schaltwerk, c = Exzenter, d = Zählwerk, e = Antrieb

(Aus: VDI-Zeitschrift, Bd. 72, VDI-Verlag G. m. b. H., Berlin)

C. Festigkeitsprüfung bei schwingender Beanspruchung[1])

Fast alle Konstruktionsteile sind nach Größe oder Richtung wechselnden, oft wiederholten Beanspruchungen, sogenannten Dauerbeanspruchungen ausgesetzt. Die Festigkeitsprüfungen bei ruhender Beanspruchung ergeben selbst bei Einschaltung eines großen Sicherheitsfaktors keine einwandfreien Konstruktionsunterlagen für schwingend

[1]) [12, 14, 21].

beanspruchte Maschinenteile. Will man sicher konstruieren, so muß man die Dauerfestigkeit der Werkstoffe bzw. die Dauerhaltbarkeit der Konstruktionsteile auf versuchstechnischem Wege ermitteln.

Unter der Dauerbeanspruchung σ_d versteht man eine Anstrengung des Werkstoffs, die sich oftmals wiederholend zwischen einer Oberspannung σ_0 und einer Unterspannung σ_u verändert. Eine derartige Beanspruchung kann auch durch eine ruhende Mittelspannung σ_m mit überlagerter Wechselspannung vom Spannungsausschlag $\pm\sigma_a$ dargestellt werden, s. Abb. 44. Dann ist:

$$\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a,$$

worin unter Berücksichtigung des Vorzeichens für σ_0 und σ_u

$$\sigma_m = \frac{\sigma_0 + \sigma_u}{2},$$

$$\sigma_a = \pm \frac{\sigma_0 - \sigma_u}{2}$$

ist. Die größte Oberspannung, die ein Werkstoff bei fortgesetztem Spannungswechsel gegen eine bestimmte Unterspannung eben noch dauernd erträgt, ohne zu brechen, heißt seine Dauerfestigkeit. Je nach der Art der Beanspruchung (Zug-Druck, Biegung oder Verdrehung) gibt es verschiedene Gruppen von Dauerfestigkeiten. In den einzelnen Gruppen unterscheidet man je nach der Lage von σ_0 und σ_u zur Nullachse, d. h. je nachdem die Spannung nur ihre Größe ändert oder nach Größe und Richtung wechselt, zwei große Bereiche:

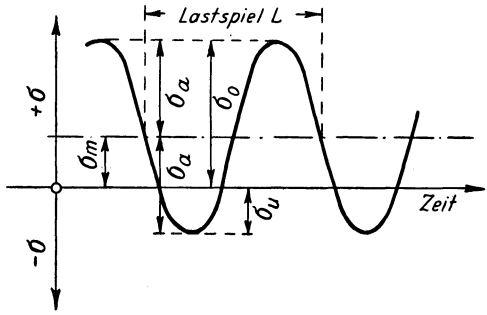


Abb. 44. Schema einer Dauerbeanspruchung

1. den Schwellbereich, wo σ_0 und σ_u gleiches Vorzeichen haben und σ_m gleich oder größer als σ_a ist,
2. den Wechselbereich, wo σ_0 und σ_u verschiedene Vorzeichen haben und σ_m kleiner als σ_a ist.

Die Dauerfestigkeit wird zweckmäßig bis auf drei innerhalb dieser Bereiche liegenden Sonderfälle ausgedrückt durch:

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A,$$

worin nach der Begriffsbestimmung für die Dauerfestigkeit σ_A der Spannungsausschlag für eine ganz bestimmte Mittelspannung σ_m ist. Die drei Sonderfälle ergeben sich aus folgender Überlegung:

1. $\sigma_0 = -\sigma_u$. Die Spannung wechselt zwischen entgegengesetzt gleichgroßen Werten. Die Belastungsart wird als Wechselbelastung, die zugehörige Dauerfestigkeit als Wechselfestigkeit σ_W bezeichnet.
2. $\sigma_0 = 0$ oder $\sigma_u = 0$. Der Spannungswechsel findet zwischen einem positiven oder negativen Größtwert und dem Kleinstwert Null statt. Die Beanspruchung schwillt also dauernd von Null aus an und sinkt wieder auf Null zurück. Die zugehörige Dauerfestigkeit wird als Schwellfestigkeit (Ursprungsfestigkeit) σ_U bezeichnet.
3. $\sigma_0 = \sigma_u$. Bei diesem Grenzfall haben die Belastungswechsel aufgehört und die Belastung ist zur ruhenden Dauerbelastung geworden. Man bezeichnet sie als Dauerstandbelastung. Die zugehörige Dauerfestigkeit heißt Dauerstandfestigkeit.

Die Begriffsbestimmung für die Dauerfestigkeit setzt grundsätzlich eine unendliche Lastspielzahl N voraus (Lastspiel L oder Periode s. Abb. 44). Es ist jedoch üblich, je nach den Umständen die Dauerfestigkeit für begrenzte Lastspielzahlen festzustellen, da entsprechende Versuche gezeigt haben, daß ein Werkstoff dauerfest ist, wenn er eine bestimmte Anzahl von Lastspielen ohne Bruch ertragen hat. Für Stahl genügen im allgemeinen $N = 10 \cdot 10^6$, für Metalle $N = 100 \cdot 10^6$ Lastspiele. Wiederholte Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit werden nur in beschränkter Anzahl ertragen. Die für eine gegebene kleinere Lastspielzahl noch gerade ertragene Höchstbeanspruchung bezeichnet man als Zeitfestigkeit. Diejenige Lastspielzahl, die ein Konstruktionsteil bei gegebener Belastung gerade noch erträgt ohne zu brechen, wird Beanspruchungshöchstzahl oder Lebensdauer genannt.

Zur Kennzeichnung der Versuchsbedingungen ist dem Zeichen für die Dauerfestigkeit stets die Zahl der Lastspiele anzufügen, für die die Dauerfestigkeit gilt. Der Frage der Prüfgeschwindigkeit kommt dabei keine übermäßige Bedeutung zu, da sich herausgestellt hat, daß bei kleineren Proben, bei denen sich Massenkräfte nicht störend bemerkbar machen können, der Frequenzeinfluß unbedeutend ist (Frequenz f in Hertz = Lastspielzahl in der Sekunde). Die Beanspruchungsart wird durch den Zeiger b für Biegung, z für Zug-Druck und τ an Stelle von σ

bei Dauerverdrehversuchen gekennzeichnet. Die Wechselbiegefestigkeit eines Stahls wird also z. B. wie folgt ausgedrückt:

$$\sigma_{W\,b\,10\cdot 10^6} = \pm 20\ \mathrm{kg/mm^2}.$$

Bei der Mehrzahl der Dauerprüfmaschinen für Zug-Druck, Biegung und Verdrehung können Versuche im Schwell- und Wechselbereich ausgeführt werden. Allen diesen Prüfmaschinen sind zwei Vorrichtungen gemeinsam: Die Ausschaltvorrichtung, die die Anlage beim Bruch der Probe außer Betrieb setzt und das Zählwerk, das die bis zum Bruch der Probe ertragene Lastspielzahl anzeigt. Neben den genannten Prüfmaschinen gibt es noch eine Reihe von Sonderprüfmaschinen, bei denen der Prüfvorgang den tatsächlichen Betriebsverhältnissen möglichst weitgehend angepaßt ist.

Die Versuchsdurchführung, die in jedem Fall einwandfrei die Dauerfestigkeit ergibt, beruht auf dem von Wöhler entwickelten Verfahren. Mehrere bezüglich Werkstoff, Gestaltung und Bearbeitung völlig gleichwertige Proben werden nacheinander einer Dauerbeanspruchung unterzogen. Bei der ersten Probe wird die Oberspannung σ_0 bzw. der Spannungsausschlag $\pm\sigma_a$ so gewählt, daß sie bei niedriger Lastspielzahl bricht. Bei jeder weiteren Probe wird die Dauerbeanspruchung bei gleichem σ_u so weit verringert, daß die letzte Probe nach einer bestimmten Lastspielzahl noch nicht gebrochen ist. Man tastet sich also gewissermaßen an die Dauerfestigkeit heran. Für jede Probe wird die bis zum Bruch ertragene Lastspielzahl N bestimmt. Die Werte für σ_0 und N werden zweckmäßig in ein Schaubild mit logarithmisch geteilter Abszisse N und linear geteilter Ordinate σ eingetragen. Die einzelnen Versuchspunkte lassen sich dann meist zu der sogenannten Wöhlerlinie anordnen. Streuen sie stark, so läßt sich das Streufeld durch zwei Wöhlerlinien abgrenzen. Von der Stelle an, wo die Wöhlerlinie einen waagerechten Verlauf nimmt, ist kein Bruch mehr zu erwarten. Da die Oberflächenbeschaffenheit der Proben die Versuchsergebnisse stark beeinflußt, wird die Dauerfestigkeit an glatten polierten Proben ermittelt. Die Einflüsse der Oberfläche und der Form werden an entsprechend hergestellten Proben festgestellt.

Abb. 45 zeigt ein Dauerfestigkeitsschaubild[1]), wie es dem Konstrukteur als Grundlage für die Wahl der zulässigen Spannung

[1]) Das Dauerfestigkeits-Schaubild ist den Arbeitsblättern des Fachausschusses für Maschinen-Elemente beim VDI entnommen. Diese Arbeitsblätter enthalten alle erforderlichen Angaben über Entstehung und Benutzung der Schaubilder sowie ein ausführliches Schrifttumsverzeichnis.

bei den verschiedenen Beanspruchungsarten zur Verfügung steht. Als Abszisse ist jeweils die Mittelspannung σ_m, als Ordinate die zugehörige Oberspannung σ_0 und die Unterspannung σ_u der Dauerfestigkeit aufgetragen. Es ergeben sich so für jede Beanspruchungsart zwei Begrenzungslinien. Die unter 45° gezogene Mittellinie stellt die Vorspannung dar, um die die Dauerbeanspruchung schwingt. Als Grenze für die Oberspannung ist jeweils die Fließgrenze des Werkstoffs eingetragen. Im Nullpunkt des Achsenkreuzes liegt somit die Wechselfestigkeit; zwischen dem Nullpunkt und dem Schnittpunkt der Unterspannung mit der Abszisse der Wechselbereich und rechts davon der Schwellbereich. Da die Dauerfestigkeitsschaubilder auf Grund von Versuchen an polierten Proben zusammengestellt werden, müssen Form- und Oberflächeneinflüsse nachträglich berücksichtigt werden (Angaben hierüber finden sich in den Arbeitsblättern).

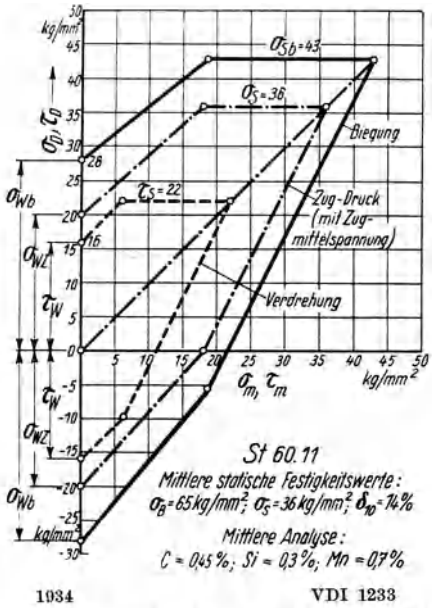


Abb. 45. Dauerfestigkeits-Schaubild für St 60.11

D. Härteprüfung

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Festigkeitsprüfungen in erster Linie Verfahren zur Prüfung der Gleichmäßigkeit verschiedener Lieferungen darstellen. Da infolge der Probenherstellung ein erheblicher Zeit- und Kostenaufwand erforderlich ist, wurden für die laufende Kontrolle Prüfverfahren entwickelt, die keine Anfertigung besonderer Probestäbe erfordern, sondern gestatten, fertige und halbfertige Werkstücke zu prüfen ohne sie zu zerstören. Zu diesen Prüfverfahren gehört auch die Härteprüfung [35], [40]. Für die Bestimmung der Härte wurde

eine Vielzahl von Prüfverfahren entwickelt, von denen besonders die „Eindringverfahren" Eingang in die Praxis gefunden haben. Während sich eine allgemeine Begriffsbestimmung für die Härte nicht geben läßt, gilt für diese Gruppe von Prüfverfahren als Härte der Verformungswiderstand, den der Werkstoff dem Eindringen eines härteren Körpers in seine Oberfläche entgegensetzt. Als Maß dieses Widerstandes und damit der Härte wird bei den Eindringverfahren die Größe der durch die Beanspruchung erzeugten bleibenden Verformung angesehen. Je nach der Form des eindringenden Körpers, der Art der Belastung und der Probenbeschaffenheit wird man daher verschiedene Ergebnisse erhalten. Selbst die bei einem bestimmten Verfahren ermittelten Härtezahlen sind nur technologische Vergleichswerte. Aus diesem Grunde ist es auch nur mit großen Einschränkungen möglich, durch unterschiedliche Härteprüfverfahren ermittelte Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Wenn Vergleichswerte gefordert werden, müssen diese Beziehungen, die dann wiederum nur für den geprüften Werkstoff in dem vorliegenden Zustand gelten, versuchstechnisch ermittelt werden.

1. Eindringverfahren [34]

a) Der Kugeldruckversuch nach Brinell [33]. In den zu prüfenden Werkstoff, der an der Prüfstelle eben und sauber bearbeitet ist, wird eine gehärtete Stahlkugel von bestimmtem Durchmesser mit einer bestimmten Kraft eingedrückt. Hierdurch entsteht ein kugelförmiger Eindruck, dessen Größe der Härte umgekehrt proportional ist. Der Durchmesser des Eindrucks wird nach Entlastung mit Hilfe einer Lupe oder eines Meßmikroskops ausgemessen und dient zur Bestimmung der Oberfläche des Kugeleindrucks nach der Gleichung

$$O = \pi d h = \frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D}{2} \sqrt{D^2 - d^2}.$$

In dieser Gleichung bedeutet D den Kugeldurchmesser und d den Eindruckdurchmesser. Als Maß der Härte gilt der Quotient aus der beim Eindrücken der gehärteten Stahlkugel angewandten Belastung P und der Oberfläche O des erzeugten bleibenden Eindrucks. Die Brinellhärte H ist also

$$H = \frac{P}{O} \, [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Die gebräuchlichsten Kugeldurchmesser sowie genaue Vorschriften über die Versuchsausführung bei Bestimmung der Brinellhärte enthält DIN 1605, Bl. 3. Danach werden für die Prüfung Kugeln aus gehärtetem Stahl mit Durchmessern von 10, 5 und 2,5 mm benutzt. Zur laboratoriumsmäßigen Prüfung sehr dünner Bleche werden auch Kugeln mit 1,25 und 0,625 mm Durchmesser angewandt. Bei der Prüfung muß die Belastung stoßfrei und gleichmäßig aufgebracht und 30 Sekunden auf ihrem Endwert belassen werden. Bei Lagermetallen und Warmhärteprüfungen (Härteprüfung nach Brinell bei Temperaturen bis 400° s. DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren 132) genügt jedoch diese Belastungsdauer nicht, um den unter der Last eintretenden Fließvorgang zu beenden. Für diese Prüfungen ist daher eine Belastungsdauer von 3 Minuten vorgeschrieben. Der Eindruckdurchmesser wird in zwei zueinander senkrechten Richtungen auf 0,01 mm ausgemessen [36]. Die Belastung muß so gewählt werden, daß der Durchmesser des Kugeleindrucks $d = 0{,}2$ bis $0{,}5\,D$ wird. Für Kugeln mit verschiedenen Durchmessern erhält man nur dann die gleichen Härtewerte, wenn die zugehörigen Belastungen sich wie die Quadrate der Kugeldurchmesser verhalten, s. Tabelle 2, senkrechte Spalte.

Tabelle 2

Kugeldurchmesser D mm	Belastungen P in 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

Die Wahl des Kugeldurchmessers richtet sich nach der Art des zu prüfenden Werkstoffs (große Kugeln für grobkristalline Stoffe, damit nicht nur einzelne harte oder weiche Kristalle erfaßt werden) und der Probendicke. Grundsätzlich soll die Eindringtiefe der Kugel nicht größer sein als 10 % der Probendicke (die Eindringtiefe beträgt etwa $^1/_7$ des Eindruckdurchmessers). Auf keinen Fall darf auf der Unterseite der Probe nach dem Versuch eine Druckstelle sichtbar sein.

Die Brinellhärte ist infolge der Kugelform des Eindringkörpers abhängig von der Eindringtiefe und erreicht bei einem bestimmten Eindruckdurchmesser ihren Größtwert. Bei jedem Werkstoff werden daher für zu niedrige und zu hohe Belastungen zu kleine Härtewerte

gefunden. Die üblichen Belastungen für die verschiedenen Werkstoffe sind in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser D in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3

Belastung	$30\,D^2$	$10\,D^2$	$5\,D^2$	$2{,}5\,D^2$
Werkstoff . . .	Stahl und Gußeisen	Nichteisen-Schwermetalle und Leichtmetalle: Knetlegierungen	Nichteisen-Schwermetalle und Leichtmetalle: Gußlegierungen	Lagermetalle

Das Kennzeichen für die Härte ist H. Aus dem Vorhergesagten ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Angabe von Ergebnissen des Kugeldruckversuchs nach Brinell die Verhältnisse bei der Prüfung genau zu kennzeichnen. Nach DIN 1605, Bl. 3 werden zur Kennzeichnung der Versuchsbedingungen Kugeldurchmesser, Belastung und Belastungsdauer angefügt, z. B. gilt für die Versuchsbedingungen:

$$D = 5\text{ mm},\ P = 125\text{ kg},$$
$$\text{Belastungsdauer 30 Sekunden}$$

das Kurzzeichen H 5/125/30. Der Regelversuch H 10/3000/30 wird mit H_n bezeichnet.

Für die Berechnung der Brinellhärte sind vom DVM „Tafeln zur Ermittlung der Härte nach Brinell" herausgegeben worden. Aus diesen Tafeln können für die einzelnen Kugeldurchmesser und Kugelbelastungen die zu bestimmten Eindruckdurchmessern gehörenden Härtewerte unmittelbar abgelesen werden.

Wegen der Einfachheit der Versuchsausführung und Auswertung lag es nahe, einen Zusammenhang zwischen den Kennziffern der Festigkeitsversuche und der Härte zu suchen. Nach eingehenden Untersuchungen steht jedoch heute fest, daß eine bestimmte allgemeingültige Beziehung nicht besteht. Nur für Stahl und Duraluminium besteht eine angenäherte Beziehung zwischen Härte und Zugfestigkeit, und zwar ist bis zu $H_n \approx 400$ kg/mm²

$$\sigma_{zB} \approx 0{,}35\,H.$$

Der so errechnete Wert der Zugfestigkeit ist jedoch, um Mißverständnisse zu vermeiden, mit dem Zusatz zu versehen: „aus der Härte errechnet".

Bei der Prüfung sehr harter Werkstoffe ($H_n > 400$ kg/mm²) erhält man infolge der Abplattung der Prüfkugel zu kleine Härtewerte.

Bei Benutzung von Spezialkugeln (Widia, Hultgren) tritt die Abplattung erst später ein. Allgemein muß beim Kugeldruckversuch mit einer Streuung der Härtewerte von $\pm 5\,\%$ gerechnet werden. Diese Streuung ist bedingt durch den unterschiedlichen Grad der Verformbarkeit der Werkstoffe (unscharfe Begrenzung der Eindrücke durch Wulstbildung bzw. Einsinken der Ränder) und durch unrunde Eindrücke bei anisotropen Werkstoffen.

b) Die Härteprüfung nach Vickers. Die Vickers- oder Pyramidenhärte H_v ist das Verhältnis der Belastung zur Oberfläche des bleibenden Eindrucks einer vierseitigen Diamantpyramide. Das Prüfverfahren ist grundsätzlich das gleiche wie bei der Durchführung des Kugeldruckversuchs nach Brinell, ermöglicht aber die Prüfung sehr harter Werkstoffe. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 133 enthält alle für die Durchführung der Härteprüfung nach Vickers erforderlichen Angaben.

Der große Vorteil der Härteprüfung nach Vickers liegt darin, daß die ermittelten Härtewerte praktisch unabhängig von der Prüflast sind, da sich infolge der Pyramidenform des Eindringkörpers auch bei verschiedenen Eindringtiefen ähnliche Eindrücke ergeben. Zudem besteht bis etwa 400 Härteeinheiten infolge der günstigen Wahl des Spitzenwinkels der Pyramide mit 136^0 gute Übereinstimmung mit der Kugeldruckhärte. Bei Härtezahlen über 400 Einheiten liegen wegen der Abplattung der Kugel die Brinellwerte unter der Vickershärte.

Im Meßmikroskop erscheint der Vickerseindruck als Quadrat. Die Ecken des Eindrucks sind im Bild sehr scharf. Daher können die Diagonalen d mit großer Genauigkeit auf 0,002 mm ausgemessen werden. Die durch den Grad der Verformbarkeit des Werkstoffs bedingten Verschiedenheiten der Eindrücke (Wulstbildung usw.) stören bei der Ausmessung nicht, da nur konkave oder konvexe Ausbiegungen der Quadratseiten eintreten, während das Eckmaß unverändert bleibt [37]. Maßgebend für die Berechnung der Oberfläche ist der Mittelwert aus beiden Diagonalen. Für die Oberfläche gilt

$$O = \frac{d^2}{2 \cdot \cos 22^0} = \frac{d^2}{1{,}8544}.$$

Die Vickershärte ist:

$$H_v = \frac{P}{O} = \frac{P \cdot 1{,}8544}{d^2}\ [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Als Belastungen kommen Werte von 50 g bis 120 kg je nach der Art des zu prüfenden Werkstoffs in Frage. Die Belastung ist stoß- und schwingungsfrei in etwa 15 Sekunden aufzubringen und 30 Sekunden auf ihrem Höchstwert zu belassen. Die Regelbelastung beträgt 30 kg. Zur Kennzeichnung der angewendeten Belastung ist bei dem Kurzzeichen H_v die Größe der Last anzugeben, z. B. H_v 30. Die Vickershärtewerte werden in der gleichen Weise wie die Werte für die Kugeldruckhärte aus Tafeln entnommen.

Das Verfahren ist für fast alle metallischen Werkstoffe anwendbar. Vorzüglich eignet es sich für oberflächengehärtete Gegenstände, da infolge der Lastunabhängigkeit der Härte die Eindringtiefe ($^1/_7$ der Diagonalen) beliebig eingeschränkt werden kann. Allerdings müssen bei sehr kleinen Eindrücken hohe Ansprüche an die Oberflächenbeschaffenheit der Probe (polieren) gestellt werden. Denn die Meßungenauigkeit steigt mit zunehmendem Härtewert und verringerter Prüflast. Die Dicke der Probe oder der Härteschicht soll mindestens das 1,5fache der Eindruckdiagonalen betragen.

c) Die Härteprüfung nach Rockwell. Die Rockwellhärte wird aus der bleibenden Eindringtiefe e eines genormten Eindringkörpers (Kegel oder Kugel), der in zwei Stufen in die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstücks eingedrückt wird, abgeleitet. Die Maßeinheit für e ist 0,002 mm. Das Prüfverfahren stellt eine Differenz-Tiefenmessung dar. Der Prüfkörper wird mit einer Vorlast auf das zu prüfende Werkstück aufgesetzt (s. Abb. 46a). Die Vorlast P_0 erzeugt einen geringen Eindruck, der kleine Unebenheiten usw. ausgleicht und einen Ausgangspunkt für die Tiefenmessung schafft. Zum Messen der Eindringtiefe dient eine Meßuhr. Die Meßuhr wird unter der Vorlast auf 0 gestellt. Dann wird die Zusatzlast P_1 in etwa 10 Sekunden gleichmäßig steigend aufgebracht (s. Abb. 46b). Nachdem der Fließvorgang beendet ist — erkenntlich am Stillstand des Zeigers der Meßuhr — wird die Zusatzlast abgenommen und der Stand der Meßuhr unter der Vorlast abgelesen (s. Abb. 46c). Würde man unmittelbar die Eindringtiefe e als Maß für die Härte benutzen, dann ergäben große Eindringtiefen hohe Härtewerte. Da dies den herkömmlichen Begriffen von der Härte nicht entspricht, zieht man den Wert für die Eindringtiefe von der Zahl 100 bzw. 130 ab und erhält so — den tatsächlichen Verhältnissen entsprechend — für kleine Eindringtiefen hohe Härtewerte. Um Rechenfehler auszuschalten, sind die Meßuhren so beziffert, daß sie den Wert

(100 — e) bzw. (130 — e) anzeigen, d. h. die Rockwellhärte kann an der Meßuhr unmittelbar abgelesen werden.

Nach DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 103 ist der kugelige Eindringkörper eine gehärtete Stahlkugel von $^1/_{16}''$ Durchmesser. Beim Versuch mit der Stahlkugel (Rockwell B) ist die Vorlast $P_0 = 10$ kg, die Zusatzlast $P_1 = 90$ kg, die Rockwellhärte $B = 130 - e$. Das Kurzzeichen für die Härte ist HR_b.

Gehärtete Teile und hochlegierte Stähle, die dem Eindringen der Stahlkugel zu hohen Widerstand entgegensetzen, werden mit einem

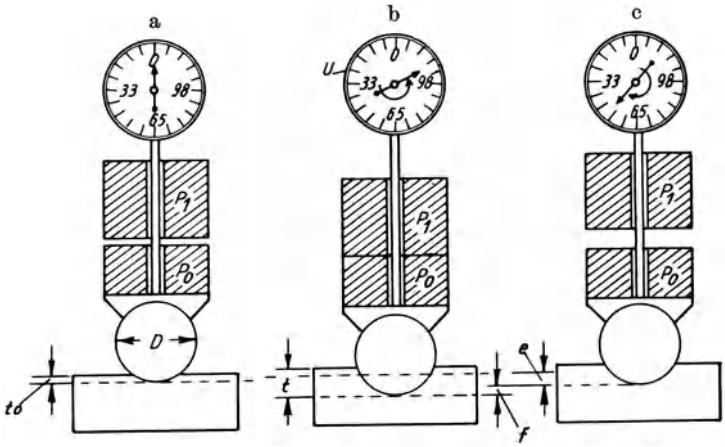


Abb. 46. Schematische Darstellung der Differenztiefenmessung bei Bestimmung der Rockwellhärte B

P_0 = Vorlast = 10 kg, P_1 = Zusatzlast = 90 kg, U = Meßuhr, D = Kugeldurchmesser = $^1/_{16}''$, t_0 = Eindringtiefe unter Vorlast, t = Eindringtiefe unter Gesamtlast, f = Rückfederung nach Entfernen der Zusatzlast, $e = t - t_0 - f$ = gemessene Eindringtiefe in 0,002 mm, Rockwellhärte $B = 130 - e$

Diamantkegel von 120° Spitzenwinkel geprüft, dessen Spitze kugelig mit 0,2 mm Halbmesser gerundet ist. Beim Versuch mit dem Diamantkegel (Rockwell C) ist die Vorlast $P_0 = 10$ kg, die Zusatzlast $P_1 = 140$ kg, die Rockwellhärte $C = 100 - e$. Das Kurzzeichen für die Härte ist HR_c.

Die Gründe für die große Verbreitung der Härteprüfung nach Rockwell waren die Mängel des Kugeldruckversuchs nach Brinell: Die Beschränkung auf einen Meßbereich von etwa 400 Einheiten und die zeitraubende Ermittlung des Härtewertes aus dem Eindruckdurchmesser. Bei Massenprüfungen war die Härteprüfung nach Rockwell insofern noch von besonderem Vorteil, als sich durch Anbringen von

Toleranzmarken an der Meßuhr jedes Ablesen von Zahlenwerten erübrigte. Die genaueren Härtewerte liefert allerdings der Kugeldruckversuch nach Brinell, da der Eindruckdurchmesser etwa sechs- bis siebenmal größer als die Eindringtiefe ist. Außerdem kann bei der Tiefenmessung das Ergebnis durch geringste Verlagerung oder Verformung des Prüfstücks bzw. der Auflagerfläche beeinträchtigt werden. Auch eine Kontrollmöglichkeit, die beim Kugeldruckversuch nach Brinell noch nach Tagen und Wochen gegeben ist, besteht bei der Härteprüfung nach Rockwell nicht, da die Messung der Eindringtiefe an die Prüfmaschine gebunden ist.

Durch die Härteprüfung nach Vickers und die Konstruktion moderner Härteprüfmaschinen mit eingebauter optischer Auswertvorrichtung wurde ein Prüfverfahren geschaffen, daß die Vorteile der Härteprüfung nach Rockwell mit denen der Härteprüfung nach Brinell vereint. Berücksichtigt man den neuesten Stand im Bau von Härteprüfmaschinen, so ergibt sich für alle drei Prüfverfahren bei einer Prüfung auf „Gut" und „Ausschuß" nahezu der gleiche Zeitaufwand. Abb. 47 zeigt eine Kugeldruckschnellpresse der Firma Mohr & Federhaff. Das Prüfstück wird mit Handrad und Spindel bis zur Anlage an die Kugel heraufgeschraubt. Die Belastung wird mit Hebel und Gewichtsplatten erzeugt. Be- und Entlastung erfolgt durch einen Elektromotor. Die eingebaute Meßuhr kann bei laufenden Kontrollen gleichartiger Werkstoffe zur mittelbaren angenäherten Ablesung des Härtewertes benutzt werden.

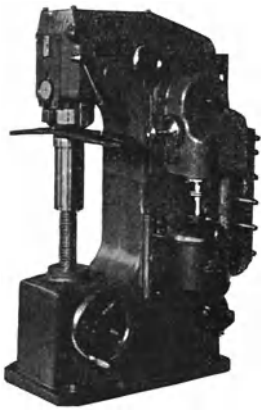


Abb. 47.
Elektrisch betriebene Kugeldruckschnellpresse, Belastung bis 3000 kg (Bauart Mohr & Federhaff)

Der schnellen und mühelosen mikroskopischen Auswertung der Eindrücke dienen die Härteprüfmaschinen mit eingebauter Projektionseinrichtung. Hier können die Eindrücke unter Belassung des Werkstücks in der Prüfmaschine ausgewertet werden. Abb. 48 zeigt die Auswertvorrichtung des Härteprüfers „Briviskop" der Firma Georg Reicherter, Esslingen. Das Erzeugen und Auswerten der Eindrücke wird wie folgt vorgenommen: Nach Einstellen der Prüflast wird der Prüftisch mit dem Werkstück so weit gehoben, daß auf der Mattscheibe

ein sehscharfes Bild der etwa 70fach vergrößerten Prüffläche erscheint. Dann wird durch Druck auf einen Hebel der auswechselbare Prüfkörper (Kugel oder Diamantpyramide) automatisch eingeschwenkt und belastet. Nach der vorgeschriebenen Belastungsdauer wird entlastet, wobei der Prüfkörper selbsttätig aus dem Werkstück ausgehoben und ausgeschwenkt wird; zugleich erscheint das Bild des Eindrucks auf der Mattscheibe. Zum Auswerten des Eindrucks stellt man mit der Rändelschraube am linken und mit der Feinschraube am rechten Eindruckrand bei. Die Größe des Eindrucks ergibt sich dann in 0,1 mm aus der Zahl der vom Eindruck überdeckten Skalenteile, in 0,01 mm

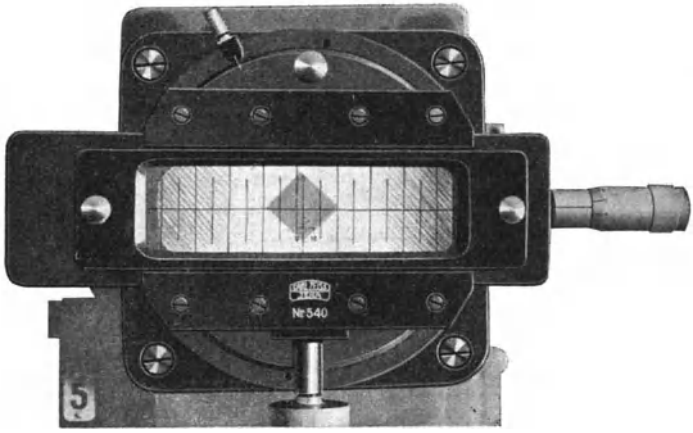


Abb. 48. Auswertvorrichtung des Härteprüfers „Briviskop“ (Bauart Reicherter, Esslingen a. N.)

an dem auf der Mattscheibe angebrachten Maßstäbchen und in 0,001 mm an der Teiltrommel der Feinschraube. Zum Auswerten auf „Gut“ und „Ausschuß“ sind Toleranzstrichplatten vorgesehen, die in den Mattscheibenrahmen eingesetzt werden können.

Abb. 49 zeigt einen Kleinhärteprüfer (Bauart Schopper), eingesetzt in ein Spezial-Meßmikroskop, für Härteprüfungen nach Vickers bei Belastungen von 50 bis 500 g.

Kennzeichnend für die Rockwellhärteprüfer [39] ist die Verspannvorrichtung, die verhindern soll, daß bei schwierig zu prüfenden Werkstücken Verformungen oder Bewegungen des Werkstücks während des Prüfvorganges von der Meßuhr mitgemessen werden und so das Prüf-

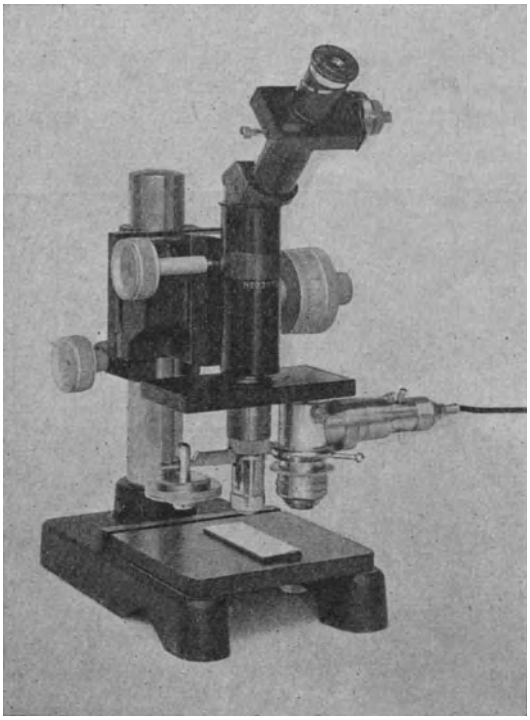


Abb. 49. Kleinhärteprüfer (Bauart Schopper), eingesetzt in ein Spezial-Meßmikroskop, für Härteprüfung nach Vickers bei Belastungen von 50 bis 500 g

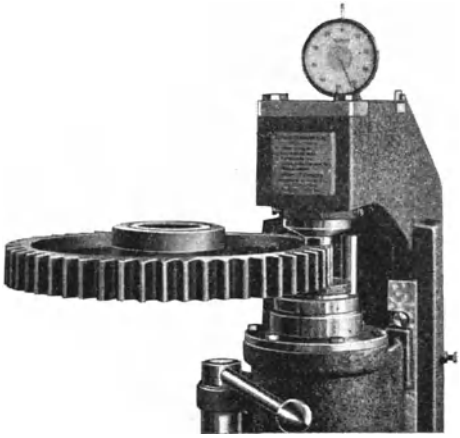


Abb. 50. Prüfung eines Zahnrades in der Originalverspannung „Reicherter, Esslingen a. N."

ergebnis verfälschen. Die Verspannung wird grundsätzlich dadurch erreicht, daß die Probe gegen einen die Prüfspitze umgebenden Hohlzylinder gepreßt wird. Abb. 50 zeigt die Prüfung eines Zahnrades in der Originalverspannung „Reicherter". Im Flugzeugbau (Focke-Wulf) wurde ein Rockwell-Handhärteprüfer entwickelt, der eine Härteprüfung

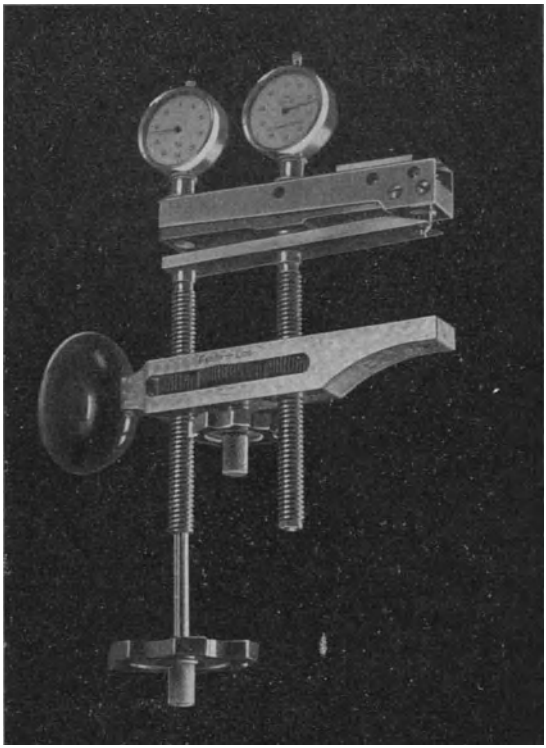


Abb. 51. Focke-Wulf-Rockwell-Handhärteprüfer

Aus: Automobiltechnische Zeitschrift 1938, Heft 12. Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart)

auch dann gestattet, wenn in der Umgebung der zu prüfenden Stelle nur ein geringer freier Raum zur Verfügung steht. Er besteht im wesentlichen aus zwei Teilen (s. Abb. 51):

1. dem eigentlichen Rockwellapparat, einem Hebel aus hochvergütetem Stahl, der den Eindringkörper (Stahlkugel oder Diamantkegel) und die Kraft- und Tiefenmeßvorrichtung trägt;

2. der mit dem Rockwellhebel durch die mittlere Spindel gelenkig verbundenen Vorrichtung zum Festklemmen des Gerätes und zum Aufbringen der Last.

d) Kugelschlagversuche. Eine gehärtete Stahlkugel wird mit einer bestimmten Schlagenergie, die entweder durch einen Schlagbolzen (Schlaghärteprüfer nach Baumann-Steinrück, Fritz Werner A. G.), Hammerschlag (Poldy-Hammer) oder Fallgewicht (Wüst-Bardenheuer, M. von Schwarz) aufgebracht wird, in die ebene Oberfläche der Probe geschlagen. Der Eindruck wird wie beim Kugeldruckversuch nach Brinell ausgewertet. Auf sorgfältige Lagerung und genügende Masse der Proben ist bei den Kugelschlagversuchen zu achten. Trotzdem die Meßgenauigkeit merklich hinter der der Härteprüfmaschinen zurückbleibt, sind die Prüfverfahren für überschlägliche Prüfungen im Betrieb und zur Überwachung der Durchhärtung hinreichend genau.

2. Ritzhärteprüfung

Dieses Härteprüfverfahren ist aus der in der Mineralogie noch heute angewandten Härteprüfung nach Mohs hervorgegangen. Nach Martens werden in die hochglanzpolierte Oberfläche der Probe Striche mit einem gering belasteten Diamantkegel von 90° Spitzenwinkel eingeritzt. Die Strichbreite wird unter dem Komparator mit 1 μ Genauigkeit ausgemessen. Als Maß der Härte gilt nach Martens die Belastung des Diamanten in g, die eine Strichbreite von 10 μ ergibt. Die Ritzhärteprüfung wurde früher zur Prüfung sehr harter Werkstoffe benutzt, ist aber jetzt durch die Härteprüfung nach Vickers verdrängt worden. Heute wird die Ritzhärteprüfung nur noch bei der Härteprüfung dünner galvanischer Überzüge von 1 μ Schichtdicke aufwärts angewandt. Nach einem Vorschlag von Richter [38] gilt hierbei als Ritzhärte die Belastung in 0,01 g eines Diamantkegels mit 120° Spitzenwinkel, die eine Strichbreite von 3 μ ergibt.

3. Rückprall-Härteprüfung

Ein kleiner Hammer mit Diamant- oder Stahlspitze fällt aus bestimmter Höhe auf die Oberfläche des zu prüfenden Werkstücks. Je härter der Werkstoff ist, um so höher prallt der Hammer zurück. Als Maß der Härte gilt die Höhe des Rücksprungs. Bei anderen Geräten

wird ein als Pendel in einer Kreisbahn geführter Hammer verwendet. Die Rückprallhöhe und damit die Härte werden bei neueren Geräten selbsttätig angezeigt („Skleroskop" nach Reindl & Nieberding, Shore; „Pendoskop" nach von Leesen). Abmessungen und Oberflächenbeschaffenheit des untersuchten Werkstücks beeinflussen die Ergebnisse stark, da die Rücksprunghöhe lediglich von den elastischen Eigenschaften des Werkstücks abhängt. Das Prüfverfahren wird mit Vorteil nur zur Bestimmung der Härteunterschiede in sehr großen Werkstücken oder als Vergleichsprüfung bei Werkstücken gleicher Form und Abmessung angewandt.

4. Pendelhärteprüfung

Der Pendelhärteprüfer nach Herbert besteht in der Normalausführung aus einem bügelförmigen Gußkörper von 4 kg Gewicht, der in der Mitte einen Kugelhalter mit einer Diamantkugel von 1 mm Durchmesser trägt. Beim Versuch wird der Härteprüfer mit der Kugel auf das Werkstück aufgesetzt. Ermittelt wird:

1. als Zeithärte H_Z die Zeit, die für 10 einfache Schwingungen erforderlich ist, wenn der Schwerpunkt des Härteprüfers, der im Mittelpunkt der Kugel liegt, um 0,1 mm gesenkt und das Pendel zum Schwingen gebracht wird.
2. die Winkelhärte H_W, bei der das Pendel um 50 Skalenteile geneigt und der Winkel an der Teilung gemessen wird, um den das Pendel nach der anderen Seite ausschlägt.

Die unter 2 bis 4 beschriebenen Prüfverfahren stehen an Bedeutung weit hinter den anderen Härteprüfverfahren zurück. Ihre Anwendung bleibt auf einige Sonderfälle beschränkt.

E. Technologische Prüfungen

Die technologischen Prüfungen sind einfache Versuche, die einen Anhalt dafür geben sollen, ob der Werkstoff im vorliegenden Zustand den geforderten Ansprüchen an Verformbarkeit genügt. Man verzichtet daher bewußt auf die Messung der verformenden Kräfte und der Formänderungen während der Prüfung. Der Werkstoff wird entweder auf Grund der Beobachtungen während des Verformungsvorganges oder des Grades der Verformbarkeit — festgestellt durch einfache Mes-

sungen nach dem Versuch — beurteilt. Durch diese Tatsachen ergibt sich eine unbegrenzte Zahl von Untersuchungsmöglichkeiten. Für die Prüfverfahren, die den Lieferbedingungen als Abnahmeprüfungen zugrunde liegen, bestehen Durchführungsbestimmungen.

1. Faltversuche

Der Faltversuch mit Flach- oder Rundstäben dient zum Nachweis des Formänderungsvermögens der Werkstoffe unter verschiedenen Versuchsbedingungen. So können die Stäbe in verschiedenem Wärmezustand (kalt, blauwarm, rotwarm) und nach verschiedener Wärmebehandlung (ausgeglüht, abgeschreckt, angelassen) geprüft werden. Die Faltversuche bei Raumtemperatur mit Stäben im Zustande der Anlieferung oder nach dem Glühen sind nach DIN 1605, Bl. 4, auszuführen. Bei Flachstäben sind die Kanten auf der Zugseite zu brechen.

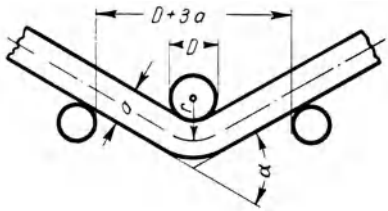


Abb. 52. Faltversuch nach DIN 1605, Bl. 4 *)

*) Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Maßgebend ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Vertrieb, GmbH., Berlin SW 68, erhältlich ist

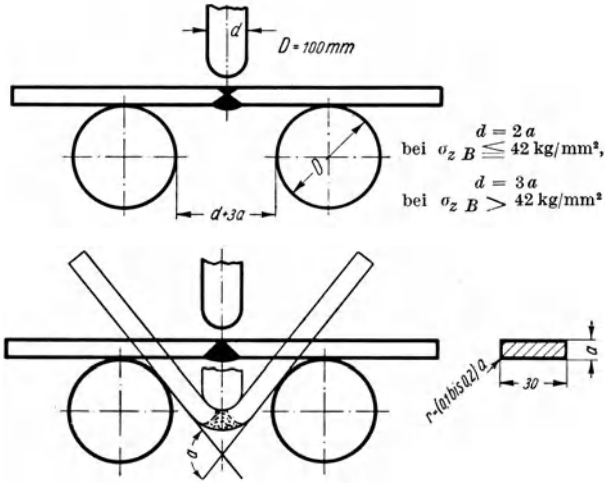


Abb. 53. Faltversuch mit geschweißten Proben nach DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 121 *)

*) Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Maßgebend ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Vertrieb, GmbH., Berlin SW 68, erhältlich ist

Das Falten soll langsam und stetig in einer Presse um einen Dorn von bestimmtem Durchmesser vorgenommen werden. Versuchsanordnung s. Abb. 52. Gebogen wird bis zu einem vorgeschriebenen Biegewinkel α bzw. wird der Biegewinkel festgestellt, bei dem Zugrisse im metallischen Werkstoff auftreten. Ist ein Biegewinkel von 180^0 vorgeschrieben, so werden die Proben zunächst auf einer Presse vorgebogen und dann durch Druck auf die Schenkelenden frei zusammengedrückt, bis beide Schenkel auf einer Zwischenlage von entsprechender Dicke anliegen. Zur Verschärfung der Versuchsbedingungen können die Stäbe mit Gewinde versehen, gelocht oder gekerbt werden. Faltversuche an geschweißten Proben werden nach DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 121, ausgeführt. Die Prüfung wird an Proben mit und ohne Wulst vorgenommen. Die zu drückende Probenseite ist stets zu ebnen, die Kanten auf der Zugseite sind zu brechen. Für den Regelversuch sind Flachstäbe von 30 mm Breite, quer zur Schweißnaht zu entnehmen. Die Prüfung erfolgt nach Abb. 53. Gebogen wird bis zum ersten metallischen Anriß auf der Zugseite. Als Gütemaßstab dient der bei entspannter Probe gemessene Biegewinkel α.

2. Schmiedeversuche

Schmiedeversuche werden bei der Untersuchung von Werkstoffen durchgeführt, die einer Warmformgebung unterzogen werden sollen. Die Prüfverfahren sind daher den wichtigsten Schmiedevorgängen angepaßt. Der einfachste Schmiedeversuch ist der Warmfaltversuch. Er wird an Probestäben von etwa 150 bis 300 mm Länge, deren Breite gleich der vierfachen Dicke sein soll, bei Rot- oder Blauwärme durchgeführt.

Der Ausbreitversuch soll über den Grad der Verformbarkeit durch Hämmern Aufschluß geben. Ein Flachstab, dessen Breite etwa gleich der dreifachen Dicke ist, wird im rotwarmen Zustand mit der Finne eines Schmiedehammers quer bzw. längs ausgeschmiedet, bis Kantenrisse entstehen. Guter Stahl läßt sich etwa auf die dreifache Probenbreite ohne Rißbildung ausbreiten.

Der Stauchversuch wird bei der Prüfung von Niet- und Schraubenmaterial angewandt. Die Prüfung wird an zylindrischen Probekörpern, deren Höhe etwa gleich dem zweifachen Durchmesser ist, ausgeführt. Gestaucht wird im hellrotwarmen Zustand mit dem Hammer bis zum Auftreten von Mantelrissen. Gutes Schmiedeeisen muß sich bis auf ein Drittel der Ausgangshöhe zusammenstauchen

lassen, ohne daß Risse auf dem Umfang des Probekörpers entstehen.

Beim Lochversuch wird ein Blechstück bei Hellrotglut mit einem konischen Dorn in verschiedenen Abständen vom Blechrand gelocht. Dorndurchmesser, Steigung des Dorns und Blechdicke stehen in bestimmtem Verhältnis zueinander. Gemessen wird der kleinste Lochabstand vom Rand des Bleches, bei dem kein Aufreißen eintritt. Eine Verschärfung der Prüfbedingungen wird durch den Stauchlochversuch erreicht, bei der dem Lochen eine Stauchung um einen vorgeschriebenen Betrag vorausgeht.

Ähnliche Beanspruchungen wie die Lochprobe ruft die Aufdornprobe hervor. Der Versuch wird an Flachstäben, deren Breite gleich der fünffachen Dicke s ist, durchgeführt. In die auf Hellrotglut gebrachte Probe wird mit dem Lochhammer ein Loch vom Durchmesser $d = 2\,s$ geschlagen. Das vorgeschlagene Loch wird durch einen Dorn mit der Steigung 1 : 10 auf den doppelten Durchmesser erweitert. Kantenrisse dürfen bei dieser Beanspruchung nicht auftreten.

3. Prüfung von Drähten

Der Hin- und Herbiegeversuch wird zur Bestimmung der Biegefähigkeit von Drähten bis 7 mm Durchmesser durchgeführt. Der Prüfvorgang ist grundsätzlich folgender: Die Drahtprobe wird zwischen Schraubstockbacken eingespannt, deren Kanten nach einem bestimmten Radius abgerundet sind. Das freie Drahtende wird um 90° gegen die senkrechte Lage gebogen, zurückgeführt und dann über die andere Schraubstockbacke gebogen. Die Biegung aus der senkrechten Lage um 90° über eine Schraubstockbacke und zurück in die Ausgangsstellung zählt als eine Biegung. Als Gütemaßstab dient die Anzahl der Biegungen bis zur Vollendung des Bruches. DIN DVM 1211 enthält genaue Angaben über Anwendung, Probenahme, Prüfgerät (Bauart, Biegezylinder, Spannbacken), Vorbereitung der Proben, Zuordnung der Biegezylinder und Drehpunktabstände zu den Drahtdurchmessern usw

Der Verwinde- und Wickelversuch dienen zum Nachweis der Formänderungsfähigkeit und Gleichmäßigkeit des Drahtwerkstoffs. Für den Verwindeversuch wird ein Draht benutzt, dessen Länge etwa gleich dem 100fachen Drahtdurchmesser ist. Das eine Drahtende wird in einem in Längsrichtung verschiebbaren Einspannkopf, das andere Drahtende in einem drehbar gelagerten Einspannkopf gehalten.

Dünne Drähte werden durch Aufbringen einer Zugbelastung leicht vorgespannt. Beide Einspannungen müssen in einer Achse liegen, die gleichzeitig Draht- und Drehachse ist. Die Zahl der Verwindungen bis zum Bruch dient als Gütemaßstab. DIN DVM 1212 enthält nähere Angaben über Anwendung, Probenahme, Prüfgerät und Prüfverfahren.

Beim Wickelversuch wird der Draht in eng aneinanderliegenden Lagen auf einen Draht gleichen Durchmessers oder auf einen Zylinder, dessen Durchmesser in bestimmtem Verhältnis zum Drahtdurchmesser steht, aufgewickelt, oder auch wieder abgewickelt, gerichtet, wieder aufgewickelt usw. Für die Beurteilung des Drahtwerkstoffs ist die Anzahl der Wicklungen bis zum Bruch maßgebend.

Der Wickelversuch wird vielfach auch zur Prüfung von Drähten mit Überzügen herangezogen, wobei sich zeigen soll, ob der Überzug genügend Haftung besitzt oder abblättert. Zur Prüfung der elastischen Eigenschaften von Drähten werden Versuche durchgeführt, bei denen die Rückfederung nach einer Biegung um einen Dorn von bestimmtem Radius bestimmt wird.

4. Prüfung von dünnen Blechen

Bleche, die eine Formgebung durch Ziehen erfahren sollen, müssen eine hohe Kaltverformbarkeit aufweisen. Um einen Anhalt für die Tiefziehfähigkeit zu gewinnen, wird der sogenannte Tiefungsversuch vorgenommen, bei dem ein Blechabschnitt durch einen kugeligen Stößel bis zum ersten Anriß ausgebeult wird. Als Vergleichswert dient die Tiefung, d. i. die Tiefe der Ausbeulung in mm beim ersten Anriß. Zur Erzielung vergleichbarer Versuchsergebnisse werden die Versuche in einer genormten Prüfvorrichtung nach festliegenden Ausführungsbestimmungen durchgeführt (s. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 101). Abb. 54 zeigt einen Blech- und Bandprüfapparat nach Erichsen,

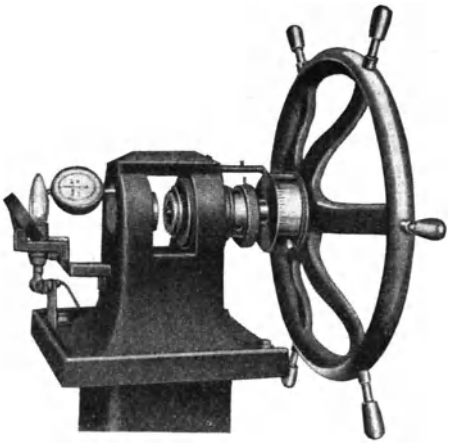


Abb. 54. Blech- und Bandprüfapparat nach Erichsen

mit dem Bleche und Bänder bis 2 mm Dicke geprüft werden können. Er besteht im wesentlichen aus einem Stößel, der Matrize, dem Faltenhalter sowie Spindel und Handrad als Antriebsvorrichtung. Die Spindel dient gleichzeitig zur Messung der Tiefung. Der Stößel des Blechprüfapparates der Bauart Guillery (s. Abb. 55) hat hydraulischen Antrieb. Während bei dem Prüfapparat nach Erichsen das Auftreten des ersten Anrisses mittels eines Spiegels festgestellt wird, kann hier die Probe unmittelbar beobachtet und darüber hinaus auf die eingetretene Rißbildung aus der Bewegung des Manometerzeigers geschlossen werden. Für die wichtigsten Qualitätsbleche ist die vorgeschriebene Mindesttiefung in Abhängigkeit von der Blechdicke kurvenmäßig festgelegt, siehe DIN 1623. In Entwicklung befindet sich ein neues Prüfverfahren — das Keilzug-Tiefungsverfahren — das besonders für im Mehrfachzug zu bearbeitende Bleche aufschlußreiche Ergebnisse zu liefern verspricht [30].

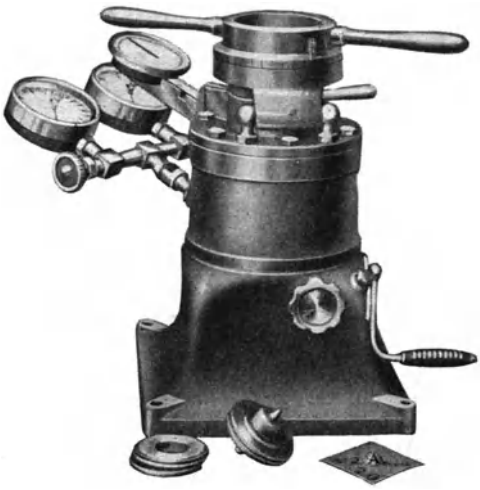


Abb. 55. Blech- und Bandprüfapparat (Bauart Guillery, Roell & Korthaus)

Neben dem Tiefziehversuch werden mit dünnen Blechen an technologischen Prüfungen Falt- und Doppelfaltversuche sowie Hin- und Herbiegeversuche ausgeführt.

5. Prüfung von Rohren

Für die Prüfung von Rohren sind von den interessierten Verbänden und Großabnehmern Abnahmevorschriften vorgesehen, s. a. DIN 1629. Den Beanspruchungen im Betrieb am nächsten kommt der Innendruckversuch. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 104 (Innendruckversuch für Hohlkörper beliebiger Form bis zu einem bestimmten Innendruck) und A 105 (Innendruckversuch für Hohlkörper bis zur

Zerstörung des Probestücks) enthalten genaue Einzelheiten für die Versuchsanordnung und Durchführung. Bei der Prüfung von Rohren werden Abschnitte von der Länge $l = 5\,d$ an beiden Enden in geeigneter Weise verschlossen und in einer Vorrichtung gemäß Abb. 56 unter Druck gesetzt. Als Druckmittel dient vorwiegend Wasser. Auf eine Zerstörung der Rohre wird im allgemeinen verzichtet; nachzuweisen ist die Dichtigkeit bis zu einem bestimmten Innendruck (zwei- oder dreifacher Betriebsdruck, mindestens aber 50 atü), unter dem das Rohr abgehämmert wird.

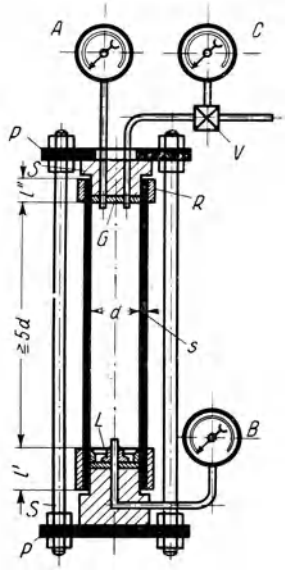


Abb. 56. Innendruckversuch nach DIN Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 105*)

A, B, C = verschiedene Möglichkeiten des Manometeranschlusses, G = Gummidichtung, L = Ledermanschette, P = Einspannplatten, R = Stützring, S = Verschlußstopfen

*) Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Maßgebend ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Vertrieb, GmbH., Berlin SW 68, erhältlich ist

Zum Nachweis guter Verformbarkeit dient der Faltversuch, die Aufweit-, Ring-, Bördel- und Rohrstauchprobe. Der Querfaltversuch wird nach DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 136, ausgeführt. Die Prüfung soll Aufschluß darüber geben, ob oder wie weit ein Rohrabschnitt von etwa 50 mm Länge sich zusammendrücken läßt, ohne Risse zu zeigen. Die Prüfung erfolgt bei Raumtemperatur zwischen zwei parallelen Platten bis zur Auflage auf ein eingelegtes Flacheisen bestimmter Dicke.

Beim Aufweitversuch wird ein kegeliger Dorn mit zylindrischem Fortsatz in einen ausgeglühten Rohrabschnitt mittels Handhammer oder Presse eingetrieben. Der kegelige Teil hat im allgemeinen eine Steigung 1 : 10; der zylindrische Teil wird im Durchmesser entsprechend der verlangten Aufweitung (6 bzw. 10 % des inneren Rohrdurchmessers) bemessen. An den aufgeweiteten Stellen, besonders aber am Rande, dürfen sich weder Risse noch sonstige Beschädigungen zeigen.

Die Ringprobe stellt eine Verschärfung der Aufweitprobe dar. Der Versuch wird an etwa 15 mm hohen Abschnitten abweichend vom Aufweitversuch bis zum Bruch der Probe durchgeführt. Die Ringprobe

dient vorwiegend zum Nachweis des Einflusses einer vorangegangenen Warmbehandlung der Rohre.

Die Eignung des Rohrwerkstoffes für Bördelungen wird durch die Bördelprobe bestimmt. Bei der Versuchsausführung wird der Rohrabschnitt in einen passenden starken Ring gesteckt, aus dem er etwa 15 bis 20 mm herausragt. Durch leichte Hammerschläge gegen die Innenwandung des herausragenden Rohrendes wird dieses um 90° nach außen umgebogen, bis das Rohrende flach auf der Stirnfläche des Ringes anliegt. In den Abnahmevorschriften ist meist neben dem Bördelwinkel die Bördelbreite in Prozent des lichten Rohrdurchmessers angegeben, die ohne Rißbildung erreicht werden soll.

Besonders wertvolle Aufschlüsse über Verformbarkeit und Beschaffenheit der Rohrwerkstoffe ergibt die Rohrstauchprobe, bei der ein Rohrstück von der Länge $l = 2\,d$ so weit gestaucht wird, bis sich nach innen und außen starke Falten bilden.

Einer technologischen Prüfung werden weiterhin besonders Nieten, Schrauben, Muttern, Formstahl und Federn unterzogen. Die Prüfverfahren sind den in der Praxis auftretenden Beanspruchungen weitgehendst angepaßt.

Schrifttum

A. Meßmittel

[1] G. Berndt, Grundlagen und Geräte technischer Längenmessungen. Berlin, Julius Springer, 1929.

[2] F. Rötscher u. R. Jaschke, Dehnungsmessungen und ihre Auswertung. Berlin, Julius Springer, 1939.

[3] Dehnungsmeßgerät mit sehr kleiner Meßstrecke und Anzeige mittels Sperrschicht-Fotozelle (E. Lehr u. H. Granacher). Forschg. Ing. Wes. **7**, Heft 2, VDI-Verlag, Berlin.

[4] Der systematische Fehler der Messung mit dem Martensschen Spiegelapparat (Jensch). Mitt. a. d. St. MPA Berlin-Dahlem, **38**, 1, 1920.

[5] Grundlagen des Messens (Berndt). Die Meßtechnik **16**, Heft 5, 6, 7, 1940.

[6] Meßgeräte für Dehnungsmessungen (Lehr). Der Betrieb **10**, 711, 1931.

[7] Messungen mit dem Glasritz-Dehnungsschreiber der DVL (F. Seewald). Der Betrieb **10**, 725, 1931.

[8] Das Meßwesen. Aufgaben, Entwicklung und künftige Gestaltung (W. Ermlich). Mitt. d. deutsch. Materialprüfungsanstalten, Heft **24**, 1939.

B. Festigkeits- und technologische Prüfungen

[9] Bach u. Baumann, Elastizität und Festigkeit. Berlin, Julius Springer, 1920.

[10] Bach u. Baumann, Festigkeitseigenschaften und Gefügebilder der Konstruktionsmaterialien. Berlin, Julius Springer, 1921.

[11] E. Damerow, Die praktische Werkstoffabnahme in der Metallindustrie. Berlin, Julius Springer, 1934.

[12] O. Graf, Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und Konstruktionselemente. Berlin, Julius Springer, 1929.

[13] E. Siebel, Handbuch der Werkstoffprüfung, 2. Bd.: Prüfung der metallischen Werkstoffe. Berlin, Julius Springer, 1939.

[14] W. Herold, Die Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe. Berlin, Julius Springer, 1934.

[15] E. Lehr, Spannungsverteilung in Konstruktionselementen. Berlin, VDI-Verlag, 1934.

[16] Martens, Handbuch der Materialkunde für den Maschinenbau I. Berlin, Julius Springer, 1898.

[17] Memmler, Materialprüfungswesen, 4. Aufl. Berlin und Leipzig, Walter de Gruyter u. Co., 1930.

[18] Neuber, Kerbspannungslehre. Berlin, Julius Springer, 1937.

[19] Sachs, Grundbegriffe der mechanischen Technologie der Metalle. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1925.

[20] Sachs u. Fiek, Der Zugversuch. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1926.

[21] A. Thum u. W. Buchmann, Dauerfestigkeit und Konstruktion. Berlin, VDI-Verlag, 1932.

[22] Wawrziniok, Handbuch des Materialprüfungswesens, 2. Aufl. Berlin, Julius Springer, 1923.

[23] Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 2. Aufl. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H., 1937.

[24] Dauerbrüche und Dauerstandfestigkeit, Kruppsche Monatshefte, Jg. 13, 1932.

[25] Die Dauerstandsfestigkeit metallischer Werkstoffe und ihre Anwendung durch den Konstrukteur, VDI-Zeitschrift **79**, S. 453, 1935.

[26] Der Einfluß der Prüfgeschwindigkeit und des Scherlochdurchmessers auf die Scherfestigkeit von Leichtmetallnietdraht (E. v. Rajakovicz u. E. Blohm), Aluminium, Jg. 21, S. 219, 1939.

[27] Festigkeit und Materialprüfung (Ludwik), VDI-Zeitschrift **68**, S. 212, 1924.

[28] Maschinen für die Festigkeitsprüfung metallischer Werkstoffe (Deutsch-Fiek), VDI-Zeitschrift, **72**, S. 1173, 1928.

[29] Die Kerbschlagprobe, Entwicklung und Kritik (F. Fettweis) Arch. Eisenhüttenw. **2**, S. 625, 1928/29. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H.

[30] Die Prüfung von Ziehwerkstoffen durch das Keilzug-Tiefungsverfahren (H. Kayseler u. W. Püngel), Mitt. d. Kohle- u. Eisenforsch. **24**, Berlin, Julius Springer, 1939.

[31] Versuche mit einem neuen Dauerstandprüfer über den Verlauf von Zeit-Dehnungs-Schaulinien verschiedener Stähle (H. Esser u. S. Eckhardt), Arch. Eisenhüttenw. **13**, S. 209, 1939/40. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H.

[32] Warmstreckgrenze und Dauerfestigkeit des Stahls, Zeitschr. Stahl u. Eisen, Jg. 52, S. 553, 1932, Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H.

C. Härteprüfung

[33] P. W. Döhmer, Die Brinellsche Kugeldruckprobe. Berlin, Julius Springer, 1925.

[34] Der Kugeldruckversuch nach Brinell, die Härteprüfung mit Vorlast und die Härteprüfung nach Vickers. Ein Handbuch für den Betriebsmann mit Abbildungen, Prüfbeispielen und Tabellen. Bearbeitet von G. Reicherter jr., Esslingen. Berlin, Julius Springer, 1938.

[35] W. Späth, Physik und Technik der Härte und Weiche. Berlin, Julius Springer, 1940.

[36] Einfluß der Beleuchtung bei Ausmessung von Brinelleindrücken (Esser u. Cornelius), Zeitschr. Stahl u. Eisen, Jg. 52, S. 495, 1932. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H.

[37] Fehlerquellen bei der Vickershärteprüfung (H. v. Weingraber), Zeitschr. Werkstattstechnik **32**, S. 361, 1938.

[38] Härteprüfung dünner Überzüge nach dem Ritzhärteverfahren (G. Richter), Zeitschr. f. Metallkde., Jg. 29, S. 355, 1937.

[39] Neuere Härteprüfer (W. Hengemühle), Zeitschr. Stahl u. Eisen, Jg. 56, S. 1017, 1936. Düsseldorf, Verlag Stahleisen m. b. H.

[40] Untersuchungen über Härteprüfung und Härte (E. Meyer), Forschg. Ing. Wes., Heft 65/66. Berlin, Julius Springer, 1909.

Sachverzeichnis

Ableseskale 11.
Anlegemaßstab 8.
Arbeitsvermögen 38.
Aufdornprobe 93.
Aufweiteversuch 96.
Ausbreitversuch 92.

Belastungsgeschwindigkeit 45, 49.
Biegefestigkeit 62.
Biegemoment 59.
Biegeversuch 58 u. f.
Bördelprobe 97.
Brinellhärte 79.
Bruchbelastung, Rechnerische 47.
Bruchdehnung 32, 42.
—, Messung der 43.
Bruchformen 46, 55.
Bruchversuch 47.
Bruchquerschnittsverminderung 32.
—, Messung der 44.

Charpy-Probe 72.

Dauerbeanspruchung 75.
Dauerfestigkeit 75.
Dauerfestigkeitsschaubild 78.
Dauerschlagfestigkeit 74.
Dauerschlagversuch 73.
Dauerschlagwerk 74.
Dauerstandfestigkeit 50.
Dauerstandversuche 50 u. f.
Dehngeschwindigkeit 52.
Dehnung 8, 32.
—, Zeitabhängigkeit der 50.
Dehnungsanteil 36.
Dehnungsmeßgerät nach Lehr 16.
Dehnzahl 36.
Drehmoment 65.
Drillung 65.
Druckfestigkeit 55.
Druckplatten 56.
Druckversuch 54.
Durchbiegung 60, 61, 62.
Durchbiegungswinkel 60, 61.

Eindringtiefe 80, 83.
Eindringverfahren 79 u. f.
Einschnürung 35.
Einschnürdehnung 42.
Einspannkopf 41.
Elastizitätsgrenze, s. a. Spannungsgrenze 36.
Elastizitätsmodul 36, 62.
—, Bestimmung des 46.
Endmaße 3.

Fallwerk 70.
Faltversuch 91.
Faserschicht, Neutrale 59, 60.
Federkraftprüfer 28.
Federmanometer 20.
Federwaage 24.
Feinmeßgeräte 10 u. f.
Festigkeitsprüfung bei
ruhender Beanspruchung 31 u. f.
schlagartiger Beanspruchung 70 u. f.
schwingender Beanspruchung 74 u. f.
Fließgrenze, s. Streckgrenze.
Formänderung 32.
Formänderungsvermögen 31, 36.

Glasritzdehnungsschreiber 18.
Gleichmaßdehnung 42.
Gleitmodul 66.

Hartmannsche Linien 45.
Härteprüfung 78 u. f.
— nach Vickers 82.

Härteprüfung nach Rockwell 83.
Härteprüfmaschinen 85 u. f.
Hebelwaage 25.
Hin- und Herbiegeversuch 93.
Hookesches Gesetz 37.

Innendruckversuch 95.

Keileinspannungen 42.
Kerbschlagversuch 70.
Kerbschlagzähigkeit 71.
Kleinhärteprüfer 86.
Knicklast 57.
Knickversuch 57.
Komparator 5.
Kontrolldruckkörper 27.
Kontrollstäbe 27.
Krafterzeuger 19.
Kraftmesser, Hydraulische 20 u. f.
—, Mechanische 24 u. f.
Kraftprüfer 29.
Kraft-Verformungsschaubild 31.
Kugeldruckhärte s. Brinellhärte.
Kugeldruckversuch 79.
Kugelschlagversuch 89.

Lastspielzahl 76.
Laufgewichtswaage 25.
Lebensdauer 76.
Lochfestigkeit 64.
Lochversuch 64, 93.
Lüdersche Linien 45.
Martens-Kennedy-Apparat 10.

Meßlänge 8, 39, 43.
Meßdosen 22.
Meßfeder 10.
Meßmikroskop 4.
Meßmittel 2 u. f.
Meßuhr 9.
Meßzylinder 22.
Mittelspannung 75, 78.
Mittelwert, Arithmetischer 2.

Neigungswaage 25.
Normalspannung 54, 63.
Normalstab 38.

Nullast 46, 49, 53, 83.
Oberspannung 75, 78.
Ofen, Elektrischer 49, 52.
Okularmeßschraube 7.

Pendelhärteprüfung 90.
Pendelmanometer 22.
Pendelschlagwerk 70, 71.
Poissonsche Zahl 66.
Probestabformen 38 u. f.
Proportionalitätsgrenze 34.
Proportionalstab 38.
Prozentmaßstab 9.
Prüfgeschwindigkeit s. Versuchsgeschwindigkeit.
Prüfung von Drähten 93.
— von dünnen Blechen 94.
— von Rohren 95.
Prüfverfahren 31 u. f.
Pyramidenhärte s. Vickershärte.

Querdehnung 55.
Querschnittsänderung 32.
Querschnittsfläche 32.
Querschnittsvergrößerung 54.
Querschnittsverminderung 32.
Quetschgrenze 55.

Randspannungen 59, 60.
Reckversuch 47.
Reißlänge 47.
Ringprobe 96.
Ritzhärteprüfung 89.
Rockwellhärte 83, 84.
Rockwell-Handhärteprüfer 88.
Rohrstauchprobe 97.
Rutschkegel 56.
Rückprall-Härteprüfung 89.

Schaubildzeichner 9.
Scherfestigkeit 63, 64.
Scherversuch 63.
Schieblehre 3.
Schiebung 65.
—, Messung der 67.
Schlagarbeit 70, 71.
—, Spezifische 73.

Schlagbiegeversuch 70.
Schlagfestigkeitsprüfung 70.
Schlagstauchversuch 70.
Schmiedeversuch 92.
Schraublehre 3.
Schubmodul s. Gleitmodul.
Schubspannung 63, 65.
Schubzahl 66.
Schwellfestigkeit 76.
Seilversuch 47.
Setzdehnungsmesser 15.
Sollwerte 27.
Spannung 31, 32.
—, Wahre 35.
Spannungsausschlag 75.
Spannungs-Dehnungsschaubild 33, 37.
Spannungsgrenze 35.
—-0,2-Grenze 35, 49, 55.
—-0,01-Grenze 36.
Spannungs-Stauchungsschaubild 55.
Spezialmeßmikroskop 6.
Spiegelfeinmeßgerät von Martens 11 u. f.
Stauchlochversuch 92.
Stauchung 54.
Stauchversuch 92.
Streckgrenze 34.
Streuung 2.
Strichmaße 3.

Technologische Prüfungen 90.
Teilmaschinen 4.
Teilung 4, 43.
Tensometer 14.
Tiefungsversuch 94.
Torsionsmaschine 68.
Trägheitsmoment 59, 66.
Trennungsbruch 70, 73.
Trennungswiderstand 36.

Übersetzungsverhältnis:
Dehnungsmeßgerät nach Lehr 16.
Martens-Kennedy-Apparat 11.
Spiegelfeinmeßgerät von Martens 13.
Universalprüfmaschine 24.
Unterspannung 75, 78.
Ursprungsfestigkeit s. Schwellfestigkeit.

Verdrehfestigkeit 68.
Verdrehspannung 65.
Verdrehversuch 65 u. f.
Verdrehwinkel 65.
Verformungsbruch 73.
Verformungswiderstand 31, 36.
Verlängerung 32.
Verschiebemaßstab 9.
Versuchsgeschwindigkeit, Einfluß der 45, 64.
Verwindeversuch 93.
Vickershärte 82.
Vorlast s. Nullast.

Warmstreckgrenze 48.
Warmzugfestigkeit 48.
Wechselfestigkeit 76.
Wickelversuch 94.
Widerstandsmoment 59.
Wöhler-Linie 57.

Zeit-Dehnungsschaulinie 51.
Zeitfestigkeit 76.
Zerreißschaubild 33.
Zugfestigkeit 35.
Zugversuch 32 u. f.
— bei hohen Temperaturen 48 u. f.
Zusammendrückung 54.

Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft

In Vorbereitung befindliche Hefte:

Antweiler, Dr. H. J., Elektrometrische Methoden in der Chemie

Bauder, Prof. Reinhold, Messung von Drehmoment, Leistung und Drehzahl

Blechschmidt, Dr. Erich, Induktivität und Wirkwiderstände

Cordes, Dr. Heinrich, Die chemische Theorie der Explosionen

Dahlke, Dr. Walter, Experimentelle Methoden in der Ultrarotspektroskopie

Dunken, Dr. Heinz, Destillieren, Kristallisieren, Sublimieren

Dunken, Dr. Heinz, Kalorimetrie

Gielessen, Dr. J., Vakuummessung

Harms, Dr. Helmut, Dipolmomente und Polarisierbarkeit

Harms, Dr. Helmut, Die Dichte flüssiger und fester Stoffe

Kast, Prof. Dr. W., Die Streuung der Röntgen- und Elektronenstrahlen an Dämpfen

Matossi, Dr. Frank, Ramaneffekt

Moser, Dr. Helmut, und Tingwaldt, Dr., Thermoelemente

Picht, Prof. Dr. J., Optische Meß- und Prüfmethoden der Wehrtechnik

Philipp, Prof. Dr. K., Meßmethoden der natürlichen und künstlichen Radioaktivität

Potthoff, Dr.-Ing. Karl, Meßtechnik der hohen Wechselspannungen

Rexer, Dr. Ernst, Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Gläsern

Roth, Prof. Dr. Walter, Thermochemische Meßmethoden

Scholz, Dipl.-Chem. Günther, Verfahren zur Herstellung von Nebeln und Rauchen

Schulze, Dr.-Ing. R., Strahlenmeßtechnik

Seybold, Prof. Dr. August, Chromatographische Analyse

Stach, Dr. Erich, Kohlenpetrographische Untersuchungsverfahren

Tomaschek, Prof. Dr., und Deutschbein, Dr., Gitter- und Prismenspektrographen

Voigt, Dr. Ehrhard, Methoden der Konservierung und Untersuchung von Braunkohlenfossilien

Volkmann, Dr. H., Drehung der Ebene des polaren Lichtes

Volkmann, Dr. H., Künstliche Doppelbrechung

Wolf, Prof. Dr. K. L., und Dunken, Dr. H., Oberflächenaktivität und Oberflächenfilme