

711 369
Sammlung Göschen

Materialprüfungswesen
Einführung in die moderne
Technik der Materialprüfungen

Von

Prof. K. Memmler

I

Allgemeine Materialeigenschaften
Festigkeitsversuche -- Hilfsmittel für
Festigkeitsversuche

244 58 Figuren



311

77 36

Sammlung Götschen

Materialprüfungswesen

Einführung in die moderne Technik
der Materialprüfungen

Von

K. Memmler

Professor, Dipl.-Ing.
Abteilungsvorsteher am Staatlichen Material-Prüfungsamte
zu Berlin-Lichterfelde

Erster Teil

**Allgemeine Materialeigenschaften. — Festigkeitsversuche. —
Hilfsmittel für Festigkeitsversuche.**

Dritte, verbesserte Auflage

Mit 58 Figuren



Berlin und Leipzig

Vereinigung wissenschaftlicher Verleger

Walter de Gruyter & Co.

vormals G. J. Götschen'sche Verlagshandlung - J. Guttentag, Verlags-
buchhandlung - Georg Reimer - Karl J. Trübner - Veit & Comp.

1921



CZ-I.174/1

ARCHIWALIA

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht,
von der Verlagshandlung vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

	Seite
Einleitung	7
I. Allgemeine Material-Eigenschaften	11
1. Physikalische Eigenschaften	11
a) Festigkeit	11
b) Formänderungsvermögen	14
c) Härte	21
d) Zähigkeit und Sprödigkeit	21
e) Bearbeitbarkeit oder Bildsamkeit	22
f) Sonstige physikalische Eigenschaften	23
2. Chemische Eigenschaften	24
II. Die Festigkeitsversuche	25
A. Mit stoßfrei gesteigerter Belastung	25
1. Zugversuch	25
a) Begriffsfeststellungen	25
b) Messung der Belastungen. Prüfungsmaschinen. Ein- spannvorrichtungen	29
c) Messung der Längenänderungen	33
d) Beeinflussung der Messungsergebnisse	40
e) Stabformen für Zugversuche	43
f) Verlauf des Zugversuches (Flußeisen)	47
g) Brucherscheinungen, Bruchflächen	53
h) Arbeitsvermögen, Völligkeitsgrad	57
i) Verlauf des Versuches mit Gußeisen, Kupfer usw.	60
2. Druckversuch	62
a) Begriffsfeststellungen	62
b) Verlauf des Druckversuches	64
c) Einspannung	67
d) Probenform	67
3. Knickversuch	68
4. Biegeversuch	72
5. Torsionsversuch	75
6. Scher- und Lochversuche	79
a) Scherversuch	79
b) Lochversuch	82

	Seite
B. Mit stoßweiser Belastung (Schlagversuch) . . .	84
a) Begriffsfeststellung und Versuchsausführung	84
b) Schlagarbeit und Formänderungsmessung	86
c) Beeinflussung der Versuchsergebnisse	88
d) Brucherscheinungen	89
e) Normalfallwerke	90
f) Verschiedene Arten des Schlagversuches	93
C. Dauerversuche	101
D. Technologische Proben	104
a) Begriffsfeststellungen	104
b) Biegeproben	105
c) Schmiedeproben	113
d) Technologische Proben verschiedener Art	114
E. Härteprüfung	117
III. Hilfsmittel für Festigkeitsversuche	126
1. Die Prüfungsmaschinen	126
a) Allgemeines	126
b) Krafterzeuger	127
c) Kraftmessung	132
d) Einige Arten von Prüfungsmaschinen	137
2. Die Meßwerkzeuge	144
a) Allgemeines	144
b) Grobmeßapparate	145
c) Feinmeßapparate	146
3. Kontrolle und Eichung der Hilfsmittel	153
Stichwortverzeichnis	159

Literaturübersicht.

Größere Sammelwerke.

Sonderwerke oder kleinere Sonderabhandlungen sind im Text oder am Schlusse der betreffenden Abschnitte erwähnt.

1. Martens, Handbuch der Materialkunde für den Maschinenbau I. Berlin 1898. J. Springer (im Text kurz „Materialkunde“ genannt).
2. Martens-Heyn, Handbuch der Materialkunde für den Maschinenbau II. A. Berlin 1912. J. Springer.
3. Mitteilungen aus dem Kgl. Materialprüfungsamt Berlin. J. Springer. (Früher Mitteilungen a. d. Technischen Versuchsanstalten, im Text kurz „Mitteilungen“ genannt.) Inhaltsverzeichnis der Jahrgänge bis 1902 s. „Denkschrift“ von Martens u. Guth S. 79, der Jahrgg. 1902—1913 s. im Jahrgang 1913, S. 321.
4. Martens und Guth, Das Kgl. Materialprüfungsamt der Technischen Hochschule Berlin. Denkschrift zur Eröffnung. Berlin 1904. J. Springer (im Text kurz „Denkschrift“ genannt).
5. v. Tetmajer, Angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre. 3. Aufl. Wien-Leipzig 1905. Deuticke.
6. v. Bach, Elastizität und Festigkeit. 7. Aufl. Berlin 1917. J. Springer.
7. Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik. III. Band, 4. Aufl. Leipzig 1909. B. G. Teubner.
8. M. Rudeloff, Hilfsmittel und Verfahren der Materialprüfung. (Die Baumaschinen. Handbuch der Ingenieurwissenschaften. IV. Band.) Leipzig 1889. W. Engelmann.
9. Wawrziniok, Handbuch des Materialprüfungswesens für Maschinen- und Bauingenieure. Berlin 1908. J. Springer.

10. Hinrichsen, Das Materialprüfungswesen, unter bes. Berücksichtigung der am Kgl. Materialprüfungsamte zu Berlin-Lichterfelde üblichen Verfahren, dargestellt unter Mitwirkung von A. Martens und zahlreichen Fachgenossen. Stuttgart 1912. F. Encke.
 11. Thallner, Konstruktionsstahl. Handbuch über die Festigkeitseigenschaften von Stahl und Eisen. Freiberg i. S. 1904. Craz u. Gerlach.
 12. Mitteilungen des Internationalen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik. Kongreßberichte Brüssel, Kopenhagen, New York. — Berlin. J. Springer.
 13. Drucksachen des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik. (Zu beziehen durch Staatl. Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.)
- Vgl. auch die Literaturübersicht im 2. Bändchen.
-

Einleitung.

Das Materialprüfungswesen bildet einen wichtigen Teil der Technologie und beschäftigt sich mit Prüfung der Baustoffe sowie einer Reihe von Gebrauchsmaterialien des öffentlichen Wirtschaftslebens, wobei in der Regel diejenigen Eigenschaften festgestellt werden, die in Rücksicht auf den jeweiligen Verwendungszweck für den Erzeuger oder Verbraucher des Materials Interesse haben.

Die Materialprüfung baut ihre Forschungsergebnisse auf praktischen Versuchen auf, die unter Berücksichtigung der Grundlehren der Mechanik, Physik und Chemie ausgeführt werden.

Betrachten wir die geschichtliche Entwicklung der Materialprüfung, so ist zu bemerken, daß das Bestreben, Materialien vor ihrer Verarbeitung zu Gebrauchsgegenständen auf ihre Brauchbarkeit zu prüfen, zweifellos bis in die Zeiten der ersten Kulturanfänge zurückreicht. Die auf wissenschaftlicher Grundlage aufgebaute Materialprüfung jedoch, deren Forschungsergebnisse ein unentbehrliches Rüstzeug des Ingenieurs bilden, ist noch eine verhältnismäßig junge Wissenschaft; sie hat aber mit schnellem Wachstum im Laufe weniger Jahrzehnte eine so gewaltige Entwicklung erfahren, daß sie heute zu den wichtigsten Zweigen der technischen Wissenschaften gehört.

Die ersten Veröffentlichungen über planmäßig ausgeführte Materialprüfungen, die weiteren Kreisen bekannt

geworden sind, stammen aus dem Anfang der sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts; sie behandeln die Prüfung von Eisenstäben mit Hilfe des Zugversuches und rühren von dem englischen Ingenieur Kirkaldy her. In Deutschland verhalten anfangs der siebziger Jahre die sogenannten „Dauerversuche“ (s. S. 101) Wöhlers in der Kgl. Reparaturwerkstatt zu Frankfurt a. O., veröffentlicht in der Zeitschrift f. Bauwesen 1870, zu der Erkenntnis, daß die im lebhaften Aufblühen begriffene Maschinentech-
nik einer auf besonderer Fach- und Sachkenntnis beruhenden Materialprüfung nicht entraten könne. Die Wöhlerschen Versuche fanden ihre Fortsetzung durch Spangenberg, der an der Berliner Gewerbeakademie wirkte und aus dessen nur bescheiden ausgestattetem Versuchslaboratorium sich im Laufe der Jahre das mit allen neuzeitlichen Hilfsmitteln ausgerüstete Materialprüfungsamt der Charlottenburger Hochschule (s. Literaturübersicht S. 5, Nr. 4) entwickelt hat.

Erhebliche Zunahme an Bedeutung erfuhr die wissenschaftliche Materialprüfung in Deutschland durch die vielseitigen Arbeiten Bauschingers, der im Laboratorium der Techn. Hochschule zu München auf fast allen einschlägigen Gebieten grundlegende Studien betrieben hat und dem besonders auch die Anregungen zur Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren zu danken sind, einer Aufgabe, der sich in neuerer Zeit die zu diesem Zweck gegründeten Verbände, nämlich der „Deutsche Verband“ und der „Internationale Verband für die Materialprüfungen der Technik“ unterzogen haben.

In den letzten Jahrzehnten hat die Literatur des Materialprüfungswesens, abgesehen vom Ausland, in Deutschland außerordentliche Bereicherung erfahren. Neben vielseitigen Veröffentlichungen von v. Tetmajer und v. Bach

u. a. sind besonders zu nennen die Arbeiten von Martens und seiner zahlreichen Mitarbeiter am Lichterfelder Materialprüfungsamte. Martens hat in der wissenschaftlichen Vertiefung der Prüfungsverfahren, insbesondere aber auch in konstruktiver Durchbildung von Prüfungsmaschinen und -apparaten seine Lebensaufgabe erblickt und eine reiche Ausbeute wissenschaftlicher Forschung in seiner „Materialienkunde für den Maschinenbau“ (s. Literaturübersicht S. 5, Nr. 1) niedergelegt. In dem genannten Werke ist das Gebiet des Materialprüfungswesens, wenigstens soweit es die Materialien des Maschinenbaues angeht, zum ersten Male zusammenfassend behandelt worden. Martens gebührt ferner das Verdienst, zuerst in Deutschland der Metallographie, dem Studium des Kleingefüges der Materialien (s. Heyn-Bauer, Metallographie, Sammlung Göschel 432/433), die Wege geebnet zu haben. — Dem neuzeitlichen Materialprüfungswesen sind zahlreiche Pflegestätten an den technischen Hochschulen erstanden. Die dort ausgebildeten Versuchsverfahren haben in technischen Kreisen weite Verbreitung gefunden. Daß auch die Industrie sich zum Teil unter Aufwand großer Mittel die praktische Materialprüfung mehr und mehr zunutze gemacht hat, beweist u. a. an einem hervorragenden Beispiel die mit einem Kostenaufwand von mehreren Mill. Mark musterhaft eingerichtete Materialprüfungsanstalt von Krupp in Essen. Erstrebenswert bleibt jedoch noch viel weitergehendere Vereinheitlichung der Verfahren, die trotz der rührigen Tätigkeit der Verbände, des Deutschen und des Internationalen Verbandes, noch nicht den wünschenswerten Umfang angenommen hat; wir begegnen deswegen auch, besonders in der Technik der Maschinen- und Baukonstruktionen, einer großen Zahl einzelner Prüfungsvorschriften, die teils von Behörden, teils von privaten

Interessentengruppen aufgestellt sind, oft nur in Nebensachen Unterschiede aufweisen und hie und da versuchstechnische Schwierigkeiten in sich schließen, wodurch sich bei ihrer Durchführung Weiterungen ergeben.

Literatur.

- Eine Musterstätte des praktischen Materialprüfungswesens. Stahl und Eisen 1911, S. 873.
- Preuß, Der wirtschaftliche Nutzen der Materialprüfungen für die Praxis. Ztschr. d. Verb. d. Arch.- u. Ing.-Ver. 1912, S. 32. 40.
- G. Schulze, Die wirtschaftliche Bedeutung des Materialprüfungswesens der Technik. Potsdam 1919. Bonneß u. Hachfeld.
-

I. Allgemeine Material-Eigenschaften.

Die Eigenschaften, die die Materialprüfung festzustellen hat, können physikalischer oder chemischer Natur sein.

1. Physikalische Eigenschaften.

Von den physikalischen Eigenschaften haben für den Materialprüfungstechniker, der Metalle und Baustoffe prüft, hauptsächlich Bedeutung: Festigkeit, Formänderungsvermögen, Härte, Zähigkeit und Sprödigkeit, Bearbeitbarkeit oder Bildsamkeit, während die sonstigen physikalischen Eigenschaften mehr bei der Prüfung der Verbrauchsmaterialien (Papier, Schmieröle, Bindemittel usw. s. Band II) als bei den Festigkeitsversuchen Gegenstand des Studiums sind.

a) Festigkeit.

Mit Festigkeit bezeichnet man den Widerstand, den ein Material der Trennung seiner einzelnen Teile entgegensetzt. Die Kohäsion bewirkt Zusammenhalten der Materialteile, die zu ihrer Überwindung, d. h. zur Trennung der Materialteile voneinander erforderliche Kraft ist das Maß für die Festigkeit des Materials. — Der Kraftaufwand zur Überwindung der Materialfestigkeit wird für gewöhnlich gemessen nach Kilogrammen oder Tonnen (1000 kg), bezogen auf die Einheit der Querschnittsfläche des Kör-

pers, also auf das qmm oder qcm. In der maschinen- und hüttentechnischen Praxis werden die Festigkeiten meist auf das qmm bezogen angegeben; man spricht dort kurzweg z. B. von einem Eisen mit 40 kg Festigkeit und bezeichnet damit eine Eisensorte, die dem Zerreißen mit jedem qmm ihres Querschnittes einen Widerstand von 40 kg entgegensetzt; ein Rundstab von 20 mm Durchmesser = 314 qmm Querschnitt dieses Materials würde also bei $40 \cdot 314 = 12\,560$ kg Belastung zerreißen. In der bautechnischen Praxis und in der Literatur ist die Angabe der Festigkeit bezogen auf das qcm gebräuchlicher. Zuweilen begegnet man auch Angaben der Festigkeit in Atmosphären, wobei die technische Atmosphäre gleich 1 kg/qcm zugrunde gelegt ist. —

Ist eine einwandfreie Messung des Querschnittes erschwert oder nicht möglich, z. B. bei Hanf- und Drahtseilen, Lederriemen, Papier, so wird die Festigkeit eines solchen Materials zweckmäßig als Reißlänge angegeben. Mit Reißlänge, einem Begriffe, der von Reuleaux vorgeschlagen ist, bezeichnet man den Quotienten $\mathfrak{R} = \frac{P}{g}$, wenn P die Bruchbelastung in kg, g das Meter-Gewicht des zu prüfenden Stoffes bedeuten. \mathfrak{R} gibt also die Länge in m an, die das Versuchsstück, z. B. ein Seil oder Riemen haben müßte, um, an einem Ende frei aufgehängt, unter seinem Eigengewicht zum Bruch zu kommen.

Die Reißlänge rechnet mit Längenabmessungen des Materials, wie sie für die praktische Ausführung zumeist nicht in Frage kommen. Findet man beispielsweise für ein Hanfseil a mit einem Metergewicht von 0,17 kg beim Zerreißenversuch eine Bruchbelastung von 1000 kg, so ergibt sich eine Reißlänge von 6000 m, ein Maß, das für die Seilfabrikation nicht in Betracht kommt, immerhin aber klar

zum Ausdruck bringt, daß ein Seil b von den gleichen Abmessungen mit 9000 m Reißlänge eine um 50 Prozent höhere Zerreißfestigkeit hat, daß also in letzterem Seile entweder ein erheblich besseres Material verarbeitet oder das Material bei weitem besser ausgenutzt wurde. —

Je nachdem die den Zusammenhang der Körperteile störenden Kräfte den Körper zu zerreißen, zerdrücken, zu knicken, biegen, scheren oder zu verdrehen streben, spricht man von Zugfestigkeit, Druck-, Knick-, Biege-, Scher-, Verdrehungsfestigkeit. Begriffsentwicklung und Eigentümlichkeiten der einzelnen Festigkeitsarten werden später erörtert werden. —

In bezug auf Art und Dauer der Krafteinwirkung unterscheidet man zweckmäßig mit Tetmajer (Literaturübersicht S. 5, Nr. 5):

- a) Statische Festigkeit, wenn die Belastung ruhig anwachsend gesteigert wird (Zerreißversuch, Biegeversuch usw.).
- b) Stoßfestigkeit, wenn plötzliche, stoßweise Krafteinwirkung stattfindet (Schlagversuch).
- c) Schwingungsfestigkeit, wenn die Trennung der Teile durch stoßfreie und mit großer Häufigkeit wiederholte Anstrengung bewirkt wird (Dauerversuch). —

Für die einzelnen Materialarten schwanken die verschiedenen Festigkeiten oft in weiten Grenzen, wengleich es im allgemeinen möglich ist, für bestimmte Materialgruppen obere und untere Grenzwerte ihrer Festigkeiten anzugeben. Die Festigkeit eines Materials ist jedoch mannigfachen Beeinflussungen unterworfen. Bei vielen Materialien, besonders den Metallen, übt die Wärme, die die Versuchskörper während des Versuches angenommen, großen Einfluß auf die Festigkeit aus. Ein Flußeisen z. B., das, bei Zimmerwärme geprüft, etwa 48 kg/qmm Zug-

festigkeit hat, kann, bei 600 ° C geprüft, nur 10 kg/qmm Zugfestigkeit aufweisen, während das gleiche Eisen bei 200 ° C 54 kg/qmm Festigkeit zeigte (s. Bd. II, Metallprüfung). Großen Einfluß vermag ferner bei Metallen die Vorbehandlung (Überhitzung, Kaltbearbeitung, Glühen usw. s. Bd. II, Metallprüfung) auf die Festigkeitseigenschaften auszuüben.

Einzelne Metalle, besonders Zink und Zinn, zeigen nach Bauschinger und Fischer die Eigentümlichkeit, daß ihre Bruchfestigkeit um so größer gefunden wird, je schneller die Belastung beim Zugversuch gesteigert wird. Bei den gewöhnlichen Konstruktionsmaterialien (Flußeisen, Stahl, Gußeisen, Kupfer usw.) ist der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit jedoch so gering, daß er praktisch nicht in Erscheinung tritt.

Bei der Baumaterialienprüfung sind besonders die Festigkeiten der Bindemittel, wie Zement, Kalk usw., sowie diejenigen des Betons erheblich von dem Alter der Versuchskörper, ferner von der Art ihrer Aufbewahrung (an der Luft, in Wasser, unter feuchtem Sand usw.) abhängig (s. Bd. II, Baumaterialprüfung). Wasseranziehende Körper, wie Papier, Holz, Faserstoffe, ändern ihre Festigkeit je nach ihrem Feuchtigkeitsgehalte (s. Bd. II, Papierprüfung). Auch eine häufig wiederholte Beanspruchung zwischen bestimmten Belastungsgrenzen vermag, wie die Wöhlerschen Dauerversuche ergeben, die ursprüngliche Widerstandsfähigkeit eines Materials herabzumindern.

b) Formänderungsvermögen.

Allen unseren Materialien wohnt die Eigenschaft inne, unter einer äußeren Krafteinwirkung ihre Form entweder vorübergehend oder bleibend zu verändern. Die

Größe dieses Formänderungsvermögens ist bei den einzelnen Materialien außerordentlich verschieden; ihre Messung ist eins der wichtigsten Hilfsmittel zur Beurteilung der Materialien. Einen vollkommen starren Körper, der keinerlei Formänderung zu erleiden vermag, kennen wir nicht. Auch die geringste Belastung bringt beim widerstandsfähigsten Körper eine Formänderung hervor, die meßbar wird, wenn man genügend empfindliche Meßapparate anwendet.

Die Formänderung äußert sich auf verschiedene Weise; man spricht von Dehnung, Zusammendrückung, Durchbiegung, Verdrehung, je nachdem der Körper ziehenden, zusammendrückenden, biegenden oder verdrehenden Kräften beim Versuch unterworfen wurde.

In allen Fällen kann die Formänderung entweder eine vorübergehende (elastische) oder eine bleibende sein.

Elastische Formänderung finden wir, wenn das Material Elastizität besitzt, d. h. die Eigenschaft, die unter äußerer Krafteinwirkung angenommene Formänderung nach dem Aufhören der Krafteinwirkung wieder aufzuheben, so daß keine bleibende Gestaltsänderung wahrnehmbar ist. Einzelne Materialien sind von vornherein bis zu bestimmten Belastungen praktisch vollkommen elastisch (Gummi, Stahl, Flußeisen), andere erweisen sich zunächst nicht als vollkommen elastisch, können jedoch durch mehrmalige Be- und Entlastung in den vollkommen elastischen Zustand übergeführt werden (Leder, Gußeisen, Beton). Wiederum andere Körper erweisen sich von vornherein als sehr wenig elastisch und können auch nicht in den elastischen Zustand übergeführt werden (Blei, plastische Körper wie Ton usw.). —

Elastisches Verhalten besteht jedoch nur bis zu bestimmten Belastungsgrenzen; oberhalb dieser, für die ein-

zelenen Stoffe sehr verschieden hohen Belastung, die man Elastizitätsgrenze nennt, treten neben den elastischen Formänderungen auch bleibende auf. Die Bestimmung der Elastizitätsgrenze ist im Materialprüfungswesen wenig gebräuchlich, da sie versuchstechnische Schwierigkeiten bietet. Abgesehen davon, daß die Messung elastischer, meist sehr kleiner Formänderungen immer besonders feine Meßinstrumente erfordert, würde zur Feststellung, ob die Formänderung des Versuchsstückes noch vollkommen zurückgeht, die Belastung in möglichst kleinen Stufen zu steigern und nach jeder Belastungsstufe zu entlasten sein, was den Versuch sehr zeitraubend und umständlich gestalten würde; für Fälle, wo die Bestimmung der Elastizitätsgrenze jedoch erwünscht ist, nimmt das Staatl. Materialprüfungsamt zu Berlin-Lichterfelde in Berücksichtigung der Beschlüsse des Dtsch. Verbandes für die Materialprüfungen der Technik als Elastizitätsgrenze diejenige Belastung der Querschnittseinheit an, bei der sich nach Entlastung eine bleibende Längenänderung von höchstens 0,03 % der Meßlänge (d. h. der Länge am Probekörper, innerhalb der die Feinmessungen ausgeführt werden) ergibt. Es werden hierbei in der Regel Feinmeßapparate benutzt, die die Schätzung der Längenänderungen bis auf 0,00001 cm gestatten (s. S. 146). Diese große Meßgenauigkeit ermöglicht es ohne Schwierigkeiten, die Elastizitätsgrenze auch noch genauer, sogar für 0,003 % bleibende Längenänderung zu bestimmen. —

In Fällen, wo es sich um Feststellung der elastischen Materialeigenschaften handelt, ermittelt man jedoch meist statt der Elastizitätsgrenze die sogenannte Proportionalitätsgrenze. Man bezeichnet damit diejenige Belastungsstufe, bis zu der proportionale Beziehung zwischen Belastungssteigerung und Formänderungszunahme besteht,

bis zu der also für gleiche Steigerung der Belastung gleiche Zunahme der Formänderung zu beobachten ist.

Diese Proportionalität zwischen Belastung und Formänderung, die vielfach auch als Hookes Gesetz bezeichnet wird, ist mit weitgehender Annäherung bei den meisten derjenigen Materialien zu beobachten, die eine ausgesprochene Elastizität zeigen und bei denen die Bestimmung der elastischen Eigenschaften überhaupt für den Verbraucher praktische Bedeutung hat. Einzelne Forscher bestreiten allerdings das Vorhandensein dieser Proportionalität und begründen die beobachteten proportionalen Beziehungen mit der Unzulänglichkeit unserer Meßapparate. Indessen hat diese Frage vorwiegend wissenschaftliche Bedeutung; für die Bedürfnisse der praktischen Materialprüfung bildet die Bestimmung der Proportionalitätsgrenze jedenfalls ein wichtiges Hilfsmittel, um dem Konstrukteur rechnerische Grundlagen für die zulässige Beanspruchung des Materials im Bauwerk an die Hand zu geben.

Die Proportionalitätsgrenze fällt erfahrungsgemäß mit der Elastizitätsgrenze praktisch nahezu zusammen. Ihre Bestimmung ist jedoch versuchstechnisch wesentlich einfacher als diejenige der Elastizitätsgrenze, insofern als die Entlastungen in Fortfall kommen können. Man steigert die Belastung des Versuchskörpers in gleichen Stufen so weit, bis die für jede Belastungsstufe beobachteten Formänderungszunahmen keine gleichbleibenden Werte mehr ergeben. Die Messung der Formänderungen erfordert natürlich auch hierbei empfindliche Feinmeßapparate, auf die später noch näher eingegangen ist (S. 146). —

Oberhalb der Elastizitäts- bzw. Proportionalitätsgrenze hat weitere Belastungssteigerung neben den elastischen bleibende Formänderungen zur Folge; auch gibt die Formänderungszunahme für gleiche Belastungszunahme

nicht mehr gleichbleibende, sondern nach und nach anwachsende Werte. Der Übergang zu den bleibenden Formänderungen vollzieht sich bei einzelnen Materialien ganz allmählich, andere hingegen erfahren bald nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze plötzlich erheblich größere Formänderungen, die schon mit rohen Meßapparaten (Maßstäben mit Millimeterteilung) feststellbar sind. Die Belastungsgrenze, bei der diese großen bleibenden Formänderungen erfolgen, wird im Materialprüfungswesen mit Fließ- oder Streckgrenze bezeichnet. Die Bezeichnung „fließen“ rührt von Tresca her, der damit recht treffend die Verschiebung der einzelnen Materialmolekeln gegeneinander kennzeichnen wollte.

Die Bestimmung der Fließgrenze ist im Materialprüfungswesen für Metalle allgemein gebräuchlich, da man mit ihr als der eigentlichen Formänderungsgrenze zu rechnen und besonders auch aus ihrer Lage im Verhältnis zur Bruchgrenze wichtige Schlüsse auf die Vorbehandlung, die das Material erfahren hat, zu ziehen pflegt (Kaltbearbeitung s. Bd. II). Ihre Bestimmung bietet bei denjenigen Materialien, die eine scharf ausgeprägte Fließgrenze haben, keine Schwierigkeit, weil, wie später beschrieben, eine ganze Reihe von Merkmalen die Überschreitung der Formänderungsgrenze andeuten, ohne daß man besonders empfindliche Meßapparate nötig hätte. — Die meisten formänderungsfähigen Materialien, wie die Metalle, pflegen zudem nach Überschreiten der Fließgrenze ihr Oberflächen aussehen wesentlich zu verändern; blanke Versuchsstäbe zeigen matte, krispelige Oberfläche, Eigentümlichkeiten, auf die später noch näher eingegangen wird.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der Fließgrenze in solchen Fällen, wo sie nicht scharf ausgeprägt vorhanden ist oder wo der Übergang zu den blei-

benden Formänderungen ein ganz allmählicher ist. Vielfach ist bei solchen Materialien überhaupt keine Formänderungsgrenze als solche feststellbar; die Formänderungen wachsen immer mehr mit steigender Belastung, bis schließlich Bruch des Materiales herbeigeführt wird. Um auch für solche Materialien zahlenmäßig einen Wert für die Formänderungsgrenze angeben zu können, ist mehrfach vorgeschlagen worden, als Streckgrenze diejenige Belastung der Querschnittseinheit zu bezeichnen, die mindestens eine bleibende Formänderung von 0,2 % der Meßlänge (d. h. der Länge, die für die Dehnungsmessung benutzt wird) ergibt.

In der Praxis werden häufig die beiden Begriffe Fließgrenze und Elastizitätsgrenze miteinander verwechselt. Auch in der Literatur findet man hier und da in dieser Beziehung zweideutige Bezeichnungsweisen. Die Elastizitätsgrenze liegt, wie aus dem Vorhergehenden hervorgeht, meistens tiefer als die Fließgrenze und wird, wie schon bemerkt, wohl nur hier und da aus wissenschaftlichem Interesse ermittelt. Je nach der betreffenden Versuchsart, mit der die Fließgrenze ermittelt wurde, spricht man von Streckgrenze beim Zugversuch, Quetschgrenze beim Druckversuch, Biegegrenze beim Biegeversuch usw.

v. Bach unterscheidet in einer Arbeit über die Streckgrenze (Ztschr. d. V. d. Ing. 1904, S. 1040) bei Materialien, die diese Formänderungsgrenze ausgeprägt zeigen, zwischen oberer und unterer Streckgrenze. Mit oberer Streckgrenze bezeichnet er die Belastung, bei der das Fließen beginnt, mit unterer Streckgrenze diejenige, bis zu der beim eintretenden Fließen die Belastung sinkt (s. S. 49). Die Differenz zwischen oberer und unterer Grenze fällt sehr verschieden aus. Bach fand für Flußeisensorten:

Obere Grenze	3684 kg/qcm		1896 kg/qcm
Untere „	2601 „		1861 „
Differenz	1083 kg/qcm		35 kg/qcm

Über die Beeinflussungen, die die Formänderungsgrenzen insbesondere bei den Metallen erfahren können, s. Bd. II, Metallprüfung. —

Die Formänderungen werden entweder während des Versuches selbst oder nach seiner Beendigung gemessen. Die gebräuchlichen Bezeichnungen für die verschiedenen Meßgrößen sowie die mathematischen Beziehungen zwischen ihnen sind später bei den einzelnen Versuchsarten angegeben; ebenda sind auch die mannigfachen Beeinflussungen, die die Meßergebnisse erfahren, behandelt. —

Beim Formänderungsvermögen ist noch auf eine Eigentümlichkeit aufmerksam zu machen, die für die praktische Materialprüfung Bedeutung hat, und die man mit Nachwirkungserscheinungen zu bezeichnen pflegt. Man versteht darunter die Eigentümlichkeit einzelner Materialien, unter einer Belastung, wenn diese schnell, aber stoßfrei erfolgt ist, nicht sofort diejenige Formänderung anzunehmen, die dem Formänderungsvermögen des Materials und der betreffenden Belastungsstufe eigentümlich ist, vielmehr ihre Form unter der gleichen Belastung noch lange nachher zu ändern. Die Formänderungsmessung gerät also bei solchen Materialien in eine gewisse Abhängigkeit von der Zeitdauer, während der man den äußeren Kraftangriff auf das Material wirken läßt. Bei den gewöhnlich der Prüfung unterworfenen Konstruktionsmaterialien tritt diese Eigentümlichkeit weniger in Erscheinung, jedoch hat Martens („Mitteilungen“ 1887, I. Erg.-Heft u. „Materialienkunde“, S. 29) eingehende Versuche mit Magnesium ausgeführt, bei dem die Nachwirkungsvorgänge ganz besonders charakteristisch erkennbar sind. Bei Stoff-

fen wie Gummi oder Leder u. a. ist diesen Nachwirkungserscheinungen gebührende Beachtung zu schenken.

Literatur.

P. Ludwik, Über den Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungserscheinungen. Physikal. Zeitschr. 1909, S. 411.

c) Härte.

So allgemein gebräuchlich es ist, diese Eigenschaft zur Materialbeurteilung heranzuziehen, so ist es doch schwer, eine das Wesen dieser Eigenschaft wirklich erschöpfende Begriffserklärung zu geben. Physikalisch pflegt man unter Härte denjenigen Widerstand zu verstehen, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt. Andere Erklärungen haben nur teilweise Anklang gefunden. Hertz (Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes 1882, S. 449) erklärt Härte als die Festigkeit, welche ein Körper einer Formänderung entgegensetzt, die der Berührung mit kreisrunder Druckfläche entspricht. Kick (Dinglers polytechn. Journal 1891, S. 292) behauptet: Härte ist proportional der Scherfestigkeit, kann also durch Scherfestigkeit gemessen werden, Härte ist mithin Scherfestigkeit.

Man wird hiernach guttun, bei Anwendung des Begriffes Härte stets eine bestimmtere Bezeichnungsweise zu wählen, die das anzuwendende Härteprüfverfahren kennzeichnet, z. B. Ritzhärte, Brinellhärte u. a. (s. Abschn. Härteprüfung S. 117).

d) Zähigkeit und Sprödigkeit.

Unter Zähigkeit versteht man den Widerstand, den ein Körper dem Verschieben seiner Gefügeteile gegeneinander entgegensetzt,

Zähigkeit besitzen solche Materialien, bei denen Fließ- und Bruchgrenze weit auseinander liegen und bei denen zwischen beiden Grenzen noch erhebliche Formänderungen stattfinden. Sprödigkeit hingegen ist da zu finden, wo Fließ- und Bruchgrenze nahe beieinander liegen und überhaupt nennenswerte Formänderungen bis zur Bruchgrenze nicht feststellbar sind. Aus diesen Erläuterungen könnte geschlossen werden, daß Zähigkeit und Sprödigkeit Gegensätze sind; indessen ist Sprödigkeit nur als geringer Grad von Zähigkeit zu bezeichnen.

Spröde nennt man ferner solche Körper, die nur geringe stoßweise Beanspruchung zu ertragen vermögen (Glas); zähe hingegen solche, die auch bei stoßweiser Beanspruchung nur unter Annahme starker Formänderung zerstört werden können.

Die Begriffserklärung ist also, wie ersichtlich, auch bei diesen Materialeigenschaften nicht einheitlich, und ebenso sind die Vorschläge zur Messung dieser Eigenschaften vielseitig. Da alle diese Vorschläge indessen allgemeinere praktische Bedeutung noch nicht erlangt haben, erübrigt sich die weitere Erörterung an dieser Stelle.

Literatur.

- Föppl, Neuere Ergebnisse der Zähigkeitsprüfung. Mittlg. d. mech.-techn. Labor. München 1912, Heft 32, S. 30.
Ludwik, Über Zähigkeit und Schmeidigkeit. Ztschr. f. Werkzeugm. 1908, S. 327.

e) Bearbeitbarkeit (Bildsamkeit).

Bildsamkeit oder Bearbeitbarkeit der Materialien nennt man die Eigenschaft, unter mechanischer Bearbeitung in verschiedenen Zuständen bleibende Formänderungen, wie sie zur Formgebung für bestimmte Zwecke gewünscht sind, ohne Zerstörung des Körperganzen anzu-

nehmen. Für die Metalle kann unter Umständen verlangt werden, daß sie sich hämmern, für andere, daß sie sich pressen, prägen, ziehen, walzen, schweißen lassen. Diese Eigenschaften sind in der Hauptsache Gegenstand der sogenannten „technologischen Proben“, die S. 104 beschrieben sind.

f) Sonstige physikalische Eigenschaften.

Zu ihnen sind zu zählen: Spezifisches Gewicht, Raumgewicht, Dichtigkeitsgrad, Ausdehnung durch Wärme, Wärmeleitungsvermögen, Wärmeaufnahmevermögen (Spez. Wärme), Schmelzpunkt, Verdampfungspunkt, Siedepunkt, Erstarrungspunkt, Wasserdichtigkeit, Wasser-aufnahmevermögen und elektrische Eigenschaften.

Es erübrigt sich, auf Erläuterungen dieser Eigenschaften hier näher einzugehen, sie finden in den Lehrbüchern der Physik eingehende Behandlung und sind, soweit sie für die Materialprüfungstechnik Bedeutung haben, im zweiten Bändchen erörtert. Gegenstand eingehenderer Studien, die das Gebiet der Festigkeitsversuche berühren, sind die wechselseitigen Beziehungen zwischen spezifischem Gewicht und Formänderung und zwischen Dichtigkeitsgrad und Festigkeitseigenschaften gewesen. Grunmach fand, daß bei Körpern vom Dichtigkeitsgrade = 1, d. h. bei solchen Körpern, die den von ihnen eingenommenen Raum nahezu lückenlos ausfüllen (Metalle), durch Formänderung keine Änderung des spezifischen Gewichts erzielt wird; Martens teilt in „Materialienkunde“ S. 11 mit, daß Körper mit kleinerem Dichtigkeitsgrade als 1, z. B. die sämtlichen Holzarten, unter allseitigem Einschluß belastet, also so, daß ihre Formänderungsfähigkeit nach allen Seiten beschränkt wird, sich verdichten lassen. So nehmen die Holzarten alle schließlich nahezu das spezi-

fische Gewicht der Zellulose an und werden damit zu Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1.

Lehrreich ist auch das Verhalten von Körpern mit dem Dichtigkeitsgrade 1, wenn sie, allseitig eingeschlossen, belastet werden. Sie verändern unter diesen Umständen ihre Form nur außerordentlich wenig und verhalten sich annähernd wie die Flüssigkeiten, erweisen sich nämlich als nahezu unelastisch. Körper, wie Gummi z. B., die, unter normalen Verhältnissen belastet, außerordentliche Formänderungsfähigkeit und große Elastizität zeigen, werden, bei allseitigem Einschluß belastet, nahezu unfähig, ihre Form zu ändern.

2. Chemische Eigenschaften.

Die chemischen Eigenschaften interessieren bei den Materialien des Maschinenbaues nur insofern, als die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe und die dadurch etwa bedingte Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften in Frage kommen. Ferner sind die Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und Festigkeit auch bei den Metallen Gegenstand eingehender Forschungen gewesen. Diesen Arbeiten verdanken wir z. B. die Kenntnis, daß der Kohlenstoff die Eigenschaften der Eisensorten ganz erheblich beeinflußt, indem er Festigkeit und Härte erhöht, Formänderungsvermögen hingegen vermindert, daß ein zu hoher Gehalt an Schwefel bewirkt, daß Schmiedeeisen im rotwarmen Zustand außerordentlich spröde und brüchig wird (die sog. Rotbrüchigkeit), daß ferner zu hoher Gehalt an Phosphor Kaltbrüchigkeit erzeugt u. a. m. In ausgiebigerer Weise als bei der Metallprüfung werden die chemischen Eigenschaften bei der Papier-, Öl- und teilweise auch bei der Baumaterialprüfung (s. Bd. II) zur Materialbeurteilung herangezogen.

II. Die Festigkeitsversuche.

Nach der auf S. 13 gegebenen Einteilung der verschiedenen Arten der Festigkeit hat man zu unterscheiden:

- A. Festigkeitsversuche mit stoßfrei gesteigerter Belastung (statische Festigkeit).
- B. Schlagversuche mit stoßweiser Belastung.
- C. Dauerversuche (Schwingungsfestigkeit).

Ferner sind zu den Festigkeitsversuchen zu zählen:

- D. Technologische Proben.
- E. Härteprüfungen.

Für die Begriffsentwicklungen in den folgenden Abschnitten sind durchgängig die Bezeichnungen gewählt, wie sie im Staatlichen Materialprüfungsamte zu Lichterfelde im Gebrauch sind.

A. Festigkeitsversuche mit stoßfrei gesteigerter Belastung.

Je nach der Beanspruchung, die der Probekörper erfährt, unterscheidet man: Zugversuch, Druckversuch, Knickversuch, Biegeversuch, Scher- und Lochversuche, Torsionsversuche.

1. Der Zugversuch.

a) Begriffsfeststellungen.

Belastet man einen stabförmigen Probekörper durch in der Pfeilrichtung (s. Fig. 1) wirkende Kräfte P , so wird der Stab einer Zugbeanspruchung unterworfen. Unter der Voraussetzung, daß sich die Kraft P gleichmäßig auf die Querschnittsfläche des Stabes verteilt, erfährt jede Flächeneinheit eine Zugwirkung, deren Größe σ durch die Gleichung gegeben ist:

$$\sigma = \frac{P}{f} \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{qcm}} \text{ oder in at. } \left(\frac{1 \text{ kg}}{\text{qcm}} = \text{techn. Atmosphäre} \right),$$

worin f die Querschnittsfläche des Stabes in qcm angibt. Die Kraft P stellt die Gesamtbelastung, die der Stab zu tragen hat, in kg dar; die auf die Querschnittseinheit entfallende Kraft σ bezeichnet man mit Spannung. Die Spannungen an den beim Zugversuch zu ermittelnden Belastungsgrenzen kennzeichnet man durch entsprechende Zusatzzeichen; so bedeutet



Fig. 1.
Zugbe-
anspruchung.

σ_P die Spannung an der Proportionalitätsgrenze,

σ_S die Spannung an der Fließgrenze, beim Zugversuch auch Streckgrenze genannt,

σ_B die Spannung an der Bruchgrenze (höchste getragene Belastung),

σ_Z die Spannung an der Zerreißgrenze (die im Augenblick des Zerreißens noch getragene Last).

In allen Fällen ist der Errechnung von σ die ursprünglich vor dem Versuch festgestellte Querschnittsfläche f zugrunde gelegt, was, genau genommen, nicht richtig ist, da der Querschnitt des Stabes und damit die Größe f mit steigender Belastung andauernd eine Veränderung erfahren. Indessen gibt

man allgemein, weil die Messung des Querschnittes während des Versuches Schwierigkeiten bereitet, σ bezogen auf den ursprünglichen Stabquerschnitt an. — Unter der Kraft P erfährt der Stab eine Gestaltsänderung,

die je nach der Größe von P und dem Formänderungsvermögen des Materials ausfällt und eine elastische oder bleibende sein kann (s. S. 15). Die Formänderung äußert sich beim Zugversuch in einer Längenänderung und einer Querschnittsverminderung. Längenänderung und Querschnittsverminderung pflegen bei den Körpern vom Dichtigkeitsgrade 1 (s. S. 23) oberhalb der Elastizitätsgrenze (s. S. 16) in bestimmter abhängiger Beziehung zueinander zu bleiben, so daß das Produkt $f \cdot l$ (Rauminhalt) durch die Belastung nicht oder wenigstens nicht wesentlich geändert wird. Die ursprüngliche Länge l geht in die Länge l_1 über, der ursprüngliche Querschnitt f wird zu f_1 (s. Fig. 1)

Es ist also die Längenänderung $\lambda = l_1 - l$. Man gibt die Längenänderungen bezogen auf die Längeneinheit an und bezeichnet diese Dehnung mit ε

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l} = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{l_1}{l} - 1.$$

Analog den Spannungen σ kennzeichnet man auch ε nach den einzelnen Belastungsgrenzen mit entsprechenden Zusatzzeichen: es bedeutet also ε_p die Dehnung der Längeneinheit an der Proportionalitätsgrenze, ε_S die Dehnung der Längeneinheit an der Fließgrenze, ε_B die Dehnung der Längeneinheit an der Bruchgrenze, ε_Z die Dehnung der Längeneinheit an der Zerreißgrenze. —

In der Praxis bestimmt man meistens nur die sogenannte Bruchdehnung δ und bezeichnet sie kurzweg als Dehnung. Es ist dies die Längenänderung einer auf dem Versuchsstabe durch Körner- oder Strichmarken vor dem Versuche abgegrenzten Länge, der sogenannten Meßlänge, in Prozenten dieser Meßlänge und nach dem Bruch gemessen. Diese Dehnung δ ist also:

$$\delta = 100 \left(\frac{l_1 - l}{l} \right) = 100 \left(\frac{l_1}{l} - 1 \right) = 100 \varepsilon.$$

Bruchdehnung δ braucht nicht unbedingt gleich der hundertfachen Zerreidehnung der Längeneinheit ($100 \varepsilon_Z$) zu sein, was man annehmen könnte. ε_Z , während des Versuchs gemessen, pflegt vielmehr gewöhnlich etwas größer als δ zu sein, das nach dem Zerreißen des Stabes gemessen wird, weil in ε_Z ein Teil der Formänderung noch elastisch sein kann. —

Die Dehnung ε für die Einheit der Spannung σ nennt man Dehnungszahl α

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma};$$

es ist also

$$\varepsilon = \alpha \sigma,$$

und da

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l},$$

so ist

$$\lambda = \alpha \sigma l.$$

Den reziproken Wert von α bezeichnet man mit Elastizitätsmodul E :

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

Vorschläge, besonders von Bach, gehen dahin, den Begriff Elastizitätsmodul aus der Festigkeitslehre ganz verschwinden zu lassen und an seiner Stelle nur mit der Dehnungszahl α zu rechnen. Diese Bestrebungen sollten unterstützt werden, da α ein leichter verständlicher und weniger schwerfälliger Begriff als E ist.

E gibt an: die Spannung bezogen auf die Einheit der Längenänderung, mit anderen Worten die Belastung der Querschnittseinheit (qcm), unter der ein Stab von der Länge 1 sich um 1 verlängern, d. h. eine Verdoppelung

seiner Länge erfahren würde. Für schmiedbares Eisen beträgt der Elastizitätsmodul rund 2 000 000. Man erkennt leicht, daß E in Zahlengrößen sich bewegt, die verwirrend wirken können. Spannungen von 2 000 000 at. vermag kein Eisen zu tragen, ebensowenig kommt bei ihm eine Längenänderung um das Doppelte der ursprünglichen Länge des Versuchsstabes in Frage; die Bruchfestigkeitszahlen für ein gutes Flußeisen schwanken zwischen 4200—5000 at. bei einer Dehnung von rund 25 %. —

Die Querschnittszusammenziehung pflegt man nur nach dem Bruch des Stabes zu messen und in Prozenten, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt, anzugeben. Die Querschnittsverringering der Flächeneinheit ist gegeben durch den Quotienten $\frac{f - f_1}{f}$, mithin ist die Querschnittsverminderung (Kontraktion) q in Prozenten des ursprünglichen Querschnittes

$$q = 100 \left(\frac{f - f_1}{f} \right) = 100 \left(1 - \frac{f_1}{f} \right).$$

Längenänderung ε und Querschnittszusammenziehung ε_q stehen ihrer Größe nach unterhalb der Elastizitätsgrenze in bestimmter Beziehung. Es ist $\varepsilon_q = \varepsilon \frac{1}{m}$, worin m eine Konstante (Poissonsche Zahl) bedeutet, die erfahrungsgemäß zwischen 3 und 4 schwankt. Bis zur Elastizitätsgrenze ist also die Querschnittszusammenziehung gleich $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der Längenänderung.

b) Messung der Belastungen. Prüfungsmaschinen. Einspannvorrichtungen.

Zur Messung der Belastungen, die der Probekörper erfährt, bedient man sich der Prüfungsmaschinen,

die mit Einrichtungen versehen sind, um Kräfte zu erzeugen, und Meßvorrichtungen haben, mit denen die vom Probekörper aufgenommenen Kräfte gemessen werden können.

Die Kraftmesser der Maschinen geben gewöhnlich die Gesamtbelastung P in kg oder t an, bei einzelnen Konstruktionen auch die Spannungen σ . In der Regel muß man vor dem Versuch die Abmessungen des für das Zerreißen in Frage kommenden Querschnittes (f), des Stabes mit geeigneten Meßwerkzeugen (Schublehre, Schraubenlehre) ermitteln und nach dem Versuch den

Quotienten $\frac{P}{f} = \sigma$ errechnen.

Wegen der großen Mannigfaltigkeit der Bauarten von Prüfungsmaschinen werden diese in einem späteren Abschnitte besonders behandelt werden, indessen sollen im folgenden schon die Einrichtungen, die zum Einspannen des Versuchsstückes beim Zugversuch dienen, kurz besprochen werden. — Zum Zerreißversuch ist es, wenn einwandfreie Ergebnisse erzielt werden sollen, erforderlich, daß die in Wirkung kommende Kraft P möglichst genau in der Längsachse des Stabes angreift und alle seitlich auf Biegung wirkenden Kräfte ausgeschlossen werden. Dieser Bedingung muß zwar schon bei der Konstruktion der Stabeinspannvorrichtungen Rechnung getragen werden, jedoch wird auch der aufmerksame und geschickte Beobachter sein Augenmerk beim Einbau des Versuchsstabes auf diesen Umstand richten müssen. Der Versuchsstab kommt beim Zugversuch entweder mit rechteckigem Querschnitt als sogenannter Flachstab (Blechabschnitte usw.) oder mit rundem Querschnitt als Rundstab zur Verwendung. In beiden Fällen gibt man den Stabenden solche Form, daß sie be-

quem von den Einspannvorrichtungen der Maschine gefaßt und gehalten werden können. Auf die Einzelheiten der Formen und die Abmessungen der Versuchsstäbe wird später noch eingegangen werden. Die Bedingung der zentrischen Zugübertragung wird am leichtesten bei den Rundstabeinspannungen erzielt, bei denen der Stabkopf in Kugelschalen gelagert wird, so daß die Längsachse des Versuchsstabes sich von selbst in die Zugachse

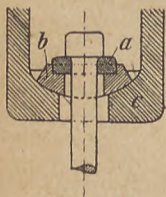


Fig. 2.

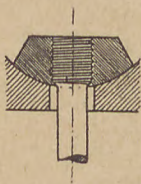


Fig. 3.

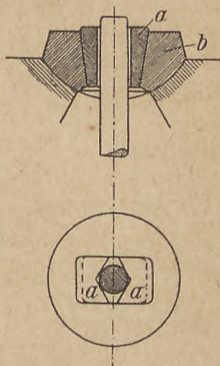


Fig. 4.

Rundstabeinspannungen nach Martens.

der Maschine einstellt, sobald durch die Antriebsvorrichtung der Maschine eine Zugkraft ausgeübt wird. In den Fig. 2—7 sind die am häufigsten angewendeten, von Martens entworfenen Konstruktionen solcher Rundstabeinspannvorrichtungen wiedergegeben. Bei der Einrichtung nach Fig. 2, die sehr gebräuchlich ist, umfassen ein Paar geteilter Ringe *a* den Stabschaft unterhalb des Stabkopfes, die Ringe *a* liegen in einem geschlossenen Ringe *b*, dessen untere Fläche kugelförmig abgedreht ist und Auf-

lage auf der entsprechend gearbeiteten Kugelfläche der Einspannklaue *c* findet.

Eine andere Art der Einspannung veranschaulicht Fig. 3. Der Zerreistab ist an den Köpfen mit Gewinde versehen und in eine Mutter eingeschraubt, deren Auflagefläche wiederum der Kugelfläche der Einspannklaue an-

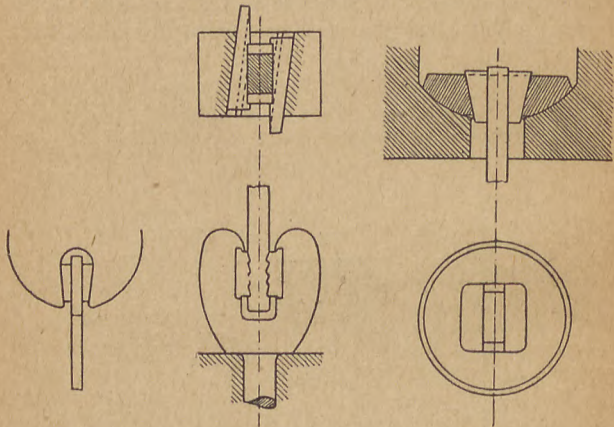


Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

Flachstabeinspannungen nach Martens.

gepaßt ist. Eine weniger gebräuchliche Form der Rundstabeinspannung stellt Fig. 4 dar. Sie ermöglicht, Stäbe ohne besonderen Kopf einzuspannen. Der Stabschaft wird zwischen Beikeilen *a* gehalten, die in den konischen Anlageflächen des mit Kugelfläche versehenen Stückes *b* geführt sind.

Flachstabeinspannungen zeigen die Fig. 5, 6, 7. Der etwas breiter als der Stabschaft gehaltene Stabkopf wird zwischen Beikeilen mit konischen Auflageflächen ge-

faßt. Die Beißflächen der Keile sind entweder mit Feilenhiß versehen oder haben eingefräste Zähne, die in die entsprechenden Nuten am Stabkopf eingreifen. Letztere Einspannungsart ist jedoch ungebräuchlich geworden, weil die Nuten im Stabkopf den Zähnen der Keile sehr genau angepaßt sein müssen, wenn nicht Biegungsbeanspruchungen auftreten sollen.

Fig. 7 veranschaulicht, in welcher Weise die Kugellagerung auch bei der Flachstabeinspannung Verwendung finden kann.

c) Messung der Längenänderungen.

Die Messung der Längenänderungen wird sich meist auf die Messung der bleibenden Dehnungen nach Abschluß des Zerreißversuches beschränken. Messungen während des Versuches werden gewöhnlich nur dann vorgenommen, wenn es sich um Ermittlung der elastischen Eigenschaften des Materiales, um Feststellung der Proportionalitätsgrenze (s. S. 16), der Dehnungszahl a oder von deren reziproken Werte E (Elastizitätsmodul) handelt. Hie und da wird die Beobachtung des Verlaufes der Dehnung während des ganzen Versuches Interesse haben, sei es zur schärferen Ermittlung der Fließgrenze, sei es, um aus der graphischen Auftragung der beobachteten Dehnungswerte Schlüsse über das Arbeitsvermögen des Materiales (s. S. 57) ziehen zu können. Bei den feineren Arbeiten zur Feststellung der elastischen Eigenschaften wird man die Messungen immer mit sehr empfindlichen Meßapparaten (optischen, mikrometrischen) ausführen müssen, da die innerhalb der Proportionalitätsgrenze erfolgenden Längenänderungen außerordentlich kleine sind. Für die Messungen oberhalb der Streckgrenze genügen gröbere Meßwerkzeuge (Maßstäbe mit Millimeterteilung usw.).

Eine Anzahl der gebräuchlichsten feinen und groben Meßwerkzeuge, ihre Handhabung, ihre Fehlerquellen sind ausführlicher in einem späteren Abschnitte behandelt (S. 144). —

Die Ermittlung der bleibenden Dehnung nach dem Bruch des Stabes, der sogenannten Bruchdehnung, wird für gewöhnlich bei jedem Zerreißversuch ausgeführt, da neben der Festigkeit überall auch die Bruchdehnung als Gütemaßstab zur Beurteilung des Materials herangezogen wird. In der Praxis geschieht die Messung der Bruchdehnung noch vielfach in der Weise, daß man auf dem Stabschaft vor dem Versuch eine bestimmte Länge, die sogenannte Meßlänge (gewöhnlich 200 mm) durch Körner- oder Strichmarken abgrenzt, nach dem Zerreißen des Stabes die Bruchenden gegeneinander legt und nun durch Messung feststellt, um wieviel sich die Länge zwischen den Marken durch Dehnung vergrößert hat. Die Verlängerung pflegt man in Prozenten, bezogen auf die ursprüngliche Meßlänge, als Bruchdehnung anzugeben.

Dieses Meßverfahren liefert jedoch nicht immer einwandfreie Werte für die Dehnung. Die Größe der hiermit ermittelten Bruchdehnung ist in erheblichem Maße abhängig von der Lage der Bruchstelle des Zerreißstabes. Diese Dehnungsmessung ergibt einen Höchstwert, wenn der Bruch in der Mitte des Stabes liegt, sie wird bei dem gleichen Material um so kleinere Werte ergeben, je mehr die Bruchstelle nach den Stabköpfen zu liegt, was aus dem Nachfolgenden erklärlich wird.

Um sich ein Bild von den Dehnungen der einzelnen Stabteile zu machen, teilt man zweckmäßig die ganze Länge des Stabschaftes bis an die Stabköpfe heran durch Einritzen von Strichmarken in Abständen von 1 cm in gleiche Teile, unterwirft den Stab der Zerreißprobe und

mißt nach dem Bruch die Länge der einzelnen Teilmarkenabstände aus.

Bei zeichnerischer Auftragung dieser Meßergebnisse nach Fig. 8 ergibt sich für den Verlauf der Dehnung über den ganzen Stabschaft bei Materialien mit ausgesprochener Formänderungsfähigkeit ein Linienzug ABC , wenn der Bruch in der Mitte der Stablänge erfolgt ist. Aus diesem Schaubild ist ersichtlich, daß die Dehnung der Stabteile in unmittelbarer Nähe der Bruchstelle erheblich größer ist

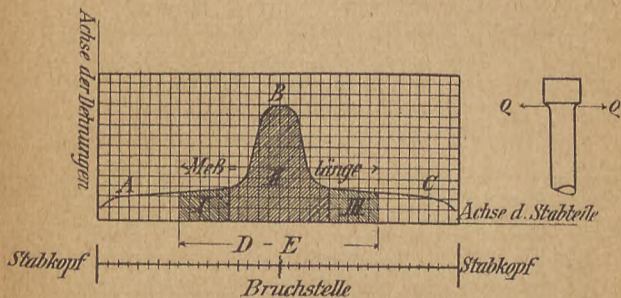


Fig. 8.

Dehnungen der einzelnen Stabteile
(Einschnürung in der Mitte der Meßlänge).

als diejenige der übrigen Stabteile, und daß ferner die Dehnung nach den Stabköpfen zu allmählich kleinere Werte ergibt. Die erstere Erscheinung ist damit zu erklären, daß der Stab an der Bruchstelle starke Einschnürung, also große Querschnittsverminderung erfährt. Sie beträgt manchmal bei Flußeisen bis zu 70 % des ursprünglichen Querschnittes und mit ihr erfolgt, weil Produkt $f \cdot l$ unverändert bleibt (s. S. 27), auch starke Längenänderung der benachbarten, d. h. der in unmittelbarer Nähe der Bruch-

und Einschnürstelle liegenden Stabteile. In der Nähe der Stabköpfe hingegen wirken der Dehnung Kräfte entgegen, die senkrecht zur Längsachse des Stabes gerichtet sind. An den Auflagestellen des Stabkopfes (s. Fig. 8) treten die Kräfte ϱ in Form von Reibungswiderständen auf, die verhindern, daß das Material in unmittelbarer Nähe des Stabkopfes frei nachgeben kann. Die Quersammenziehung des Materials wird dort behindert und infolgedessen fällt auch die Längenänderung der benachbarten Stabteile entsprechend kleiner aus. Je größer der Abstand der Teilungsintervalle vom Stabkopf wird, um so geringer wird die Beeinflussung der Querschnittsverminderung und Dehnung durch die Kräfte ϱ , und damit erklärt sich der Verlauf des Linienzuges in Fig. 8.

Als Bruchdehnung gibt man nun die mittlere Ordinatenhöhe der schraffierten Fläche über der Linie DE an. Sie muß einen Höchstwert ergeben, wenn die Bruch- und Einschnürstelle und damit die größten Dehnungswerte, wie in Fig. 8, in der Stabmitte liegen; sie wird jedoch ein Mindestwert werden, wenn Bruch und Einschnürstelle, wie in Fig. 9, an das Ende der Meßlänge $D—E$ rücken, denn der Flächeninhalt der schraffierten Fläche I , II , III ist in Fig. 8 größer als in Fig. 9.

Es ist aus diesem Grunde auch in der Praxis allgemein gebräuchlich, zur Dehnungsmessung mit dem oben geschilderten Verfahren nur solche Stäbe heranzuziehen, deren Bruchstelle innerhalb des mittleren Drittels des Stabschaftes liegt. Innerhalb dieser Grenze können die Fehler der Bruchdehnungsmessung nach diesem Verfahren für praktische Zwecke vernachlässigt werden. Wollte man indessen die Dehnung nach diesem Verfahren auch an Stäben messen, deren Bruchstelle außerhalb des mittleren Stabdrittels liegt, so können die Dehnungswerte um meh-

rere Prozente zu klein ermittelt werden, was bei Abnahmeversuchen, denen als Abnahmebedingung in der Regel eine bestimmte untere Grenze für die Dehnung zugrunde gelegt ist, für den Erzeuger der Ware unter Umständen recht unangenehme wirtschaftliche Nachteile haben kann. —

Um sich von den Fehlern dieses Meßverfahrens frei zu machen und, unabhängig von der Lage der Bruchstelle, alle Zerreißstäbe zur Dehnungsmessung heranziehen zu können, bedienen sich die öffentlichen Prüfungsanstalten und die wissenschaftlichen Untersuchungsstellen eines

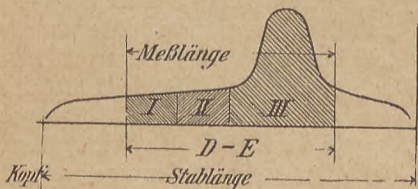


Fig. 9.

Einschnürung am Ende der Meßlänge.

anderen Meßverfahrens, das allerdings etwas zeitraubender ist.

Das Meßverfahren gründet sich darauf, daß die Dehnung der Stabteile symmetrisch an beiden Seiten der Bruchstelle verläuft, d. h. daß ein Stabteil in einer beliebigen Entfernung x von der Bruchstelle nach dem linken Stabkopf zu die gleiche Längenänderung erfährt, wie ein Stabteil im gleichen Abstand x von der Bruchstelle nach dem rechten Stabkopf zu. Den Beweis hierfür liefert die Schaulinie in Fig. 8, die den Verlauf der Dehnungen über die ganze Stablänge angibt.

Um die Dehnungsmessung nach dem zu schildernden Verfahren vornehmen zu können, teilt man die Meßlänge

des Stabes, deren Endpunkte so weit von den Stabköpfen entfernt liegen müssen, daß nennenswerte Beeinflussung der Formänderung durch diese nicht mehr zu fürchten ist,

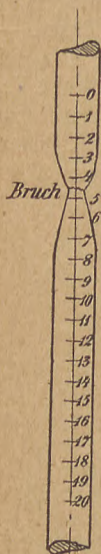


Fig. 10.
Rundstab mit
Teilung für
Bruchdehnungsmessung.

am zweckmäßigsten durch Einritzen von Strichmarken in zwanzig Unterteile. Größe der Meßlänge und Abstand der einzelnen Strichmarken voneinander sind nach bestimmten Vorschriften zu wählen, die später eingehend erörtert sind (s. S. 45). Es sei hier nur bemerkt, daß bei einem sogenannten Normalrundstabe (Begriffserklärung s. S. 43) mit einem Schaftdurchmesser von 20 mm die Meßlänge 200 mm beträgt und diese für gewöhnlich in der Mitte der ganzen Stablänge, die zwischen den Köpfen 360 mm ist, aufgetragen wird. Bei einer Teilung der Meßlänge in 20 Unterteile würden die einzelnen Teilungsintervalle bei einem solchen Normalrundstabe mithin 10 mm lang werden. Die Strichmarken werden zweckmäßig auf einem Längsriß aufgetragen (s. Fig. 10). Macht man nun, wie in Fig. 10 angedeutet, die Annahme, daß der Bruch des Stabes beim Zerreißen zwischen der 4. und 5. Teilmarke erfolgt ist, und mißt zur Feststellung der Bruchdehnung die Länge der Strecke vom Bruch bis zum Teilstrich Nr. 0 und vom Bruch bis zum Teilstrich Nr. 10 (d. h. von der dem Bruch am

nächsten liegenden Marke 5 aus gerechnet, je fünf Teilintervalle nach links und nach rechts), und zwar längs des Längsrisse, so ergibt die Summe beider Messungen die Länge einer Strecke, die vor dem Versuch 10 Teilungsintervalle, also 100 mm, lang war.

Würde sich bei solcher Messung nach dem Bruch z. B. eine Länge von 132 mm ergeben haben, so hätte sich die Strecke, die vor dem Versuch 100 mm lang war, um 32 mm gedehnt, das Material würde demnach 32 Prozent Bruchdehnung aufweisen. Die so gemessene Bruchdehnung ist durch die Bezeichnung δ_5 zu kennzeichnen, um anzuzeigen, daß die Dehnungsmessung über je 5 Teilmarken links und rechts von der Bruchstelle vorgenommen wurde. Wie ohne weiteres klar ist, muß dieser Wert δ_5 stark durch die Dehnung der Einschnürstelle beeinflußt sein und daher bei sehr formänderungsfähigem Material erheblich zu hohe Werte für die mittlere Bruchdehnung des Materials ergeben. Man ermittelt deswegen in der Regel die maßgebliche Bruchdehnung als δ_{10} , d. h. gemessen über je 10 Teilungsintervallen links und rechts von der Bruchstelle. Wenn wir diese Dehnungsmessung δ_{10} wiederum an dem Beispiele in Fig. 10 vornehmen, so ergibt sich, daß auf dem einen Stabende nur noch 5 Teilungsintervalle zur Ausmessung vorhanden sind. Nach der dem Meßverfahren zugrunde liegenden Tatsache, wonach die Dehnung der einzelnen Stabteile gleichmäßig links und rechts von der Bruchstelle erfolgt, kann gefolgert werden, daß die zur Messung δ_{10} am oberen Stabende fehlenden Teilmarkenabstände die gleiche Dehnung erfahren haben würden, wie die entsprechenden Markenabstände am unteren Ende, also die Nr. 10 bis 15. Die Längenmessung am oberen Ende muß daher in diesem Falle durch Ausmessung der Strecke zwischen Teilstrich Nr. 10 und Nr. 15 ergänzt werden; δ_{10} würde sich also aus der Ausmessung der nachfolgenden Strecken zusammensetzen:

1. Teilstrich 15—Bruch (für Messung unterhalb vom Bruch),
2. „ 0—Bruch } für Messung oberhalb vom Bruch.
3. „ 10—15 „ }

Würde die Gesamtsumme dieser Ausmessungen einen Wert von 254 ergeben, so hätte eine Länge des Stabes, die vor dem Versuch $20 \times 10 = 200$ mm lang war, sich um 54 mm gedehnt; das Material würde also in diesem Falle eine Bruchdehnung δ_{10} von $\frac{54 \cdot 100}{200} = 27\%$

aufweisen. Es sind im vorhergehenden Beispiel Zahlen gewählt worden, die häufig beobachteten Werten für weiches Flußeisen annähernd entsprechen, und es sei hinzugefügt, daß man bei der Lage der Bruchstelle in Fig. 10 mit der Dehnungsmessung, wie sie in der Praxis gebräuchlich und wie sie auf S. 34 beschrieben ist, etwa 25 % Dehnung ermittelt hätte. Da der Wert δ_{10} zweifellos die mittlere Bruchdehnung des Materials am richtigsten angibt — er verlegt wie die Messung δ_5 die Bruchstelle in die Mitte der zur Messung herangezogenen Strecke, zieht aber im Gegensatz zu δ_5 Stabteile in die Messung hinein, die von der großen Dehnung der Einschnürstellen nicht mehr beeinflußt sind —, so erkennt man, daß selbst im vorliegenden Falle, wo die Bruchstelle noch nahezu an den Grenzen des mittleren Stabdrittels liegt, die Dehnungsmessung der Praxis schon einen um etwa 2 % zu kleinen Wert ergeben kann. Aus dem Vorhergehenden geht indessen auch hervor, daß der Wert δ_5 allein keinen zuverlässigen Maßstab für die Bruchdehnung des Materials zu geben vermag.

d) Beeinflussung der Messungsergebnisse.

Für die Feststellung der Bruchdehnung ist es sonach nicht gleichgültig, welches Meßverfahren zur Anwendung kommt. Aber auch bei Verwendung des zuverlässigsten Meßverfahrens sind noch eine Reihe anderer Gesichtspunkte zu beachten, wenn man einwandfreie, vor allem

miteinander vergleichbare Ergebnisse für die Dehnungsmessung erhalten will. Die hierbei in Frage kommenden Umstände müssen wegen ihrer Wichtigkeit für die sachgemäße Auswertung von Versuchsergebnissen in den hauptsächlichsten Punkten hier kurz erörtert werden; für eingehenderes Studium muß auf die einschlägige Literatur (Materialienkunde) verwiesen werden. —

Zunächst ist es nicht gleichgültig, mit welcher Meßlänge die Dehnungsmessung vorgenommen wird, besonders dann nicht, wenn man mit Materialien, die starke Einschnürung erfahren, zu tun hat. Schon aus dem über die Messung δ_5 (s. S. 39 u. 40) Gesagten geht hervor, daß eine Meßlänge, deren Begrenzungen zu nahe der Einschnürstelle liegen, keine mittlere Dehnung des Materials geben kann. Andererseits wird die Dehnungsmessung auch dann fehlerhaft beeinflußt werden, wenn ihre Begrenzungen zu nahe den Stabköpfen liegen und deren Einfluß (s. S. 36) sich geltend macht. Martens gibt in seiner „Materialienkunde“ auf S. 94 Ergebnisse von Dehnungsmessungen an Rundstäben an, die sich bei gleichem Material für verschiedene Meßlängen wie folgt stellen:

Meßlänge	$l_t \cdot 20$	$l_t \cdot 10$	$l_t \cdot 5$
Bruchdehnung $\delta\%$: 31,1	38,4	49,5

oder wenn man die Dehnung bei der Meßlänge $l_t \cdot 20 = 100$ setzt, so ergeben die Zahlen folgendes Verhältnis:

$$l_t \cdot 20 = 100; \quad l_t \cdot 10 = 123,5; \quad l_t \cdot 5 = 159,2.$$

Man erkennt hieraus den erheblichen Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse der Dehnungsmessung. —

Des weiteren ist jedoch auch die Querschnittsgröße des Versuchsstabes bei gleicher Meßlänge von Einfluß auf das Dehnungsergebnis. Versuche von Bauschinger

(Mitteilungen des mech.-techn. Labor. d. techn. Hochschule München, Heft 6) und Martens (Materialienkunde) beweisen, daß die Meßlängen sich wie die Wurzeln aus den Stabquerschnitten verhalten müssen, wenn Stäbe aus gleichem Material, aber von verschiedenem Querschnitt gleiche Dehnungswerte ergeben sollen. Weniger kommt der Einfluß der Querschnittsform auf die Dehnungsergebnisse zum Ausdruck. —

Die öffentlichen und wissenschaftlichen Prüfungsstellen sind daher meist dazu übergegangen, die Abmessungen der Probestäbe so zu bemessen, daß dem sogenannten Ähnlichkeitsgesetze Rechnung getragen wird und dadurch die an verschiedenen Prüfungsstellen mit Körpern verschiedener Abmessungen gewonnenen Versuchsergebnisse miteinander vergleichbar werden. Nach dem Ähnlichkeitsgesetz, wie es Barba bezeichnet hat, oder dem Gesetz der proportionalen Widerstände, wie es von Kick (Das Gesetz der proportionalen Widerstände, Leipzig 1885, A. Felix) genannt wird, erfahren geometrisch ähnliche Körper aus dem gleichen Material unter gleichen Umständen durch die gleichen Spannungen geometrisch ähnliche Formänderung.

Nach diesem Gesetze kann man vergleichbare Versuchsergebnisse nur dann erwarten, wenn die sämtlichen in Frage kommenden Abmessungen untereinander in bestimmtem Verhältnis stehen, die Versuchskörper also geometrisch ähnlich sind.

Berücksichtigung dieses Gesetzes ist um so mehr geboten, als der Einfluß der Stababmessungen sich nicht nur auf die Ergebnisse der Formänderungsmessungen beschränkt, sondern sich auch auf die Festigkeitszahlen erstreckt. Martens gibt in seiner „Materialienkunde“ eine übersichtliche Zusammenstellung der nach dieser Richtung

hin sehr lehrreichen Versuche von Barba (Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des Ingénieurs Civils 1880, S. 682), die in der nachstehenden Tabelle wiedergegeben ist:

Breite b	30	14	30	14	30	14
Dicke a	14	14	6	14	6	6
Querschnitt f	420	186	180	186	180	84
Meßlänge l	200	10	10	0	0	0
l/\sqrt{f}	9,8	0,7	0,7	0	0	0
σ_B	42,0	43,5	44,0	45,7	57,1	60,4
δ_l	30,5	65,0	40,0	—	—	—
q	61,8	51,3	49,8	sehr gering	fast 0	fast 0

Man erkennt hieraus deutlich den Einfluß der Stabform auf die Festigkeitsergebnisse.

e) Stabformen für den Zugversuch.

Für den Rundstab hat sich in Deutschland, besonders an den öffentlichen Prüfungsstellen, fast überall der Normalstab mit 20 mm Schaftdurchmesser und 200 mm Meßlänge eingebürgert. Ihn hat auch das Materialprüfungsamt zu Berlin-Lichterfelde als Grundlage für ein Stabsystem, das dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung trägt, angenommen. Der Normalrundstab, wie er in den „Vorschriften für die Benutzung des Materialprüfungsamtes“ angegeben wird, ist in Fig. 11 dargestellt. Er hat an beiden Enden zwecks Einspannung in die Prüfungsmaschine Stabköpfe von 35 mm Durchmesser und 25 mm Höhe und zwischen den Köpfen eine Stablänge von 360 mm. An den Stabköpfen setzt der Stabschaft mit einer Hohlkehle von 2 mm Radius zunächst mit einem kurzen zylindrischen Hals von 25 mm Durchmesser an, verjüngt sich auf eine Länge von 70 mm bis auf 20 mm

Durchmesser, um dann zylindrisch mit 20 mm Durchmesser (d) auf eine Länge von 220 mm durchgeführt zu werden. Diese Länge von 220 mm, die für die Ermittlung der Versuchsergebnisse in Frage kommt, wird mit Gebrauchslänge (Zeichen lg) bezeichnet. Auf ihr wird die Teilung in Zentimeter zur Messung der Bruchdehnung aufgeritzt, und zwar auf eine Länge von 200 mm = $10 d$, deren Endmarken symmetrisch zur Gebrauchslänge liegen und die mit Meßlänge (Zeichen l) bezeichnet wird. Die

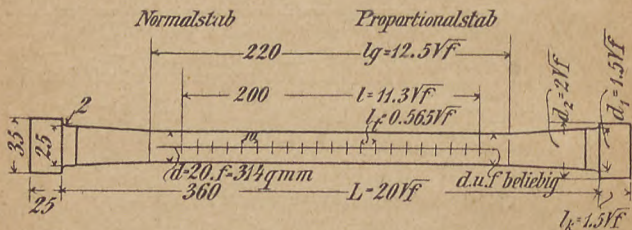


Fig. 11.

Normal- und Proportionalrundstab des Materialprüfungsamtes.

Teilung umfaßt demnach 20 Teilungsabschnitte von je 1 cm Länge, und ihre Endmarken liegen beiderseitig 1 cm von der Begrenzung der Gebrauchslänge entfernt. Durch den konischen Übergang zwischen Stabkopf und Gebrauchslänge werden die Beeinflussungen der Meßlänge durch den Stabkopf vermindert; durch Anbringung der Hohlkehle am Stabkopf wird ein scharfer Übergang zwischen zwei verschiedenen großen Stabquerschnitten vermieden. Damit wird der Erfahrung Rechnung getragen, daß das Material an solchen Übergangsstellen, wenn sie scharfkantig gehalten sind, leicht zum Bruch gebracht wird, eine Erscheinung, die sich besonders bei harten Materialien (Gußeisen) häufig bestätigt findet.

Wo aus irgendwelchen Gründen (Materialmangel usw.) die Anfertigung des Normalrundstabes nicht zugänglich ist, wird den Versuchskörpern die Form des sogenannten Proportionalstabes gegeben, d. h. die Abmessungen werden so gewählt, daß sie im bestimmten Verhältnis zu denen des Normalstabes stehen. In erster Linie wird auf proportionale Bemessung der Meßlänge gesehen. Maßgebend hierfür ist der Quotient $n = l/\sqrt{f}$, d. h. Verhältnis der Meßlänge zur Wurzel aus dem Stabquerschnitt f , innerhalb der Gebrauchslänge. Dieser Quotient n ist für den Normalrundstab $= 200/\sqrt{314} = 11,3$. Die Meßlänge für jeden Proportionalstab errechnet sich hiernach aus dem Produkt $l = 11,3\sqrt{f}$, oder einfach zu $l = 10 d$, worin d der Stabdurchmesser innerhalb der Gebrauchslänge ist. Diese Meßlänge wird in jedem Falle in 20 Teilungsabschnitte l_t geteilt; für jeden Proportionalstab beliebigen Querschnittes errechnet sich l_t zu $\frac{11,3\sqrt{f}}{20} = 0,565\sqrt{f}$ bzw. zu $\frac{d}{2}$. Auch

die übrigen Abmessungen des Proportionalstabes werden in bestimmtem Verhältnis zum Stabquerschnitt gewählt. In Fig. 11 sind auf der linken Stabseite die Abmessungen des Normalrundstabes, auf der rechten diejenigen des Proportionalstabes angegeben. —

In ähnlicher Weise sind auch die Abmessungen für einen Normalflachstab nach den „Vorschriften des Materialprüfungsamtes“ festgelegt. Fig. 12 zeigt wiederum auf der linken Stabseite die Abmessungen des Normalstabes, auf der rechten diejenigen für den Proportionalflachstab. Beim Flachstab, dessen Querschnitt rechteckig ist, wird die Dicke des Stabes meistens gegeben sein, weil es gebräuchlich ist, besonders bei Zerreißproben mit Blechen usw., die Walzhaut auf dem Stabe zu belassen;

man wird also, um Zeit und Arbeit bei der Probenherstellung zu sparen, aus dem zu prüfenden Bleche einfach Streifen von solcher Breite herausarbeiten, daß unter Beibehaltung der ursprünglichen Dicke des Bleches der Querschnitt des Versuchsstabes, also das Produkt aus Breite mal Dicke, passende Abmessungen erhält, indessen soll das Verhältnis Dicke zu Breite in den Grenzen zwischen 1 : 1 und 1 : 5 bleiben.

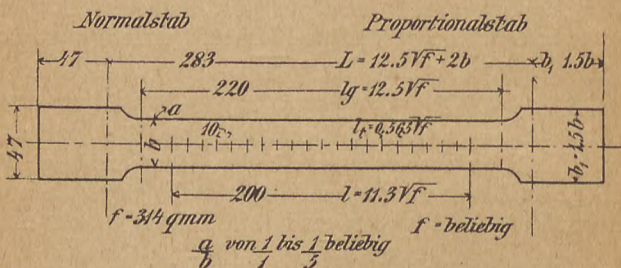


Fig. 12.

Normal- und Proportionalflachstab des Materialprüfungsamtes.

Nach Untersuchungen von Bach u. Baumann (Zur Abhängigkeit der Bruchdehnung flußeiserner Kesselbleche von der Meßlänge, Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1916, S. 854)

können auch Flachstabformen mit einem Verhältnis $> \frac{1}{1}$, sogar hinauf bis auf 5 : 1 ohne Bedenken angewendet werden; es empfiehlt sich aber $l = 11,3\sqrt{f}$ beizubehalten.

Neuere Bestrebungen, die insbesondere von Striebeck ausgehen, zielen dahin ab, an Stelle des oben erläuterten Normalstabes mit $l = 10 d$, bzw. $l = 11,3\sqrt{f}$ aus Gründen der Material- und Arbeitersparnis einen kürzeren Normal-

stab mit $l = 5 d$, bzw. $l = 5,65\sqrt{f}$ einzuführen. Der Deutsche Verband für die Materialprüfung d. Technik, der dieser Frage bereits früher nähergetreten ist, hat die Einführung dieses kurzen Stabes mit $l = 5 d$ empfohlen; es stellen sich aber der Einführung in der Praxis noch insofern Schwierigkeiten in den Weg, als nicht ohne weiteres feststeht, welche Dehnungswerte, gemessen an Normalstäben mit $l = 5 d$, in Abnahmevorschriften einzusetzen sind an Stelle der bislang gültigen Werte, gemessen am bisherigen Normalstabe $l = 10 d$. Mit dieser Frage beschäftigt sich eingehend eine Arbeit von Rudeloff (Heft 215 der Forschungsarbeiten d. Ver. d. Ingen., Berlin 1919: Einfluß der Stablänge auf die Dehnung), auf die hier hingewiesen sei.

f) Verlauf des Zugversuches (Flußeisen).

Nachdem nunmehr die Begriffserklärungen, soweit sie zum Verständnis der Vorgänge beim Zugversuch in Frage kommen, gegeben wurden, soll im folgenden an Hand der graphischen Darstellung des Ergebnisses eines Zugversuches in Fig. 13 auf den Verlauf des Versuches selbst näher eingegangen werden.

Die Schaulinie in Fig. 13, in der die Spannungen als Ordinaten, die Formänderungen als Abszissen aufgetragen wurden, ist charakteristisch für den Verlauf des Zugversuches mit einem ausgeprägt formänderungsfähigen Material mit Proportionalität (s. S. 17), also z. B. einem weichen Flußeisen.

Wie ersichtlich, können die Spannungen zu Beginn des Versuches stetig gesteigert werden, ohne daß größere Formänderungen zu ermitteln sind; die Linie der Dehnungen ϵ als Funktion der Spannungen σ verläuft in gerader Linie, unter einem geringen Winkel geneigt gegen die Ordinatenachse. Für gleiche Spannungssteigerungen

erfährt das Material während dieser Versuchsperiode gleiche Zunahmen der Dehnung, es besteht „Proportionalität“ zwischen Belastung und Formänderung; die Dehnungen sind zudem so klein, daß sie nur mit sehr empfindlichen Meßinstrumenten (Spiegelapparate usw. s. S. 146) beobachtet werden können. Die Formänderungen müssen nach dem auf Seite 17 Erörterten elastische sein, bei stufenweiser Aufhebung der Belastung würde der Linienzug für die Entlastung mithin zusammenfallend mit der

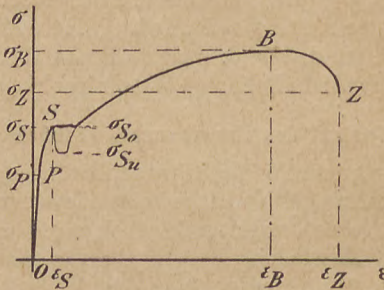


Fig. 13.

Verlauf des Zugversuches mit weichem Flußeisen.

Linie $O—P$ verlaufen. Bei dem mit P bezeichneten Punkte beginnt die Schaulinie sich schwach zu krümmen, die erfolgenden Formänderungen nehmen also schneller zu als die Belastungen, die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung hat aufgehört, die Spannung an der Proportionalitätsgrenze σ_P (s. S. 16) und diese selbst sind also überschritten. Die Dehnungen sind indessen an sich noch immer klein, bei Entlastung des Versuchsstabes werden jedoch schon' gering bleibende Veränderungen mit genügend feinen Meßapparaten feststellbar sein, denn auch die Elastizitätsgrenze des Materials, die nahezu mit der

Proportionalitätsgrenze zusammenfällt (s. S. 17), ist nunmehr überschritten.

Die schwache Krümmung der Schaulinie hält an bis zwei Punkte S , die Spannung kann bis dahin, ohne daß die Arbeitsgeschwindigkeit des Krafterzeugers der Maschine erhöht werden muß, stetig gesteigert werden. Bei S beginnt die Schaulinie plötzlich nahezu parallel zur Abszissenachse zu verlaufen, häufig findet sogar ein augenblickliches Abfallen der Spannung statt, was durch die dünn gezeichnete Linie angedeutet werden soll (Bachs „obere“ und „untere“ Streckgrenze s. S. 19). Es erfolgen nun größere bleibende Formänderungen, das Material „fließt“ (s. S. 18), die Spannung an der Fließ- oder Streckgrenze σ_S ist überschritten. Ohne erhebliche Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit, die man aus versuchstechnischen Rücksichten vermeidet, schon um die möglichst scharfe Beobachtung der charakteristischen Spannungsgrenzen nicht zu stören, wird beim Überschreiten der Fließgrenze zunächst keine Spannungssteigerung mehr feststellbar sein, bei manchen Materialien wird sogar, wie schon erwähnt, ein Spannungsabfall zu beobachten sein, selbst wenn der Krafterzeuger der Prüfungsmaschine gleichmäßig weiter arbeitet. Die von letzterem in diesem Versuchsabschnitte auf den Stab übertragene mechanische Arbeit wird vollständig als Formänderungsarbeit aufgebraucht, reicht in manchen Fällen sogar nicht mehr aus, um die bereits erzeugte Spannung im Versuchsstabe hoch zu halten. Es stellt sich mithin ein neuer Gleichgewichtszustand ein, der andauert, bis das eigentliche Fließen des Materials beendet und dieses wieder für Spannungssteigerung aufnahmefähig wird. An der Prüfungsmaschine kennzeichnet sich das Erreichen der Fließgrenze meistens am Abfall des Wagehebels oder des Zeigers der Anzeigevor-

richtung, mit der die Belastungen gemessen werden, weil die während der Fließperiode vom Kräfteerzeuger geleistete Arbeit als Formänderungsarbeit im Stabe aufgezehrt wird und auf den Kraftmesser und die Anzeigevorrichtung zunächst keine Belastungssteigerung übertragen wird.

Am Versuchsstab erkennt man Überschreitung der Fließgrenze an den nunmehr mit groben Hilfsmitteln (An-



Fig. 14 a. Fließfiguren auf einem Flachstabe.

legemaßstäbe mit Millimeterteilung usw.) meßbaren Dehnungen; es zeigt sich auch bald eine Oberflächenveränderung; die bisher blanke Oberfläche eines Rundstabes z. B. wird matt, beim Flußeisen krispelig, beim Messing knitterig oder streifig usw. Flachstäbe, auf denen die Walzhaut belassen wurde, werfen diese ab; der im Vergleich zum darunterliegenden Stabmaterial erheblich härtere und weniger dehnbare Walzzunder vermag der schnell fortschreitenden Dehnung des Kernmaterials nicht zu folgen,

reißt auf und springt ab. Häufig geschieht dies so heftig, daß man die dadurch verursachten Geräusche (Knistern) hören kann.

Das Fließen des Materials geht in der Regel von einem Querschnitt aus, indessen sind hier und da auch mehrere Ausgangsstellen zu beobachten. Vielfach liegen die Ausgangsstellen, besonders beim Flachstabe, in der Nähe der Stabköpfe; auch beim Rundstab kann man oft beobachten, daß das Fließen nicht in der Stabmitte, sondern außerhalb der Meßlänge l beginnt. Interessant ist die Beobachtung des Fließvorganges an einem Flachstabe, dessen



Fig. 14 b. Fließfiguren auf einem Rundstabe.

Breitseiten von Zunder befreit und poliert sind. Man kann auf ihnen deutlich die sogenannten Fließfiguren erkennen, Linien, die sich zunächst an der Ausgangsstelle des Fließens unter etwa 45° gegen die Stablängsachse geneigt zeigen, nach und nach über die ganze Staboberfläche verlaufen, dieser ein streifiges Aussehen gebend, und schließlich mit wachsender Spannung wieder verschwinden. Auch das Abspringen des Walzzunders pflegt längs solcher Linien unter 45° gegen die Längsachse des Stabes zu erfolgen. Konstruktionsteile, wie Träger, U- oder T-Eisen, die auf ihrer Oberfläche solche durch Abspringen des Zunders erzeugte Figuren zeigen, lassen immer darauf schließen, daß sie eine Belastung über ihre Fließgrenze erfahren haben, und mahnen, wenn sie etwa an einem fertigen Bauwerk, z. B. einer Brücke usw., auftreten, jedenfalls zur Vorsicht.

In Fig. 14 und 15 sind charakteristische Erscheinungen von Fließfiguren wiedergegeben.

Die Schaulinie in Fig. 13 steigt oberhalb des Punktes *S* stark gekrümmt an bis zum Punkte *B*. Das Material erfährt nach Überwindung der Fließperiode wiederum eine Spannungssteigerung, indessen sind die dabei erfolgenden Dehnungen sehr große. Schließlich verläuft die Kurve nahezu parallel zur Abszissenachse auf den Punkt *B* zu, der die höchste Ordinate des ganzen Schaubildes, also die größte im Stabe erzeugte Spannung, darstellt. Das Material ist damit an der Grenze seiner Tragfähigkeit angekommen, die Spannung an der Bruchgrenze σ_B also erreicht. Die Brucherscheinung selbst ist bei den einzelnen Materialien verschieden. Materialien, für die der Verlauf der Schaulinie in Fig. 13 charakteristisch ist, pflegen nicht augenblicklich bei Erreichung der Bruchbelastung zu Bruche zu gehen; dem Bruche geht vielmehr eine mit Spannungsabfall verbundene starke örtliche Einschnürung oder Querschnittsverminderung an einem, manchmal auch an mehreren Querschnitten voraus. Ist die Zähigkeit des Materials überwunden und die Grenze der Dehnbarkeit des Materials in einer Einschnürstelle erreicht, so kommt der Stab in dieser Einschnürung zum Zerreißen. Den dem Bruche gewöhnlich

Fig. 15. Fließfiguren, entstanden durch Abspringen von Walzrunder, bei einem auf Biegung belasteten I-Träger.



vorausgehenden Spannungsabfall kennzeichnet der Linienzug $B-Z$ in Fig. 13; Punkt Z bezeichnet die Spannung, die der Stab im Augenblicke des Zerreißen noch zu tragen vermochte, die sogenannte Zerreißspannung σ_B , die indessen für gewöhnlich nicht ermittelt wird, weil die Lastanzeiger der Prüfungsmaschinen nicht immer ihre Beobachtung ohne größere Umstände gestatten.

g) Brucherscheinungen und Bruchflächen.

Nur selten pflegt die Bruchfläche des Stabes ebene Form zu haben, weitaus häufiger, besonders bei den Materialien, die starke Einschnürungen zeigen, tritt sogenannte Trichterbildung ein, wobei an dem einen Probenende Kegel- oder Pyramidenbildung, an dem anderen Ende die entsprechend trichterförmige Vertiefung ausgeprägt wird. Erklärung für diese Erscheinung ist darin zu suchen, daß der Beginn des Bruches nicht, wie man annehmen sollte, an den äußeren Stabfasern beginnt, die inneren Stabfasern vielmehr zuerst zum Zerreißen kommen und daher bis an die Grenze ihrer Dehnbarkeit beansprucht sind, die bei den außen liegenden Fasern nicht erreicht wird. Häufig zeigt sich auch eine kreisförmige ebene Grundfläche mit hervorragenden Rändern an dem einen Stücke, während das andere Stück an den Rändern entsprechende Kegelflächen zeigt. Sehr zähe Materialien (z. B. Blei) pflegen sich vollkommen zur Spitze auszuziehen, wohingegen harte, wenig formänderungsfähige Materialien (Gußeisen, harter Stahl) meist ebene Bruchflächen zeigen. Auch Flachstäbe zeigen die dem Material eigentümlichen Bruchflächen, indem ebenfalls Trichterbildung oder ebene Bruchfläche zu beobachten ist. Oft machen sich bei den Bruchflächen der Flachstäbe indessen Einflüsse geltend, die bewirken, daß die Bruchflächen nicht senkrecht zur

Stablängsachse, sondern unter einem Winkel geneigt gegen diese sich bilden, was entweder auf nichtzentrische Zugbeanspruchung oder auf Materialeigentümlichkeiten zurückzuführen ist.

Fig. 16 gibt eine Reihe von Brucherscheinungen wieder.

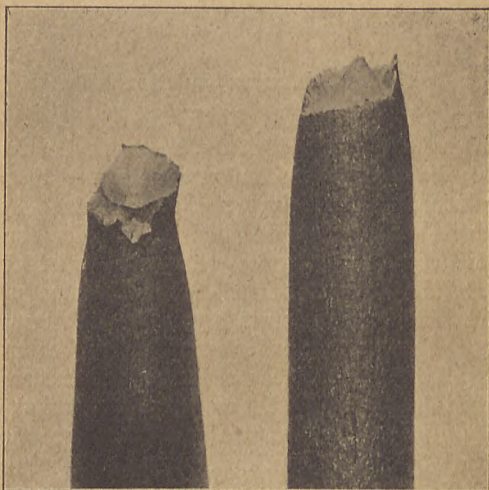


Fig. 16 a. Brucherscheinung (Trichterbildung) beim Zerreißversuch mit einem Rundstabe (Flußeisen).

Wichtig für die Materialbeurteilung ist die möglichst vollständige Beschreibung der Bruchfläche, weswegen öffentliche Prüfungsstellen stets eine solche ihren Prüfungszeugnissen beizugeben pflegen. Sie umfaßt in der Regel die Angabe der Form der Bruchfläche, der Farbe und der Art des Gefüges. Besonders die Art des Gefüges unterliegt großer Mannigfaltigkeit, weswegen hier

nur auf das Hauptsächlichste kurz eingegangen werden kann. Das Gefüge kann körnig und zwar grobkörnig (z. B. Gußeisen) oder feinkörnig (z. B. harter Stahl) sein; es kann ferner schuppige Struktur, kurzschuppige oder feinschuppige (z. B. Flußeisen) zeigen. Man begegnet auch sehnigem (Schweißeisen), blättrigem, faserigem, kristallinischem Gefüge. Eine Reihe von Materialien, z. B. Glas, Pech usw., zeigen überhaupt keine ausgeprägte Gefügeform, sie werden daher auch kurz gefügelose genannt.

Interessant zu beobachten sind die Beeinflussungen, denen die Bildung der Gefügeformen unterworfen ist. Weiches Flußeisen liefert hierfür ein lehrreiches Beispiel. Auf der Bruchfläche eines Zerreißstabes aus Flußeisen pflegen sich für gewöhnlich zwei Gefügezonen auszuprägen. Der Kern zeigt ein kurzschuppiges, mattgraues Gefüge, wohingegen am Rande ein mehr feinschuppiges, glänzendes Gefüge zu beobachten ist. Dem stark formgeänderten Flußeisen, auch dem Messing und Kupfer pflegt ein schuppiges Gefüge eigentümlich zu sein, während körniges Gefüge in der Regel auf vorausgegangene

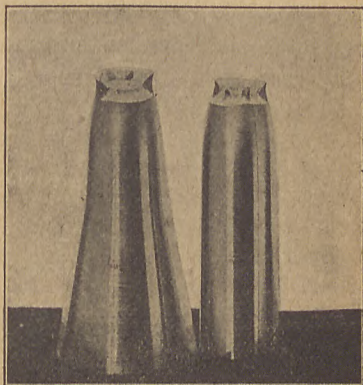


Fig. 16 b. Brucherscheinung beim Zerreißversuch mit einem Rundstabe (Eisen-Nickel-Legierung).

geringere Formänderung schließen läßt. Im ursprünglichen Zustande haben die verschiedenen Eisensorten alle mehr oder weniger körniges Gefüge, auch das weiche Flußeisen, wie man sich leicht überzeugen kann, wenn man einen Flußeisenflachstab, der auf der einen Breitseite mit einer Kerbe versehen ist, in dieser Kerbe durch Biegung um eine Kante zum Bruch bringt. Auf der Bruchfläche des auf Zug beanspruchten Flußeisenrundstabes hat das Material infolge der starken Formänderung nicht

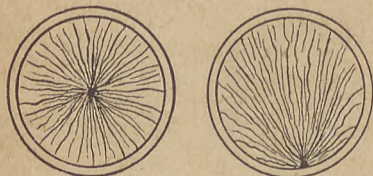


Fig. 17 u. 18. Brucherscheinungen.

mehr seine natürliche Struktur behalten, sondern weist ein schuppiges Gefüge auf. Daß dieses Gefüge am Rande feinschuppiger und glänzender erscheint als im Kern der

Bruchfläche, dürfte darauf zurückzuführen sein, daß infolge der Einschnürung des Stabes an der Bruchstelle die einzelnen Gefügeschuppen durch das Übereinander-Weggleiten ihr Aussehen gegenüber denjenigen des Kernmaterials verändern. — Häufig zeigen sich auf der Bruchfläche strahlenförmige Gebilde (s. Fig. 17), die, von einem Punkte ausgehend, radial nach allen Richtungen verlaufen. Nicht immer liegt, wie anzunehmen wäre, der Ausgangspunkt des Strahlenbündels in der Stabmitte; indessen wird man, wo dies nicht der Fall ist, in dem Ausgangspunkt des Strahlenbündels bei genauerer Untersuchung gewöhnlich Fehlstellen im Material entdecken. Es hat große Wahrscheinlichkeit für sich, daß der Bruch des Stabes vom Mittelpunkt des Strahlenbündels ausgeht. Bei harten Materialien, die gegen jede Oberflächenver-

letzung, wie sie z. B. durch das Aufritzen der Teilung auf den Zerreistab verursacht wird, empfindlich sind, pflegt der Bruch manchmal in einer dieser Strichmarken zu erfolgen. Das Gefügebild zeigt dann meistens den Ausgangspunkt des Strahlenbündels am Rande, da, wo die Strichmarke eingeritzt war (s. Fig. 18). Nicht selten sind auch, besonders wiederum bei Flußeisen (auch Legierungen wie Messing, Bronzen usw.), Gefügebilder, bei denen mitten im kurzschuppigen Gefe körnige Einlagen zu beobachten sind. Sie deuten auf härtere Materialzonen und beweisen, daß das Material nicht homogen ist, also Zonen mit verschiedener Formänderungsfähigkeit enthält.

h) Arbeitsvermögen, Völligkeitsgrad.

Ein Schaubild, wie es in Fig. 13 dargestellt ist, gibt nicht nur für jede Spannungsstufe die zugehörige Dehnung an, vermag vielmehr auch über das Arbeitsvermögen des gepruften Materials Aufschluß zu geben.

Die graphische Auftragung des Versuchsergebnisses ist, wie erwähnt, in der Weise erfolgt, daß als Ordinaten die Spannungen, also die auf die Querschnittseinheit ausgeübte Kraft, als Abszissen hingegen die Dehnungen der Längeneinheit, d. h. der Weg eines Körperteiles von der Länge $l = 1$, aufgetragen wurden. Das Produkt beider Größen, Kraft mal Weg, also der Flächeninhalt der von der Schaulinie umschlossenen Fläche, muß demnach eine Arbeit darstellen, und zwar die Arbeit, die die Raumeinheit des Materiales an Widerstand dem Zerreißen entgegenzusetzen vermag. Dieser Widerstand wird das Arbeitsvermögen des Materiales genannt. Es ist ein leichtes, seine Größe aus dem Schaubild zu ermitteln, indem man entweder den Flächeninhalt durch Planimetrieren ermittelt oder ihn mit anderen Methoden bestimmt. Martens emp-

fieht („Materialienkunde“ S. 27) nachstehendes Verfahren. Für eine genügend genaue Annäherungsrechnung zur Bestimmung dieses Flächeninhaltes bildet man die Summe des Inhaltes mehrerer Rechtecke, die man in die

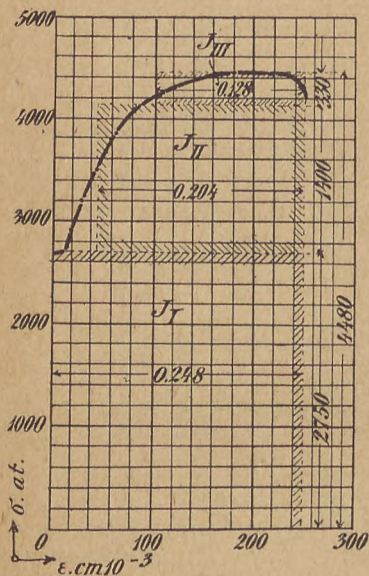


Fig. 19. Bestimmung des Arbeitsvermögens nach Martens.

Fläche hinein beschreibt und deren Begrenzungslinien die Schaulinien so schneiden, daß außerhalb der Schaulinienfläche fallende Flächenteile der eingeschriebenen Rechtecke angenähert die gleiche Größe haben wie Flächenabschnitte innerhalb der Schaulinie, die nicht in die eingeschriebenen Rechtecke fallen. Praktische Durchführung dieses Verfahrens an einem Zahlenbeispiel, dessen Größen einem Zugversuche mit Flußeisen entnom-

men sind, ist nachfolgend gegeben. Fig. 19 zeigt die graphische Auftragung der Versuchsergebnisse, wobei zur bequemen Ausmessung der Rechteckseiten quadriertes Papier benutzt wurde. Die Dehnungsauftragung ist in einem Maßstabe erfolgt, der besonders deutlich den Dehnungsverlauf oberhalb der Streckgrenze darstellt, hingegen

den elastischen Teil der Formänderungen nicht erkennen läßt. Das Arbeitsvermögen Σa des Materials errechnet sich in diesem Falle als Summe des Flächeninhaltes der drei Rechtecke J_I, J_{II}, J_{III} .

$$J_I = 2750 \cdot 0,248 = 682$$

$$J_{II} = 1400 \cdot 0,204 = 286$$

$$J_{III} = 330 \cdot 0,128 = 42$$

$$\Sigma a = 1010 \frac{\text{cmkg}}{\text{ccm}}$$

Die Raumeinheit des vorliegenden Materials setzt mit hin ihrer Formänderung bis zum Zerreißen als Widerstand eine Arbeit von 1010 cmkg entgegen. Dieser Wert, dividiert durch das spezifische Gewicht des Flußeisens $= \sim 7,8$, ergibt

$$\Sigma a = \frac{1010}{7,8} = 130 \frac{\text{cmkg}}{\text{g}},$$

das Arbeitsvermögen der Gewichtseinheit des Materials.

Nach Tetmajer, Hartig u. a. steht nun das Arbeitsvermögen, also der Flächeninhalt der von der Dehnungsschaulinie umschriebenen Fläche, bei den verschiedenen Materialien in einem annähernd konstanten Verhältnis zum Inhalt des die Schaulinie umschreibenden Rechteckes, dessen eine Seite den Wert für die höchste Spannung, also die Bruchspannung, und dessen andere Seite den Wert für die größte Dehnung, also die Bruchdehnung, darstellt. Dieses Verhältnis ξ bezeichnet man mit „Völligkeitsgrad“, seine Größe ist gegeben durch die Gleichung:

$$\xi = \frac{\Sigma a}{a_1},$$

worin Σa das oben erläuterte Arbeitsvermögen, a_1 den Inhalt des umschreibenden Rechteckes, das sich errechnet

aus der höchsten erreichten Spannung (σ_B) und der größten beobachteten Dehnung (Bruchdehnung, angenähert ε_Z), bedeutet. Für das oben angegebene Beispiel ist $a_1 = 4480 \cdot 0,248 = 1110$, mithin der Völligkeitsgrad

$$\xi = \frac{1010}{1110} = 0,91.$$

Für Flußeisen schwankt der Völligkeitsgrad zwischen 0,89—0,93, für Kupfer und seine Legierungen (Messing usw.) ist er kleiner, etwa 0,85.

Es ist sonach möglich, auch wenn keine Dehnungsmessungen während des Versuches vorgenommen wurden und graphische Darstellungen des ganzen Dehnungsverlaufes nicht vorliegen, das Arbeitsvermögen des Materiales zu ermitteln, selbst wenn, wie dies bei den gewöhnlichen Zerreißversuchen in der Praxis Gebrauch ist, nur Bruchspannung und Bruchdehnung festgestellt wurden, denn das Arbeitsvermögen ist angenähert:

$$\Sigma a = \sigma_B \cdot \delta_{10} \cdot \xi.$$

i) Verlauf des Versuches mit anderen Metallen (Gußeisen, Kupfer).

Es soll nicht unterlassen werden, nochmals darauf aufmerksam zu machen, daß die wichtigsten Eigentümlichkeiten beim Verlauf eines Zugversuches mit einem Material als Beispiel erörtert wurden, das alle charakteristischen Erscheinungen besonders scharf zum Ausdruck bringt, nämlich weichem Flußeisen. Wie schon auf S. 19 erwähnt, verhalten sich nicht alle Materialien in bezug auf charakteristische Spannungsstufen (P -Grenze, S -Grenze usw.) so wie das Flußeisen. Wenig formänderungsfähige Körper, wie Gußeisen z. B., liefern Dehnungsschau-

bilder, wie sie Fig. 20 zeigt. Bei solchem Material kann weder von Proportionalitäts-, noch von Streckgrenze gesprochen werden. Das Material zeigt auch vor dem Bruche keine Einschnürung, und seine Bruchdehnung wird sich in

Größen bewegen, die oft mit gewöhnlichen Meßwerkzeugen kaum feststellbar sind. — Wiederum anderen Verlauf nehmen in der Regel die Dehnungsschaubilder für Kupfer (Fig. 21).

Die dargestellte Schaulinie kann indessen für Kupfer nicht verallgemeinert werden, denn die verschieden behandelten Kupfersorten zeigen vielfach verschiedenartiges Verhalten beim Zugversuch. Schwierigkeiten bei der Ermittlung der

P- und *S*-Grenze bereiten oft auch Flußeisensorten, besonders diejenigen mit höherem Kohlenstoffgehalt (Stahl), bei denen wohl Proportionalität und Fließen vorhanden sind, der Übergang aber so allmählich verläuft, daß eigentliche „Grenzen“ nicht mit Sicherheit beim Versuch ermittelt werden können (s. S. 19).

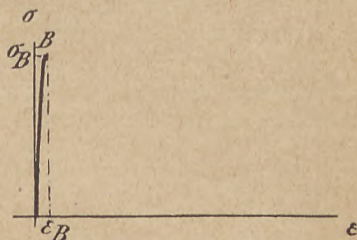


Fig. 20. Zugversuch mit Gußeisen.

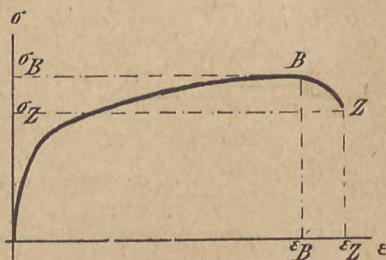


Fig. 21. Zugversuch mit Kupfer.

2. Druckversuch.

a) Begriffsfeststellungen.

Ordnet man die Übertragung der vom Kräftezeuger der Prüfungsmaschine ausgeübten Kräfte auf den Probekörper so an, daß die Kräfte P (s. Fig. 22) in der Pfeilrichtung wirken, so erfährt der Probekörper eine Druckbeanspruchung. Der auf die Querschnittseinheit entfallende Belastungsanteil, die Druckspannung, errechnet sich aus der nachstehenden Gleichung:

$$-\sigma = -\frac{P}{f} \text{ kg/qcm oder at.}$$

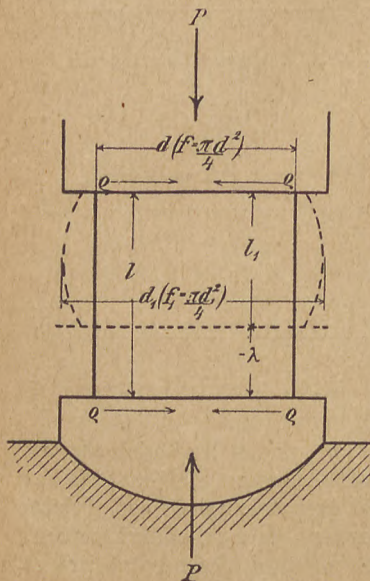


Fig. 22. Druckbeanspruchung.

Es ist zur Unterscheidung zweckmäßig, die Zeichen für Spannung, Kraft, Längenänderung, sobald es sich um Angaben über Druckversuche handelt, mit negativem Vorzeichen zu versehen.

Unterwirft man den Versuchskörper einer Druckbeanspruchung, so erfährt er wie beim Zugversuch eine Formänderung, indessen äußert sie sich in diesem Falle in einer Zusammen-
drückung, also einer Höhenverminde-

rung und einer Querschnittsvergrößerung. Die Verkürzung, die der Körper erfährt, ist $-\lambda = l - l_1$, mithin die Verkürzung der Längeneinheit

$$-\varepsilon = \frac{-\lambda}{l} = \frac{l - l_1}{l} = 1 - \frac{l_1}{l}$$

oder in Prozenten der ursprünglichen Länge

$$-\delta = 100 \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) = 100 \cdot -\varepsilon.$$

Ebenso errechnen sich wie beim Zugversuch

$$\alpha = \frac{-\varepsilon}{-\sigma}$$

und der Elastizitätsmodul

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

Für die Querschnittsvergrößerung ergibt sich, ausgedrückt in Prozenten des ursprünglichen Querschnittes:

$$q = \left(\frac{f_1}{f} - 1 \right) 100.$$

Die Querschnittsvergrößerung pflegt nicht über die ganze Länge des Probekörpers gleichmäßig zu verlaufen. In der Nähe der Endflächen, die sich gegen die Druckstücke der Prüfungsmaschine legen, ist sie geringer als in der Mitte des Körpers; sie wächst von beiden Endflächen nach der Mitte des Körpers zu, weshalb der Probekörper, besonders wenn es sich um ausgeprägt formänderungsfähige Materialien handelt, Tonnenform annimmt, wie punktiert in Fig. 22 angedeutet ist. Diese Erscheinung wird der Reibung zwischen Endflächen und Druckplatten

der Maschine, die die Querschnittsvergrößerung behindert (Kräfte ρ , s. Fig. 22), zugeschrieben.

b) Verlauf des Druckversuchs.

Materialien, die beim Zugversuch Proportionalität zwischen Belastung und Dehnung zeigen, pflegen auch beim Druckversuch proportionale Längenänderungen zu ergeben, wobei indessen wiederum nur bis zu einer bestimmten Spannungsgrenze, der Proportionalitätsgrenze — σ_P , für gleiche Spannungssteigerungen gleiche Verkürzungen erfolgen; oberhalb — σ_P wachsen die Verkürzungen schneller als die Spannungen, bis schließlich analog den Vorgängen an der Fließgrenze beim Zugversuch (s. S. 49) auch hier „Fließen“ eintritt. Die Spannungsgrenze, bei der diese Erscheinung auftritt, pflegt man Quetschgrenze (— σ_S) zu nennen. Den Verlauf eines Druckversuches mit einem Material, das P - und S -grenze zeigt, veranschaulicht Fig. 23. Die Schaulinien für den Druckversuch trägt man zum Unterschiede von denjenigen des Zugversuches zweckmäßig im gegenüberliegenden Quadranten auf.

Körper mit großer Formänderungsfähigkeit pflegen auch beim Druckversuch nach Überschreiten der Quetschgrenze ihr Oberflächenaussehen zu verändern. Beim Flußeisen z. B. wird die blanke Oberfläche krispelig; andere Materialien, wie Blei und Legierungen, die für gewöhnlich nicht homogene Gemenge darstellen, werden an der Oberfläche runzelig, eine Erscheinung, die sich damit erklärt, daß die weicheren Materialteile der Legierung, die formänderungsfähiger als die harten sind, an der Oberfläche herausgedrängt werden, während die härteren dagegen zurückbleiben.

Wie der weitere Verlauf der Schaulinie in Fig. 23 zeigt, biegt der Linienzug oberhalb der Quetschgrenze, d. h. die

Fließkurve erst stärker, allmählich immer schwächer von der Ordinatenachse ab, die Längenänderungen des Körpers werden also für gleiche Belastungsstufen immer kleinere. Trotzdem die Gesamtbelastung (P) in gleichen Belastungsstufen gesteigert wird, wächst nämlich die tatsächliche Belastung der Querschnittseinheit ($-\sigma$) immer weniger an, weil der Querschnitt des Probekörpers mit zunehmender Formänderung mehr und mehr vergrößert wird.

Es ist deswegen beim Druckversuch mit weichen Materialien auch unmöglich, die Bruchfestigkeit zu ermitteln. Man muß sich in solchen Fällen mit der Feststellung der Quetschgrenze begnügen oder, wenn diese nicht ausgeprägt vorhanden ist, ent-

weder mit der Ermittlung des Formänderungsverlaufes innerhalb bestimmter Belastungsgrenzen oder mit der bei einer bestimmten Zusammendrückung des Probekörpers erreichten Höchstbelastung.

Anders als in Fig. 23 verläuft die Kurve für den Druckversuch, wenn man harte Körper (Gußeisen, Stahl, Gesteine usw.) prüft. Sie pflegen in der Regel ohne nennenswerte Formänderung zum Bruch zu kommen, wo-

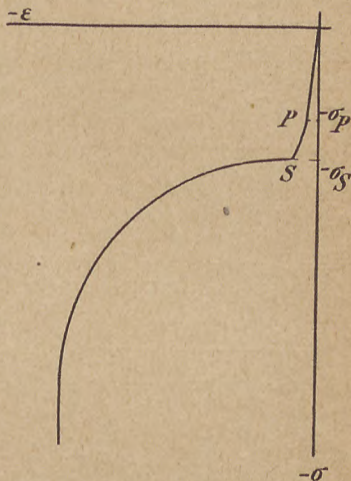


Fig. 23. Verlauf des Druckversuches (Flußeisen).

bei gewöhnlich Quetschgrenze und Bruchgrenze ($-\sigma_B$) nahezu zusammenfallen.

Interessant sind die Brucherscheinungen beim Druckversuch; es prägen sich in der Regel Druckkegel oder bei würfelförmigen Körpern Druckpyramiden nach Fig. 24 aus, während der umgebende Mantelring zerstört wird (Versuche zur Erklärung dieser Erscheinung s. unter angegebener Literatur). Nicht selten ist auch eine Brucherscheinung

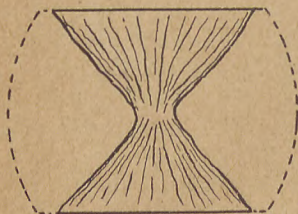


Fig. 24. Brucherscheinung beim Druckversuch.



Fig. 25. Brucherscheinung beim Druckversuch.

nach Fig. 25, bei der die Bruchlinie etwa unter 45° verläuft. Holzkörper pflegen fast regelmäßig in dieser Form zu Bruch zu gehen, indem die einzelnen Fasern längs der Bruchlinie umknicken und die beiden Bruchstücke sich gegeneinander abschieben.

Literatur.

- G. H. Gulliver, Einfluß der Stirnflächenreibung bei Druckversuchen. *Engineering* 1908, Dezember, S. 866.
 Fr. Riedel, Die Grundlagen zur Ermittlung des Arbeitsbedarfes beim Schmieden unter der Presse. *Zeitschr. d. Ver. d. Ingen.* 1913, Nr. 22, S. 845.

c) Einspannung bei Druckversuch.

Die Einspannung des Probekörpers in die Prüfmaschine ist beim Druckversuch schwieriger als beim Zugversuch, weil infolge nichtzentrischer Einspannung exzentrische Druckbeanspruchungen das Versuchsergebnis fehlerhaft beeinflussen können. Die Einspannköpfe der Prüfmaschinen sind für Druckversuche meist so eingerichtet, daß eine der Druckplatten, gegen die sich der Probekörper mit seinen Endflächen anlegt, fest, die andere dagegen im Kugellager beweglich gelagert ist (s. Fig. 22). Man erreicht dadurch gleichmäßige Druckverteilung über den ganzen Querschnitt der Probe, auch wenn die beiden Endflächen des Probekörpers nicht genau parallel zueinander gearbeitet sind, vorausgesetzt, daß sie wenigstens nahezu eben sind. Gewöhnlich ist die untere Druckplatte mit Kugellager versehen; zweckmäßiger ist indessen die Anbringung des Kugellagers an der oberen Druckplatte nach Rudeloff (Dinglers Journal 1905, S. 401). Um die genaue Einstellung der Probekörper in die Druckachse der Maschine zu erleichtern, werden auf die Druckplatten konzentrische Kreise um den Druckmittelpunkt oder entsprechende Vierecke aufgetragen.

d) Probenform.

Die Probenform hat auch beim Druckversuch erheblichen Einfluß auf die Versuchsergebnisse, weswegen auch hier dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung zu tragen ist. Der Normaldruckkörper ist ein Zylinder, dessen Höhe gleich dem Durchmesser ist, oder der Würfel, also

Körper, bei denen der Quotient $\frac{1}{n} = \frac{\sqrt[3]{f}}{l}$ etwa 0,9—1,0 ist.

Bei diesem Verhältnis wird — ε nachweislich am wenigsten beeinflußt und reine Druckwirkung erzielt, wohingegen Knickwirkungen hinzutreten, wenn $\frac{1}{n}$ wesentlich kleiner als 1 gemacht wird; die Höhe des Körpers wird in diesem Falle gegenüber dem Querschnitt zu groß und der Körper knickt aus.

Es bleibt noch zu bemerken, daß man zweckmäßig die Probenform, besonders die Größe der Querschnittsfläche so bemißt, daß die Leistungen der gebräuchlichsten Prüfungsmaschinen ausreichen, um Quetsch- bzw. Bruchgrenze zu erreichen. Für Metalle usw. kommen meist Zylinder von 2—3 cm Durchmesser oder Würfel mit Kantenlänge von 2—3 cm, für Bindemittel (Zement usw.) Würfel mit 7,1 cm Kantenlänge zur Anwendung.

3. Knickversuch.

Wird beim Druckversuch, wie auf Seite 67 bemerkt, der Quotient $\frac{1}{n}$ erheblich kleiner als 1 gemacht und somit die Höhe oder Länge des Versuchskörpers im Verhältnis zu seiner Querschnittsfläche zu groß, so treten nicht mehr reine Druckbeanspruchungen und deren Folgeerscheinungen im Probekörper ein; der Körper nimmt nicht die in Fig. 22 dargestellte Tonnenform an, sondern knickt nach einer Seite aus.

Man kann hinsichtlich der Einspannung der Probenenden für den Knickversuch vier Arten unterscheiden, die die Fig. 26 bis 29 erläutern. Bei den Belastungsfällen nach Fig. 26 und 27 sind die Probenenden auf der einen Seite fest eingespannt, auf der anderen hingegen beweglich gelagert, während bei den anderen Fällen entweder beide

Enden beweglich (Fig. 28) oder beide Enden fest eingespannt sind (Fig. 29). Beim Belastungsfall nach Fig. 26 ist im Gegensatz zu den übrigen Fällen das Probenende, an dem die parallel zur Stabachse wirkende Kraft P angreift, nicht geführt, so daß dieses Ende frei nach der Seite ausweichen kann.

Für diese vier Belastungsarten wurden die bekannten Euler-Formeln zur Errechnung der Grenzbelastungen aufgestellt, deren Geltungsbereich jedoch durch neuere theoretische und versuchstechnische Studien (v. Tetmajer,

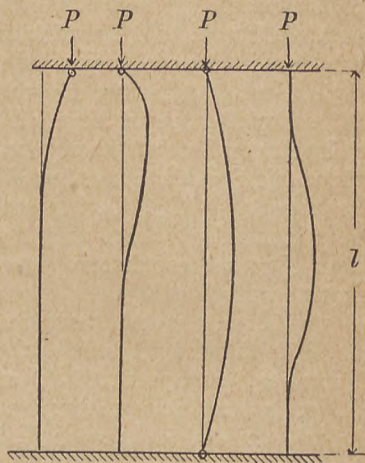


Fig. 26, 27, 28, 29,
Vier Knickbeanspruchungen nach Euler.

Schwarz-Rankine, Kármán, Engesser u. a.,

Literaturhinweise s. S. 71) wesentliche Einschränkung erfahren hat. Die Euler-Formeln lauten für

$$\text{Fall nach Fig. 26 } P = \frac{\pi^2}{4} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2},$$

$$,, \quad ,, \quad ,, \quad 27 \quad P = 2\pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2},$$

$$,, \quad ,, \quad ,, \quad 28 \quad P = \pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2},$$

$$,, \quad ,, \quad ,, \quad 29 \quad P = 4\pi^2 \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{J}{l^2},$$

worin J das in Frage kommende Trägheitsmoment, l die Länge der Probe bedeutet.

Für die Versuche, wie sie mit Prüfungsmaschinen ausgeführt werden, kommt gewöhnlich der Belastungsfall nach Fig. 28 in Frage. Die Einspannung der Probenenden ist versuchstechnisch nicht leicht; man sucht möglichst zentrische Druckübertragung dadurch zu erzielen, daß man die Druckplatten, gegen die sich die Probenenden stützen, in Kugellagern lagert, oder man benutzt besondere Druckstücke mit Spitzen, Schneiden oder Kugeln zur Druckübertragung. — Die Kraftwirkung beim Knickversuch äußert sich dahin, daß der Körper nicht wie bei Aufnahme reiner Druckbeanspruchung tonnenförmige Gestalt annimmt, sondern nach einer freien Seite ausbiegt. Man pflegt neben den ausgeübten Belastungen die Formänderungen des Probestückes an solchen Punkten, die für die Beurteilung des Spannungsverlaufes von Interesse sind, mit geeigneten Feinmeßvorrichtungen (Bauschingers Rollen- oder Knickmeßapparate, Martens' Spiegelapparate u. a. s. S. 146) zu messen.

Die mannigfachen, schwer kontrollierbaren Einflüsse, die sich während des Versuches geltend machen können, sei es, daß sie von den Einspannungen oder den Druckübertragungsstücken ausgehen, sei es, daß sie durch besondere Eigentümlichkeiten des Probekörpers, wie nicht-homogenes Material oder windschiefe Form der Probe usw., veranlaßt werden, bewirken oft, daß die Ergebnisse der Formänderungsmessung keine Regelmäßigkeit oder Gesetzmäßigkeit zeigen, so daß Formänderungsgrenzen, wie die Proportionalitätsgrenze, sich in den Meßergebnissen oft nicht scharf auszuprägen pflegen. Der Knickversuch pflegt daher als reine Materialprobe nur selten Interesse zu haben, und wo dies gelegentlich der Fall ist, kann meistens nur

die ermittelte Höchstlast, d. h. diejenige Belastung, bei der der Probekörper zum Ausknicken oder zum Bruch kam, zur Materialbeurteilung herangezogen werden. Wertvolle Unterlagen für die Ermittlung der Tragfähigkeit und der Spannungsverteilung sowie zur Nachprüfung theoretischer Berechnungsgrundlagen bietet indessen dem Konstrukteur der Knickversuch an Konstruktionsteilen, besonders neuerdings, seit auch die Eisenbetonbauweise bedeutend an Verbreitung gewonnen hat. Man pflegt bei solchen Belastungsversuchen mit Säulen, Stützen, gegliederten Stäben u. dgl., die in stehend oder liegend angeordneten Prüfungsmaschinen (s. S. 137) ausgeführt werden, die Versuchsbedingungen tunlichst den für die wirkliche Belastung im Bauwerk in Frage kommenden Verhältnissen anzupassen.

Literatur.

- Rankine, A manual of applied mechanics. London 1858.
 Engesser, Ztschr. d. Hannov. Ingen.- u. Arch.-Ver. 1889, S. 455.
 Schweizer. Bauztg. 1895, S. 24. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1898, S. 927.
 v. Tetmajer, Gesetze der Knickungs- und zusammengesetzten Druckfestigkeit. Wien 1903. Deuticke.
 Rudeloff, Knickversuche im Kgl. Materialprüfungsamte mit einer Strebe des eingestürzten Hamburger Gasbehälters. Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1912 I, S. 615.
 T. v. Kármán, Die Knickfestigkeit gerader Stäbe. Phys. Ztg. 1908, 4, S. 136. — Ders., Mitteilung über Forschungsarb. d. Ver. d. Ing., Heft 81, 1910.
 Mies, Die Knicksicherheit von Kolbenstangen. Dingers polyt. Journal 1912, S. 273.
 Feinmeßvorrichtung für Knickversuche nach Smith. Engineering 1908 II, S. 253.
 Müller-Breslau, Neuere Methoden der Festigkeitslehre. 4. Aufl.
 Fischmann u. Weirich, Die Frage der Knickung und ihre planmäßige Lösung durch den Versuch. Eisenbau 1916, S. 255.

Stephan, Der Knickvorgang und die Knickformel. Verhdlg. d. Ver. z. Bef. d. Gewerbfl. 1918, Juni, S. 145.

Natalis, Druck- und Knickfestigkeit. Dinglers polyt. Journal 1919, S. 69.

4. Biegeversuch.

Beim Biegeversuch können die Beanspruchungen des Probekörpers durch eine Einzelkraft P entweder nach Fig. 30 oder nach Fig. 31 erfolgen. Die letztere Wirkungsart ist bei der Materialprüfung die gebräuchlichere; die Probe ist dabei an den Enden auf Stützpunkten gelagert und die Kraft greift in der Mitte der Probe an. Die Konstruktionsteile der Prüfungsmaschinen, die als Stützpunkte beim Biegeversuch dienen, pflegt man drehbar, als

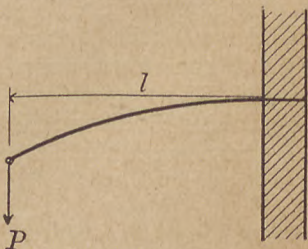


Fig. 30. Biegebeanspruchung (einseitig eingespannter Stab).

Rollen oder dgl. anzuordnen, damit die Reibung des Probekörpers an den Auflagestellen vermindert wird.

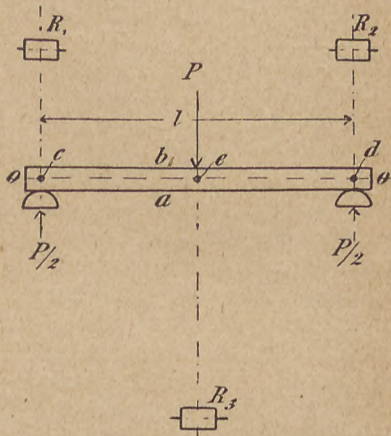
Auch der Biegeversuch findet als reine Materialprobe im Materialprüfungswesen nur selten Verwendung. Gußeisen, Holz, Eisenbahnschienen und Beton pflegt man nach dem Ausfall des Biegeversuches zu beurteilen; häufig werden aber Biegeversuche als Belastungsproben mit fertigen Konstruktionen, wie Brücken, Decken usw., ausgeführt. Für den Biegeversuch als Materialprobe gibt man dem Versuchskörper möglichst einfache Querschnittsform, deren Trägheitsmoment leicht zu errechnen ist.

Gemessen werden die vom Versuchskörper getragenen Belastungen, bezogen auf die Querschnittseinheit und die

dabei erzielten Durchbiegungen der sogenannten neutralen Faser, d. h. der Schwerpunktsachse des Körpers. Die Längsfasern eines stabförmigen Probekörpers, der nach Fig. 31 gebogen wird, erfahren auf der mit a bezeichneten Seite Zugspannungen, auf der mit b

bezeichneten hingegen Druckspannungen, die an den Außenseiten am größten sind und nach der Mittelachse des Körpers zu kleiner, in der Mittel- oder Schwerpunktsachse des Körpers, der neutralen Faser, aber O werden. Die Spannungen wachsen also proportional dem Abstände der Flächenelemente von der neutralen Achse.

Um die Durchbiegung der neutralen Achse des Probestabes einwandfrei zu messen, ist es erforderlich, daß die örtlichen Verdrückungen des Materials und Bewegungen des Probestabes über den Auflagerstellen berücksichtigt werden. Es finden deshalb gewöhnlich drei Meßapparate Verwendung, von denen je einer die Bewegungen der in der neu-



- $R_1 R_2 R_3$ = Rollenapparate (Bauschinger).
 $o-o$ = Neutrale Faser.
 a = Zugseite. b = Druckseite.
 $c d e$ = Meßpunkte.
 l = Stützweite.

Fig. 31.

Biegungsbeanspruchung (Stab an beiden Enden unterstützt, Einzellast in der Mitte).

tralen Achse des Stabes gelegenen Punkte c und d (s. Fig. 31) über den beiden Auflagern, der dritte diejenige eines in der Mitte der Stablänge ebenfalls in der neutralen Achse markierten Punktes e mißt. Die wirkliche Durchbiegung der neutralen Faser errechnet sich dann zu

$e - \frac{c + d}{2}$. Als Meßapparate finden Verwendung die

Rollenapparate nach Bauschinger oder sogenannte Leunerapparate (s. S. 153). Bei weichen, stark formänderungsfähigen Materialien pflegt der Verlauf des Biegeversuches analog demjenigen des Zugversuches zu sein. Man findet genau wie dort eine Proportionalitätsgrenze σ_P und eine Fließgrenze σ_S , die man Biegegrenze nennt. Mit dem Erreichen der Biegegrenze wird bei weichen Materialien der Versuch in der Regel abgebrochen, da in vielen Fällen der Probestab nicht zum Bruch gebracht werden kann, weil entweder die Maschineneinrichtungen die Durchbiegung nur bis zu bestimmtem $ak\beta$ gestatten oder Stäbe aus weichen Materialien sich so weit werden durchbiegen lassen, daß die beiden Schenkel um 180° gebogen werden, die Probenenden also zur Auflage aufeinander kommen, ohne daß der Bruch der Probe eintritt. — Harte, wenig formänderungsfähige Materialien pflegen gegen Biegung sehr empfindlich zu sein und kommen daher ohne nennenswerte Durchbiegung zum Bruch.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse der Biegeversuche mit einer nach Fig. 31 angreifenden Einzelkraft P kommen die nachstehenden Gleichungen in Frage.

Die Spannungen, d. h. die Belastungen auf die Querschnittseinheit einer Faser im Abstände e von der neutralen Achse sind

$$\sigma = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{e}{J},$$

worin P die Gesamtbelastung, l die Länge der Probe zwischen den Auflagerpunkten, J das Trägheitsmoment der Probe bedeuten.

Es ist ferner:

$$\frac{1}{E} = a = \frac{\varepsilon}{\sigma} = 48 \frac{J}{l^3} \cdot \frac{\delta_b}{P},$$

worin J das Trägheitsmoment und δ_b die Durchbiegung in der Mitte bedeuten.

Für die Angabe der Durchbiegungen δ_b empfiehlt Martens, um dem Ähnlichkeitsgesetz (s. S. 42) Rechnung zu tragen, den Wert Biegungsgröße, die den Biegungspfeil für die Spannungseinheit angibt, wobei Biegungspfeil den Quotienten δ_b/l , d. h. die Durchbiegung für die Längeneinheit der Stützweite, bedeutet. Biegungsgröße ist also:

$$\frac{\delta_b/l}{\sigma}.$$

Indessen haben diese Größen praktisch beim Biegeversuch weniger Bedeutung als bei den vorher beschriebenen Versuchsarten, weil, wie schon bemerkt, Materialien, mit denen Biegeversuche als Materialprobe ausgeführt werden, meist nicht nennenswerte Durchbiegungen (Holz ausgenommen) erfahren.

5. Torsionsversuch.

Der Torsionsversuch zur Bestimmung der Drehfestigkeit des Materials findet hie und da im Materialprüfungswesen Anwendung. Beim Torsionsversuch wird die Probe durch ein Kräftepaar beansprucht, dessen Ebene senkrecht zur Längsachse des Versuchsstückes steht und das bestrebt ist, den Versuchskörper um seine Längsachse zu verwinden.

Im großen wird der Versuch meist mit Wellen, Achsen und sonstigen im Betriebe auf Verdrehen beanspruchten Maschinenteilen ausgeführt; im kleinen findet er ausgiebigste Verwendung als sogenannte technologische Materialprobe bei der Beurteilung von Drähten, die zur Seilfertigung Verwendung finden. Die Versuchsanordnung wird gewöhnlich so getroffen, daß das eine Probenende in entsprechend geformter Einspannvorrichtung festgelegt wird, die von der Antriebsvorrichtung der Maschine her in drehende Bewegung versetzt werden kann. Am anderen Ende des Versuchskörpers, das gleichfalls in einer Einspannmuffe befestigt ist, wird das auf Verdrehung wirkende Moment dadurch gemessen, daß man es an einem bestimmten Hebelarm auf die Meßvorrichtung der Maschine, meist eine Hebelwage oder hydraulische Meßdose wirken läßt. Die Größe der am Hebelende wirkenden Gegenkraft wird durch die Gewichte bestimmt, die man an der Wagevorrichtung der Maschine zur Wirkung bringen muß (oder durch den Wasserdruck in der Meßdose), um Gleichgewicht herzustellen. Die Differenz der Verdrehungen zweier in bestimmtem Abstände voneinander liegender Querschnitte, die meist mit Feinmeßinstrumenten gemessen wird, gibt die Verdrehung des Probekörpers für die Meßlänge zwischen den beiden Querschnitten.

Eine einfache Feinmeßvorrichtung sei hier kurz beschrieben. An den zur Messung benutzten beiden Querschnitten wird je ein plangeschliffener Spiegel, wie sie bei den Martensschen Spiegelapparaten (s. S. 147) Verwendung finden, am Versuchskörper so befestigt, daß der Spiegel sowohl um seine Horizontal- als auch Vertikalachse gedreht werden kann. In bestimmter Entfernung vom Spiegel, deren Größe man je nach den in Frage kommenden Verhältnissen wählen muß, ist an einem Fernrohr eine

Skala mit Millimeterteilung angebracht. Mit Hilfe des Fernrohres mißt man die Verschiebungen des Spiegelbildes der Skala gegen ein Fadenkreuz im Fernrohr, nachdem man zuvor durch Ausrichten des Fernrohres das Fadenkreuz auf die Spiegelmitte eingestellt und das Spiegelbild der Skala durch entsprechendes Kippen des Spiegels in das Gesichtsfeld des Fernrohres gebracht hat. Die beobachtete Verschiebung des Skalabildes gibt ein Maß für die Verdrehung des Stabquerschnittes, an dem der Spiegel befestigt ist, weil letzterer der Drehbewegung folgt. Die Übersetzung, in der diese Verdrehung gemessen wird, ist hierbei abhängig von der Entfernung der Skala vom Spiegel.

Die Formänderungsmessung ergibt für Materialien, die auch beim Zugversuch Proportionalität zeigen, und solche werden ja in den weitaus meisten Fällen für den Drehversuch im großen in Frage kommen, auch für den Drehversuch ausgesprochene Proportionalität und meistens auch ausgeprägte Proportionalitätsgrenze (σ_P). Oberhalb der Proportionalitätsgrenze nehmen die Formänderungen gegenüber den Belastungen rasch zu, bis schließlich Fließen eintritt und die sogenannte Verdrehungsgrenze (σ_S) erreicht ist, womit man den Versuch abzubrechen pflegt. Aus der Richtung, in der die Ablesungen an den vorher beschriebenen Feinmeßapparaten beim Eintritt des Fließens vorgehen, kann man Schlüsse über die Lage der zum Fließen kommenden Probenziele ziehen. Gehen beide Ablesungen während des Fließens, wie beim bisherigen Verlauf des Versuchs, vor, so müssen die besonders im Fließen begriffenen Querschnitte außerhalb der durch die beiden Spiegel abgegrenzten Probenlänge (meistens nahe der Einspannung der Probe) an der Wagenseite der Maschine liegen; gehen beide Ablesungen

zurück, so fließt der Versuchskörper ebenfalls außerhalb der Meßlänge, jedoch in der Nähe der Antriebsseite der Maschine. Geht eine Spiegelablesung vor, die andere hingegen zurück, so fließt das Material innerhalb der Meßlänge. —

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse kommen die nachstehenden Beziehungen in Frage:

$$\sigma_P = \frac{Pr_P}{W_p} \text{ kg/qcm,}$$

$$\sigma_S = \frac{Pr_S}{W_p} \text{ kg/qcm,}$$

worin Pr das Drehmoment an der P - bzw. S -Grenze in cmkg, W_p das polare Widerstandsmoment $\left(\frac{\pi d^3}{16}\right)$ für kreisrunden Querschnitt) bedeuten.

Der sogenannte Gleitmodul G , der nach Bach 0,385 des Elastizitätsmoduls beträgt, errechnet sich aus:

$$G = \frac{\Delta Pr \cdot l}{\varphi \cdot J_p},$$

worin bedeutet: ΔPr die Steigerung des Drehmomentes in cmkg, l die Entfernung der zur Umdrehungsmessung benützten Querschnitte voneinander, J_p das polare Trägheitsmoment $\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)$ für kreisrunden Querschnitt), φ den Verdrehungswinkel.

Der Verdrehungswinkel $\varphi = \frac{\Delta \lambda}{A \cdot 200}$, wenn $\Delta \lambda$ der mittlere Verdrehungszuwachs für die Steigerung des Drehmomentes um ΔPr und A der Abstand der Spiegel der

oben beschriebenen Feinmeßvorrichtung von den Skalen ist; die Zahl 200 im Nenner ist in diesem Falle hinzugefügt unter der Voraussetzung, daß die Ablesung an den Skalen nach $\frac{1}{100}$ cm erfolgt und wegen der Spiegelwirkung mit der doppelten Entfernung von A zu rechnen ist. Es ist mithin

$$G = \frac{\Delta Pr \cdot l \cdot A \cdot 200}{J_p \cdot \Delta \lambda}.$$

Den reziproken Wert $\frac{1}{G} = \beta$ nennt man Schubzahl entsprechend der Dehnungszahl α .

Literatur.

- Hancock, Einfluß des wechselweisen Verdrehens auf die elastischen Eigenschaften von Metallen. Dingers polyt. Journal 1906, S. 646.
- Hopkinson u. Thring, Verdrehungsmesser für Wellen. Engineering 1907 I, S. 768.
- Lavard, Verdrehungsversuche mit Probestäben aus Schweiß-eisen, Flußeisen und 3proz. Nickelstahl. Engineering 1909 II, S. 308.
- Lilly, Neue Torsionsmaschine. Engineering 1911 I, S. 175.
- P. Breuil, Verdrehungsversuche. Bulletin du Laboratoire d'Essais du Conservat. des Arts et Métiers, Nr. 14.
- Mc Adam, Alternating torsion tests. Iron Age 1917, S. 125.

6. Scher- und Lochversuche.

a) Scherversuch.

Bei dem Scherversuch handelt es sich um Feststellung des Widerstandes, den ein Körper dem Verschieben zweier ebener Querschnitte gegeneinander entgegensetzt.

Es hat nicht an Vorschlägen gefehlt, den verhältnismäßig einfach auszuführenden Scherversuch an die Stelle des umständlicheren Zerreißversuches treten zu lassen; indessen haben diese Vorschläge noch nicht den

erwarteten Anklang gefunden. Kick empfiehlt den Scherversuch zur Bestimmung der Härte der Materialien, da er Härte identisch mit Scherfestigkeit erklärt.

Die Beanspruchung des Probekörpers beim Scherversuch kann entweder einschnittig oder zweischnittig sein, je nachdem ein Querschnitt nach Fig. 32 oder deren zwei nach Fig. 33 auf Abscheren beansprucht

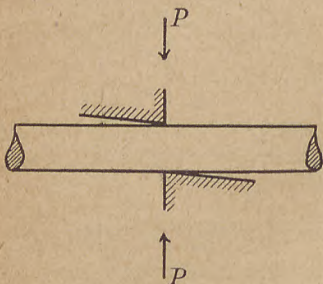


Fig. 32.

Einschnittige Scherbeanspruchung.

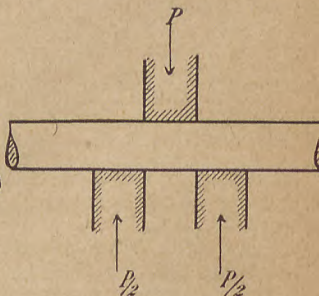


Fig. 33.

Zweischnittige Scherbeanspruchung.

werden; die letztere Versuchsart dürfte die gebräuchlichere sein.

Einen zweckmäßigen Apparat für die Ausführung zweischnittiger Scherversuche hat Martens konstruiert. Er ist in Fig. 34 wiedergegeben und besteht aus dem zweiseitigen gußeisernen Gehäuse *a*, in dem drei kreisrunde Scherbacken *b*, *c*, *d* nebeneinander gelagert sind. Die beiden äußeren Backen liegen fest, während die mittlere zwischen ihnen in einem beweglichen Schieber *e* gehalten ist, auf dessen oberer, aus dem Gehäuse herausragender Druckfläche die scherende Kraft *P* wirkt. Die Scherbacken haben in ihrem Mittelpunkte Bohrungen, deren Durchmesser dem Durchmesser der zu scherenden Probe ent-

spricht. Für den Versuch wird die Scherprobe in die Bohrungen der drei Scherbacken eingeführt und das gußeiserne Gehäuse durch die seitlich angebrachten Verschlußmuttern f geschlossen. Mit Hilfe der Verschlußmuttern können gleichzeitig die beiden seitlichen Scherbacken so verschoben werden, daß Schieber e und die mittlere Backe gerade leicht beweglich zwischen ihnen gleiten können.

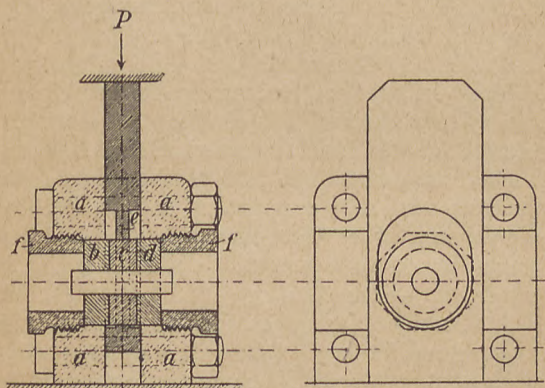


Fig. 34. Scherapparat nach Martens („Materialienkunde“, S. 154).

Der ganze Apparat wird als Druckkörper in eine Prüfungsmaschine eingebaut. Die Belastung der Probe erfolgt durch den Krafterzeuger der Maschine in der Pfeilrichtung (s. Fig. 34). Die zum Abscheren der Probe benötigte Kraft P wird mit dem Kraftmesser der Prüfungsmaschine bestimmt. Die Scherspannung errechnet sich bei der zweiseitigen Beanspruchung aus dem Quotienten $\frac{P}{2f}$, worin f die Querschnittsfläche bedeutet.

Die durch diese Versuchsart ermittelte Festigkeit ist indessen nicht als reine Scherfestigkeit anzusehen. Abgesehen von der örtlichen Verdrückung, die der Probekörper an der Auflage- und Druckstelle der mittleren Scherbacke erfährt, treten, sobald das Material Formänderungen erleidet, Biegungsbeanspruchungen hinzu, da die zylindrischen Scherproben naturgemäß nicht ohne geringes Spiel in den Bohrungen der Scherbacken hergestellt werden können und Durchbiegung in der Kraft- richtung daher möglich wird.

In bezug auf die Probenform ist noch zu bemerken, daß man zylindrische Probekörper verwendet, deren Länge etwas größer als die dreifache Scherbackendicke gemacht wird. Die Scherbackendicke wird zweckmäßig gleich dem Durchmesser der Probe gemacht, so daß die beiden auf Scheren beanspruchten Querschnitte in einem Abstände, der gleich dem Durchmesser der Probe ist, voneinander entfernt liegen. — Zwischen Zug- und Scherfestigkeit sind für einzelne Materialien bestimmte Beziehungen nachgewiesen. Für Flußeisen ist die Scherfestigkeit gleich 0,7—0,8 der Zugfestigkeit, für Gußeisen sind beide Festigkeiten nahezu gleich.

b) Lochversuch.

Beim Lochversuch kommt gleichfalls die Scherfestigkeit in Frage, indessen ist die Art der Beanspruchung der Probe eine andere als beim eigentlichen Scherversuch. Mit Hilfe eines geführten Stahlstempels wird aus der Probe (gewöhnlich Blechstreifen), die auf eine mit Bohrung versehene Unterlagsplatte gelegt wird, ein Zylinder herausgeschert. Die Schnittfläche ist also keine ebene, wie beim Scherversuch, sondern eine zylindrische. — Der Lochversuch findet als Materialprobe nur selten Anwendung.

Martens hat auch für diese Versuchsart einen Prüfungsapparat angegeben, der in Fig. 35 dargestellt ist. Im unteren Gußstück *A* werden die stählernen Matrizen *B* eingebaut, im oberen Gußstück *E* ist der gleichfalls aus Stahl hergestellte Stempel *D* geführt, in dessen unterem Ende der eigentliche Lochstempel *C* eingepaßt ist. Durch die seitlich angeordneten Bolzen werden oberes und unteres Gußstück in bestimmter Lage zueinander gehalten. Der ganze Apparat wird wie der Scherapparat in die Prüfmaschine als Druckkörper eingebaut, der Stempel *D* durch den Krafterzeuger der Maschine belastet und die zum Durchschneiden der Probe erforderliche Belastung des Stempels *D* am Kraftmesser der Maschine abgelesen. Die Lochstempel haben entweder ebene oder ausgehöhlte Endfläche. Bei ausgehöhlter Endfläche pflegen die Lochfestigkeiten geringer auszufallen als bei ebener Endfläche. Einige Vergleichszahlen, die von Martens mit Messingblech von 4 mm Dicke erhalten wurden, sind nachstehend wiedergegeben:

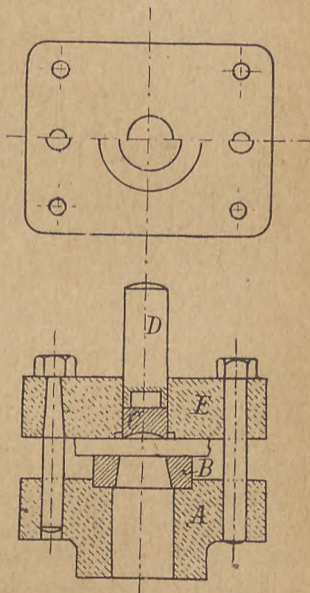


Fig. 35. Lochapparat nach Martens („Materialienkunde“ S. 161).

ausgehöhlter Endfläche pflegen die Lochfestigkeiten geringer auszufallen als bei ebener Endfläche. Einige Vergleichszahlen, die von Martens mit Messingblech von 4 mm Dicke erhalten wurden, sind nachstehend wiedergegeben:

a) bei ebenem Stempel:	2830	2770	2570
b) bei ausgehöhltem Stempel:	2590	2510	2360

Verhältniszahlen für b), wenn

Zahlen für $a = 100$ gesetzt: 92 91 92

Die Lochfestigkeit τ des Materials errechnet sich aus der Gleichung

$$\tau = \frac{P}{f},$$

worin P die zum Durchscheren erforderliche Kraft bedeutet und die auf Scheren beanspruchte Ringfläche f zu setzen ist $= \pi \cdot d \cdot l$ (d der Stempeldurchmesser und l die Probendicke).

B. Festigkeitsversuche mit stoßweiser Belastung (Schlagversuch).

a) Begriffsfeststellung und Versuchsausführung.

Bei den bisher beschriebenen Versuchsarten wurde die Belastung langsam und stetig gesteigert, beim Schlagversuch jedoch findet plötzliche, stoßweise Beanspruchung des Materials statt; die Belastung wird augenblicklich bis auf die beabsichtigte Höhe gesteigert, dementsprechend muß das Material auch augenblicklich seine Formänderung vollziehen. Es leuchtet ein, daß die Materialien hierbei ein wesentlich anderes Verhalten zeigen werden als bei der sogenannten statischen Belastung, d. h. der langsam gesteigerten, und nicht selten findet man, daß Materialien, die beim Zugversuch ausgeprägtes Formänderungsvermögen zeigten, sich beim Schlagversuche als außerordentlich spröde erweisen und ohne wesentliche Formänderung zum Bruch kommen. Gesetzmäßige Beziehungen zwischen Zug- und Schlagfestigkeit bei den einzelnen Materialien lassen sich schwer feststellen. Beide

Versuchsarten sind schon deshalb schwer miteinander vergleichbar, weil beim einfachen Schlagversuch die wirklich vom Versuchskörper aufgenommene Schlagarbeit nicht leicht zu messen ist, da sie teilweise von den Versuchseinrichtungen (Schabotte usw.) aufgenommen wird.

Der Schlagversuch findet im Materialprüfungswesen sowohl als Materialprobe mit zylindrischen oder würfelförmigen Probekörpern oder als Schlagbiegeversuch zur Prüfung ganzer Konstruktionsteile, besonders von Eisenbahnmaterialien, wie Schienen, Achsen, Radreifen usw., Verwendung. Die Versuchsausführung geschieht bei den einfachen Schlagproben in der Weise, daß der Probekörper auf einer Schabotte aufgestellt wird und hiernach durch einen Fallbären, ein eisernes Gewicht, das zwischen geeigneten Vorrichtungen geführt ist und das aus einer bestimmten Höhe zum Herabfallen gebracht wird, einen Schlag erhält.

Da Bauart und Abmessungen der Versuchseinrichtungen besonders beim Schlagversuch von erheblichem Einfluß auf die Versuchsergebnisse sind, so haben sich schon frühzeitig Bestrebungen geltend gemacht, den für Schlagversuche benützten Versuchseinrichtungen möglichst einheitliche Formen zu geben. Durch diese Bestrebungen sind die sogenannten „Normalfallwerke“ entstanden, deren Einrichtungen später (S. 90) beschrieben sind.

Literatur.

- Blount, Kirkaldy und Sankey, Vergleichende Untersuchungen über Zerreißfestigkeit, Schlagzerreißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber wiederholten Hin- und Herbiegeproben. Engineering 1910 I, S. 725.
- Planck, Betrachtungen über dynamische Zugbeanspruchung. Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1912, S. 17, 46.

b) Schlagarbeit und Formänderungsmessung.

Als Maß für die beim Schlagversuch zur Wirkung kommende Kraft wird die Schlagarbeit, d. h. das Produkt aus Bärgewicht und Fallhöhe benutzt, und man beurteilt das Material nach der unter bestimmter Schlagarbeit erlittenen Formänderung. Die Schlagarbeit wird auf die Raumeinheit des Probekörpers bezogen und als sogenannte spezifische Schlagarbeit, die Höhenverminderung in Prozenten der ursprünglichen Höhe angegeben. Den übersichtlichsten Vergleichsmaßstab bietet die Schaulinie, die die erzielten Höhenverminderungen als Abhängige der angewandten Schlagarbeiten darstellt. Die gegenseitigen Beziehungen der in Frage kommenden Größen lassen sich wie folgt ausdrücken:

Spezifische Schlagarbeit $a = \frac{A}{i}$, worin

$A = H \cdot G$ in cmkg ($H =$ Fallhöhe, $G =$ Bärgewicht),

$i =$ Inhalt der Probe in ccm,

daher

$$a = \frac{H \cdot G \text{ cmkg}}{i \text{ ccm}}.$$

Die Höhenverminderung ist

$$-\lambda = l - l_1,$$

daher die Stauchung:

$$-\epsilon_{St} = \frac{-\lambda}{l} = \frac{l - l_1}{l}$$

oder in Prozenten

$$-\delta_{St} = \left(1 - \frac{l_1}{l}\right) \cdot 100.$$

Die Messung der Höhenverminderung wird auf die bleibenden Formänderungen beschränkt, da die Messung der elastischen Formänderungen beim Schlagversuch Schwierigkeiten bereitet. Um einwandfreie Meßergebnisse für die Höhenverminderung zu erhalten, muß man den Probekörper, nachdem er den Schlag des Bären erhalten hat, vor weiteren sogenannten Prellschlägen schützen. Unter dem Einfluß der Elastizität des Probekörpers wird nämlich der Bär nach dem Aufschlagen auf die Probe noch mehrere Male in die Höhe springen und wieder zurück auf die Probe fallen. Man schützt den Probekörper zweckmäßig vor diesen weiteren Schlägen dadurch, daß man ihn vorher an einer Schnur befestigt und ihn nach dem ersten Schläge schnell unter dem Bären hervorzieht, was bei einiger Übung meistens gelingt.

Die zu wählende spezifische Schlagarbeit muß tunlichst dem in Frage kommenden Material angepaßt werden. Einheitliche Vereinbarungen über die für die einzelnen Materialien zu wählenden Schlagarbeiten sind bisher noch nicht getroffen worden. Martens („Materialienkunde“ S. 161) führt als Gütemaßstab den sogenannten Stauchfaktor ein, d. h. diejenige spezifische Schlagarbeit in cmkg/ccm , die aufgewendet werden muß, um einen Probekörper bestimmter Grundform (Kugel, Normalzylinder, Würfel) gerade zum Bruch oder auf $-\epsilon_{St} = 0,80$ zu bringen. Zu seiner Ermittlung schlägt er Vorversuche vor, bei denen von fünf Probekörpern einer mit $1 a$ ($a = \text{spez. Schlagarbeit}$), der zweite mit $2 a$, der dritte mit $4 a$ beansprucht wird, wobei als spezifische Schlagarbeit empfohlen wird: für Eisen und festere Metalle $a = 1000 \text{ cmkg/ccm}$, Kupfer, Bronzen, weiche Legierungen $a = 500 \text{ cmkg/ccm}$, Gußeisen $a = 250 \text{ cmkg/ccm}$, Weichmetalle (Blei usw.) $a = 25 \text{ cmkg/ccm}$. Der vierte und fünfte Probekörper sollen hiernach auf

Grund der bei den Körpern 1—3 gemachten Erfahrungen mit einem Schlage zum Bruch oder auf $\varepsilon_{St} = 0,80$ gebracht werden, so daß also mit einem Schlage der Stauchfaktor erreicht wird.

Literatur.

- Gaßner, Schlagprobe mit Gußeisen. Stahl und Eisen 1910, S. 1367.
 Rasch und Stamer, Stoßbeanspruchung und das Maß der Schlagfestigkeit. Dinglers polyt. Journal 1908, S. 259.
 L. Grenet, Berechnung des Arbeitsaufwandes beim Schlagversuch. Revue Mét. 1909, S. 835.
 J. E. Sears, Schlagversuche. Engineering 1909 I, S. 582, 624.
 Robin, Abhängigkeit der Stauchung zylindrischer Probekörper von ihren Abmessungen. Comptes rend. 1910, S. 639.

c) Beeinflussung der Versuchsergebnisse.

Eine Reihe von Einflüssen, die sich für den Ausfall der Versuchsergebnisse beim Schlagversuch geltend machen, sind Gegenstand eingehender Untersuchungen gewesen.

Nach den Versuchen von Kick und Martens scheint die Geschwindigkeit, mit der die Formänderung vollzogen wird, keinen praktisch bemerkenswerten Einfluß auf den Ausfall des Versuchsergebnisses zu haben, so daß es danach also gleichgültig ist, wie das Produkt Schlagarbeit: Bärgewicht mal Fallhöhe, gebildet ist, ob aus den beiden Faktoren kleines Bärgewicht und große Fallhöhe oder großes Bärgewicht und kleine Fallhöhe.

Andere Versuche von Martens zeigen, daß die mit einer bestimmten Schlagarbeit erzielte Höhenverminderung erheblich größer ausfällt, wenn man die gesamte Schlagarbeit mit einem Schlage zur Wirkung bringt, als wenn man eine Reihe leichterer Schläge ausübt, deren Summe von Schlagarbeiten nicht größer ist als die vorher

mit einem Schlage ausgeübt. Wuchtige Schläge erzielen bei gleicher Gesamtschlagarbeit also größere Höhenverminderungen als leichte Schläge.

Unverkennbar ist auch der Einfluß, den die Beschaffenheit der Endflächen der Probekörper auf die Höhenverminderung ausübt. Körper mit rauh gemachten Endflächen erfahren geringere Höhenverminderungen unter den gleichen Beanspruchungen als solche gleichen Materials, deren Endflächen poliert und womöglich mit Schmiermitteln eingefettet sind. Die Reibung zwischen Endfläche und Aufschlagfläche des Bären bzw. Auflager der Schabotte verhindert hier, ebenso wie beim Druckversuch, die Querschnittsvergrößerung und damit auch die Längenänderung in der Nähe der Endflächen. Bei Körpern mit rauhen Endflächen ist dieser Reibungsbetrag größer als bei solchen mit glatten Endflächen.

d) Brucherscheinungen.

Bei Schlagversuchen pflegen sich charakteristische Brucherscheinungen zu zeigen, und zwar werden häufig, ähnlich wie beim Druckversuch, Druckkegel gebildet. Fig. 36 zeigt die Wiedergabe der Bruchstücke eines zylindrischen Probekörpers aus Messing mit ursprünglich normalen Abmessungen (Durchmesser gleich Höhe). Das linksseitige kegelförmige Bruchstück ist aus dem rechtsseitigen Stück, das die Umhüllung des Kegels bildete, herausgeschlagen worden, wobei besonders interessant ist, daß die Grundfläche des Kegels nahezu den ursprünglichen Durchmesser des Probekörpers beibehalten hat. Das Mantelmaterial, das den Kegel einschloß, ist also ähnlich wie beim Druckversuch seitlich hochgequollen und umrandete an den Endflächen die ursprüngliche Grundfläche des Zylinders, die beim Bruch auch Grundfläche

des Druckkegels blieb. Unter dem Einfluß der Reibung an den Endflächen hatte der Probekörper, wie beim Druckversuch, tonnenförmige Gestalt angenommen, d. h. die Querschnittsverminderung in der Nähe der Endflächen war gegenüber derjeni-



Fig. 36. Brucherscheinung beim Schlagversuch.

gen in der Mitte des Probekörpers zurückgeblieben.

e) Normalfallwerke.

Für die Ausführung der Schlagversuche als Materialprobe benutzen öffentliche Prüfungsanstalten Fallwerke, deren Konstruktionseinzelheiten bestimmten Vereinbarungen angepaßt sind, damit vergleichbare Versuchsergebnisse erzielt werden. Im Materialprüfungsamt zu Lichterfelde ist ein Fallwerk nach Konstruktionsangaben von Martens („Materialienkunde“ S. 166) aufgestellt, das den erwähnten Vereinbarungen gemäß als sogenanntes Normalfallwerk zu bezeichnen ist. Seine Konstruktion ist aus Fig. 37 zu ersehen. Es arbeitet mit Bären von 20 bis 100 kg und läßt Fallhöhen bis zu 4,5 m zu. Die Schabotte (a) besteht aus einem gut fundierten Gußeisenklotz, auf dem für die einfachen Schlagproben besondere Aufsätze

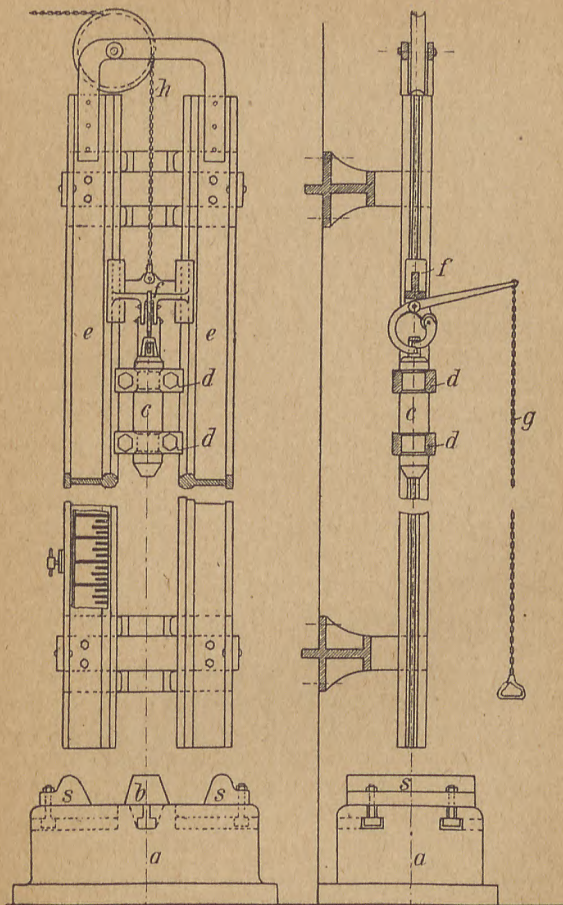


Fig. 37. Fallwerk nach Martens („Materialienkunde“ Tafel 12).

(b) mit eingelassenen Stahlplatten als Unterlage für den Probekörper aufgesetzt werden. Der schmiedeeiserne Bär (c) ist mit Schellen (d) zwischen Eisenbahnschienen (e) geführt und hängt in der Auslösevorrichtung, die am Gehänge (f) befestigt ist und mit Hilfe der Zugkette (g) betätigt wird. Das Gehänge (f) ist gleichfalls zwischen den Eisenbahnschienen geführt und wird getragen von der Kette (h), die über Führungsrollen nach einer Winde, mit der der Bär hochgewunden wird, läuft. An der Vorderseite der einen Schiene ist zur Einstellung der beabsichtigten Fallhöhe eine hölzerne Meßplatte angebracht, die in ihrer Höhenlage verschiebbar ist, damit ihre Nullmarke, je nach der Höhe des Probekörpers, verstellt werden kann. Mit Hilfe eines Zeigers, der an einer der Führungsschellen des Bären angebracht ist, wird die Fallhöhe für den Bären an der Meßplatte abgelesen. Die Schlagfläche des Bären hat auswechselbare Stahleinsätze.

Die Anforderungen, die an ein Normalfallwerk in konstruktiver Hinsicht zu stellen sind, sind von den „Konferenzen zur Vereinbarung einheitlicher Prüfungsverfahren“, denen sich auch der „Verein deutscher Eisenbahnverwaltungen“ in der Hauptsache angeschlossen hat, festgelegt.

Sie enthalten unter anderem Vorschriften über die Größe des Bärgewichtes, über das Material, aus dem Bär und Schabotte herzustellen sind (Stahl, Gußeisen), über Form und Abmessungen der Führungen, Schmierung der Führungen (nur Graphit), Verhältnis des Schabottengewichtes zum Bärgewicht (Schabotte mindestens zehnmals Bärgewicht), über Art und Abmessung des Fundamentes (unelastisch), zweckmäßige Höhe des Fallwerks (höchstens 6 m) und bestimmen ferner, daß jedes Fallwerk zu eichen ist. Für die Prüfung der Fallwerke wird

die Verwendung von Normalkupferzylindern empfohlen, welche aus bestem Stehbolzenkupfer hergestellt werden und bestimmte Form und Gewicht haben; das Materialprüfungsamt gibt solche Normalschlagkörper, die aus einem auf dem Fallwerk des Amtes geprüften Material hergestellt sind, ab und teilt die Längenänderung mit, die sie bei bestimmter Schlagarbeit unter einem den Vorschriften entsprechenden Fallwerke erfahren müssen. Für die Ermittlung des wirksamen Bärgewichtes wird im Materialprüfungsamte zwischen Bär und Auslösevorrichtung eine Federwage eingebaut, an der man das Bärgewicht abliest, während man den Bären langsam absinken läßt. Diese Ablesung entspricht dem Bärgewicht abzüglich der Reibung zwischen den Führungen, während eine zweite Ablesung an der Federwage während des langsamen Anhebens des Bären Bärgewicht einschließlich Reibung ergibt. Die halbe Differenz beider Ablesungen ist der Reibungsbetrag; nach den Verbandsvereinbarungen darf die Reibungsarbeit nicht größer als 2% der Schlagarbeit des Bären sein, wenn brauchbare Versuchsergebnisse mit dem Fallwerk erzielt werden sollen.

f) Verschiedene Arten des Schlagversuchs.

Schlagversuche werden nicht nur als einfache Schlagprobe mit zylindrischen oder würfelförmigen Normalkörpern ausgeführt, es sind vielmehr eine große Anzahl von Abarten mehr oder weniger im Gebrauch, so der Schlagbiegeversuch, der Schlagzerreiversuch, der Schlagscher- und Schlaglochversuch usw. Der Schlagbiegeversuch findet besonders bei der Prüfung von Eisenbahnmaterialien (Schienen, Achsen usw.) Verwendung, weswegen die auf S. 92 ausgeführten Vorschriften für Normalfallwerke eine Reihe von Bestimmungen

für die Ausführung von Schlagbiegeversuchen enthalten. Der Probekörper wird für solche Versuche gewöhnlich auf zwei, auf der Schabotte angebrachten Stützen s (s. Fig. 37) gelagert und der Bär, der für diese Zwecke an der Schlagfläche eine \cup -Form erhält, trifft die Probe in der Mitte zwischen den Auflagern. Als Gütemaßstab wird meistens die unter bestimmten Schlagarbeiten und bestimmten sonstigen Versuchsbedingungen (Stützweite usw.) erzielte Durchbiegung benutzt, oder es wird bei Qualitätsproben z. B. verlangt, daß ein Probestück unter einer bestimmten Schlagarbeit noch nicht zum Bruch kommt.

Die Schlagzerreißprobe fand bisher nur selten Verwendung, ebenso werden Schlagscher- und Schlaglochversuche mit den in Fig. 34 und 35 dargestellten Einrichtungen, die man auf die Schabotte aufsetzt, selten ausgeführt. (Liter.: Fuchs, Vergleichende statische und dynamische Zugversuche. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1920, S. 273. Geßner, Schlagzugversuche mit Sonderstählen. Stahl u. Eisen 1920, S. 781.)

Als Materialprobe ist neuerdings viel die sogenannte „Schlagbiegeprobe mit eingekerbten Probestücken“, kurz die Einkerbprobe oder Kerbschlagprobe in Aufnahme gekommen. Als Biegeprobe mit langsam gesteigerter Belastung ist sie erst in einem späteren Abschnitte (S. 112) behandelt. Für die Ausführung der Schlagbiegeprobe verwendet man zweckmäßig sogenannte Pendelhämmer, die den von der Probe aufgenommenen Anteil der Schlagarbeit zu messen gestatten.

Über die Bedeutung und Nützlichkeit der Kerbschlagprobe für die Materialbeurteilung ist im letzten Jahrzehnt eine sehr umfangreiche Literatur entstanden. Zahlreiche Vorschläge auf Ausgestaltung der Probe und der zu ver-

wendenden; Schlagwerke sind gemacht worden, besonders haben sich auch die Kongresse des „Internationalen Verbandes“ (s. S. 8) mit den einschlägigen Fragen beschäftigt (vgl. Literaturübersicht S. 6, Nr. 12). Es würde zu weit führen, im beschränkten Rahmen dieses Werkchens auf Einzelheiten einzugehen, zumal eine einheitliche Auf-

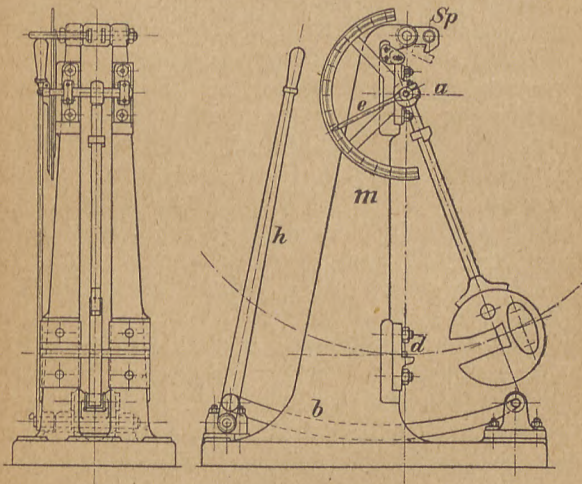


Fig. 38. Normalpendelhammer für 10 mkg Schlagarbeit.

fassung über die zweckmäßigste Form der Ausführung der Kerbschlagprobe bis heute noch nicht Platz gegriffen hat. Eine gute Übersicht über die wichtigsten einschlägigen Fragen gewinnt man aus Martens-Heyn, Materialienkunde, II. Bd., A., Abschn. VI E (vgl. Literaturübersicht S. 5 Nr. 2).

Im „Deutschen Verband“ (s. S. 8) ist man zu einer Vereinheitlichung der Kerbschlagprobe gelangt, indem be-

sonders die Konstruktionseinzelheiten der zu verwendenden Pendelhämmer festgelegt worden sind. Die Normen des Deutsch. Verbandes sehen drei Größen solcher Pendelhämmer, nämlich für 10, 75 und 250 mkg Schlagkraft vor. In Abb. 38 ist ein Normalpendelhammer von 10 mkg dargestellt. Die Bauart dieses Hammers lehnt sich an die von Charpy angegebene an und ist folgende: Das als Pendelrinne ausgebildete Bärgewicht (8,2 kg) hängt an einer Pendelstange, deren Drehachse in Kugellagern läuft. Der entsprechend gekerbte Probekörper (s. S. 98) wird bei d gelagert und stützt sich gegen die beiden Ständer des Apparates. Der Pendelhammer wird von Hand bis an die obere Sperrklinke gehoben und dort eingehakt. Auf der Achse a ist mit Reibung ein Zeiger e befestigt, der an der Meßskala m ablaufen kann und mit dem Bärgewicht zusammen angehoben wird. Löst man den Pendelhammer an der Sperrklinke sp aus, so trifft seine Aufschlagfläche die Probe und schlägt, nachdem diese gebrochen ist, um so viel nach der gegenüberliegenden Seite aus, als der noch nach dem Brechen der Probe verbliebenen lebendigen Kraft des Hammers entspricht. Der Zeiger (e) indessen findet senkrecht über dem Probekörper einen Anschlag, so daß er den Weg des Fallbären nur bis zu dessen Aufschlag auf die Probe mitmacht. Aus der Stellung des Zeigers auf der Skala kann man dann, sobald man den Bären in die Nullage zurückgebracht hat, ablesen, um wieviel der Bär nach dem Bruch der Probe noch über die Nullage hinweg ausgeschlagen hat; daraus läßt sich leicht der Anteil der Schlagarbeit, der für den Bruch der Probe benötigt wurde, errechnen. Das unter der Flugbahn des Pendelhammers angebrachte Band (Leder) b , das mittelst des Hebels h gespannt wird, dient dazu, den Schwung des Pendels nach beendetem Versuch abzubremesen.

Die beiden größeren Normalpendelhämmer für 75 und 250 mkg unterscheiden sich hinsichtlich der Bauart nicht wesentlich von dem kleinen Hammer. Das Bärge­wicht ist statt an einer Pendelstange an einem trapezartigen Ge­stänge aufgehängt, ferner ist eine unabhängig vom Gestell des Hammers befestigte Schabotte für die Probenauf­lage vorgesehen und die Anzeige der überschüssigen, nicht auf­gebrauchten Schlagarbeit geschieht mittels Scheibe und Schnur­zuges statt des auf der Achse befestigten Schlepp­zeigers. Zum Anheben des schwereren Bärge­wichtes ist eine kleine Handwinde vorgesehen. Von den sonstigen die Pendelhämmer betreffenden Abmachungen des Deutschen Verbandes, die ausführlich in der Abhandlung v. Ehrens­bergers (s. Literatur am Schluß des Abschnittes) beschrieben sind, seien hier noch erwähnt:

- Großer Hammer 250 mkg Schlagarbeit, 85 kg Bärge­wicht,
2,94 m Fallhöhe;
Mittlerer Hammer 75 mkg Schlagarbeit, 33 kg Bärge­wicht,
2,28 m Fallhöhe;
Kleiner Hammer 10 mkg Schlagarbeit, 8,2 kg Bärge­wicht,
1,22 m Fallhöhe.

Für die beiden großen Pendelhämmer sind Proben mit sogenanntem Rundkerb nach Fig. 39, mit 4 mm Durch­messer der Bohrung in der Mitte der Probe vorgeschrieben; die sonstigen Abmessungen der Probe sind:

160 mm ganze Länge, Querschnitt 30×30 mm.

Bei Proben, die aus Blechen herausgeschnitten werden, ist der Querschnitt der Probe nicht zu 30×30 mm, son­dern zu $30 \times$ Blechdicke zu bemessen. Es sind sonach 30 mm breite Streifen aus dem Bleche herauszuschneiden und in Richtung dieser Probenbreite mit Rundkerb nach

Fig. 39 zu versehen, so daß also wie bei der normalen Probe hinter dem Rundkerb noch unverletztes Material in 15 mm Breite stehenbleibt. Der Schlag soll parallel zur Blechebene, also in Richtung der Probenbreite (30 mm) erfolgen; dem Bleche sind Längs- und Querproben zur Prüfung zu entnehmen.

Für den kleinen Pendelhammer sind Probenabmessungen

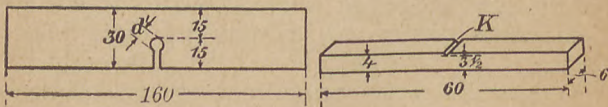


Fig. 39. Probe mit Rundkerb für große Pendelhämmer.

gen nicht vorgeschrieben. Das Materialprüfungsamt verwendet hierfür Proben mit Rundkerb nach Fig. 39 mit nachstehenden Abmessungen:

100 mm ganze Länge, 70 mm freie Länge zwischen den Auflagern; Querschnitt 10×8 mm (10 mm in der Schlagrichtung, 8 mm senkrecht zur Schlagrichtung); Durchmesser d der Bohrung des Rundkerbes in halber Höhe (5 mm) der Probe = 1,3 mm.

Sämtliche Proben für Kerbschlagversuche sind kalt auszuschneiden und dürfen nachträglich nicht erwärmt werden. Als Gütemaßstab dient die zum Durchschlagen der Probe benötigte lebendige Kraft, die als spezifische Schlagarbeit bezogen auf 1 qcm als Flächeneinheit anzugeben ist.

Die Prüfart soll einheitlich als Kerbschlagprobe zur Ermittlung der „Kerbzähigkeit“ des Materials bezeichnet werden.

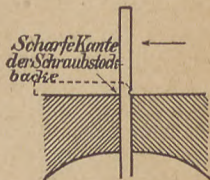


Fig. 40. Kerbschlagprobe nach Heyn.

Eine etwas andere, einfache Art der Kerbschlagprobe hat E. Heyn angegeben:

Nach Fig. 40 werden die mit scharfem Kerb ($\frac{1}{2}$ mm Tiefe, Winkel 60°) versehenen Stäbe von 60 mm Länge, 6 mm Breite und 4 mm Dicke zwischen die Backen eines Schraubstockes eingespannt und an der durch einen Pfeil gekennzeichneten Stelle mit einem Handhammer geschlagen.

Als erste Biegung gilt das Umschlagen des Stabes um 90° in die punktierte Lage, als zweite Biegung das Zurückbiegen des Stabes zwischen den Schraubstockbacken in die gerade Lage, als dritte Biegung wieder das Umschlagen usw. Die Zahl der Biegungen bis zum Bruch wird Biegezahl Bz genannt. —

Für besondere Prüfungszwecke sind an einigen öffentlichen Prüfungsanstalten noch Fallwerke kleinerer und kleinster Abmessungen (Bärgewichte von nur $\frac{1}{2}$ kg und noch weniger) im Gebrauch, deren Konstruktionsgrundsätze indessen die gleichen wie bei den Normalfallwerken sind. Ein solches Fallwerk hat z. B. in der früheren Charlottenburger Versuchsanstalt für die vergleichende Prüfung von Jagdschrot, dessen Härte bestimmt werden sollte, Benutzung gefunden.

Literatur.

- v. Ehrensberger, Die Kerbschlagprobe im Materialprüfungswesen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1907, S. 1974 und Stahl und Eisen 1907, S. 1797, 1832.
- Kammerer, Nützlichkeit der Kerbschlagprobe zur Untersuchung von gewissen Kesselblechschäden. Ztschr. f. Dampfkessel und Maschinenbetrieb 1910, S. 266, 241.
- Preuß, Versuche über die Spannungsverteilung in gekerbten Zugstäben (Kerbwirkung). Mitteilung über Forschungsarbeiten d. Ver. d. Ing., Heft 134, S. 47.

- Stanton und Bairstow, Widerstand von Materialien gegen Schlag (Kerbschlagprobe). Engineering 1908 II, S. 731.
- Harford, Verschiedene Verfahren für Schlagversuche an gekerbten Stäben. Engineering 1908 II, S. 733.
- Preuß, Einfluß der Wärme auf die Sprödigkeit von Metallen (Kerbschlagproben). Stahl u. Eisen 1907, S. 675.
- Baumann, Versuche über den Einfluß der Breite bei Kerbschlagproben. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1912, S. 1311.
- Rosenhain, Notched bar impact tests. Engineer. 1913, S. 110.
- Grenet, Berechnung des Arbeitsaufwandes beim Kerbschlagversuch. Revue Métallurgique 1909, S. 835.
- Révillon, Die spezifische Schlagarbeit beim Kerbschlagversuch. Revue Mét. 1908, S. 887.
- L. Guillet und Révillon, Kerbschlagversuche bei höheren Wärmestufen. Revue Mét. 1909, S. 94.
- Leon und Ludwik, Vergleichende statische und dynamische Kerbbiegeproben. Österr. Zeitschr. f. d. öffentl. Baudienst 1909, Heft 7.
- Höniger, Ermittlung der Stoßkraft durch Kinematographie. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1912, S. 1501.
- Stanton, Maschine für Dauerkerbschlagproben. Engineering 1910 I, S. 572.
- Lachlan, Neuer Apparat für Schlagzerreiversuche. Engineering 1910 II, S. 860.
- Guillery, Rotierender Schlaghammer. Mémoires Soc. Ingen. Civils 1912, Mai, S. 365.
- Heyn und Bauer, Einiges über Kerbschlagversuche usw. Stahl und Eisen 1914, S. 231.
- Heyn, Die Kerbwirkung und ihre Bedeutung für den Konstrukteur. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1914, S. 383.
- Preuß, Kerbwirkung und Dauerschlagbeanspruchung. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1914, S. 701.
- Striebeck, Die Kerbschlagprobe und das Ähnlichkeitsgesetz. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1915, S. 57.
- Charpy u. Cornu-Thénard, New experiments on shock tests and on the determination of resilience. Engineering 1917, S. 371.
- Berndt, Zusammenhang von Kerbschlagarbeit, Zerreißfestigkeit, Dehnung und Brinellhärte. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1918, S. 421.

Fillunger, Bemerkungen zur Kerbschlagprobe. Ztschr. d. Österr. Ing.- u. Archit.-Ver. 1918, S. 329.

Vgl. auch die einschlägigen Arbeiten in Literaturübersicht S. 6, Nr. 12.

C. Dauerversuche (Schwingungsfestigkeit).

Im Gegensatz zu den beschriebenen gewöhnlichen Zerreiß-, Druck-, Biege- usw. Versuchen, bei denen der Probekörper durch langsame Steigerung der Belastung meistens beim erstmaligen Versuch zum Bruch gebracht wird, wird beim Dauerversuch die Belastung nicht bis an die Bruchgrenze gesteigert; der Probekörper wird vielmehr mit einer geringeren Belastung einer großen Zahl von Anstrengungen unterworfen, wobei schließlich diejenige Spannung ermittelt wird, die das Material millionenmal hintereinander zu tragen vermag, ohne zum Bruche zu kommen. Wenngleich die Dauerversuche als solche alt sind, ja, wie auf Seite 8 erwähnt, eigentlich in Deutschland zum Ausgangspunkt für eine wissenschaftliche Materialprüfung wurden, so haben sie lange Jahre hindurch nur rein wissenschaftliches Interesse gehabt, während der gewöhnliche Zerreißversuch fast ausschließlich zur Materialbeurteilung herangezogen wurde. Erst in neuerer Zeit hat sich die Erkenntnis immer mehr Bahn gebrochen, daß der Zerreißversuch, besonders für die Materialien des Maschinenbaues, nicht immer ein vollkommenes Mittel zur Beurteilung des Materials bedeutet, und daß Schlüsse über das Verhalten eines Materials bei seiner Verwendung im Betriebe vielleicht zuverlässiger auf Grund von Dauerversuchen, die den Verwendungszwecken des Materials anzupassen sind, gezogen werden können. Die im zweiten Bändchen erwähnten Versuche Bauschingers über die Veränderung der *P*- und *S*-Grenze lassen deutlich er-

kennen, von wie einschneidender Wirkung mehrmalige Beanspruchung eines Materials auf die Festigkeitseigenschaften ist. Die neuere Literatur auf dem Gebiete der Dauerversuche ist sehr umfangreich. Am Schlusse dieses Abschnittes sind eine Anzahl einschlägiger Arbeiten aufgeführt, ohne daß diese Zusammenstellung Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Wöhler, der die ersten planmäßigen Dauerversuche ausgeführt hat, fand als Hauptgesetz bei seinen Versuchen, daß sich der Bruch eines Materials durch vielfache Schwingungen (d. h. Be- und Entlastungen zwischen bestimmten Spannungsgrenzen), von denen keine die absolute Bruchgrenze erreicht, herbeiführen läßt. Praktischen Wert hat mithin die Aufsuchung derjenigen Spannung, die das Material zu tragen vermag, ohne durch eine so große Zahl von Beanspruchungen, wie sie bei späterer Verwendung des Materials im Betriebe nicht mehr in Frage kommen kann, zu Bruch zu gehen. Launhardt hat diese Spannung mit Arbeitsfestigkeit (σ_N) bezeichnet. Spangenberg, der die Wöhlerschen Versuche fortgesetzt hat, gibt für einige Materialien die nachstehenden Werte an:

Eisen	2100 kg/qcm ($\sigma_B = 3800\text{—}4200$ kg/qcm),
Stahl	3100 kg/qcm ($\sigma_B = 5000$ kg/qcm und mehr),
Bronze	850—1050 kg/qcm ($\sigma_B = 3000$ kg/qcm u. mehr).

Die in Klammern gesetzten Werte geben die mittleren Zugfestigkeiten, die durch gewöhnliche Zerreißversuche für die betreffenden Materialarten gefunden sind. Diese vor über 40 Jahren gefundenen Werte für die Arbeitsfestigkeit sind indessen den heutigen Materialverhältnissen nicht mehr angepaßt, da sich der Charakter der Konstruktionsmaterialien im Laufe der letzten Jahrzehnte erheblich verändert hat. Man erkennt immerhin aus ihnen,

daß die Arbeitsfestigkeit erheblich tiefer als die eigentliche Bruchfestigkeit liegt. Wöhler war der Ansicht, daß die Ausführung einer Dauerversuchsart (z. B. auf Zug oder Biegung) genüge, um das Verhalten des Materials auch bei anderer Dauerbeanspruchungsart durch Rechnung ermitteln zu können. Spangenberg bestritt indessen auf Grund seiner Ergebnisse mit Dauerzug-, Dauerbiege-, Dauertorsionsversuchen diesen Satz. Praktische Anwendung einer Dauerversuchsbeanspruchung suchte Wöhler nicht nur in den Betriebsbeanspruchungen z. B. einer Kolbenstange oder anderer Maschinenteile, die dauerndem Wechsel zwischen Be- und Entlastung unterworfen sind, er hielt es auch für höchst wahrscheinlich, daß die vielfach wiederholte Verschiebung der Materialmolekeln unter dem Einfluß der Ausdehnung durch die Wärme, die beispielsweise das Material eines Dampfkessels erfährt, ebenfalls auf Zerstörung des Zusammenhanges hinwirkt. Martens beschreibt in seiner „Materialienkunde“ auf S. 219 die alten Wöhlerschen und andere Dauerversuchsmaschinen. Hierauf näher einzugehen, verbietet der Umfang dieses Bändchens.

Literatur.

- Preuß, Ergebnisse neuerer Dauerversuche an Metallen. Dingers polyt. Journal 1907, S. 100, 118, 139.
Preuß, Zur Geschichte der Dauerversuche mit Metallen. Baumaterialienkunde 1906, S. 245.
Howard, Dauerversuche an Metallen. Engineering record 1906, Bd. 54, S. 334.
Smith, Dasselbe. Philosophic. Transact. of the Royal Society of London, Vol. 199, S. 265.
Gardner, Dasselbe. Journal of the Iron and Steel Instit. 1905, Nr. 1, S. 481.
Rogers, Dasselbe. Ebenda, S. 486.

- Stanton und Bairstow, Dasselbe. Proceedings of the Instit. of Civil Engineers, Vol. 166, 1905/06, Teil 4.
- , Einfluß wiederholter Belastung auf die Festigkeit des Eisens. Stahl u. Eisen 1907, S. 1670.
- Turner, Festigkeit von Stählen bei zusammengesetzter Beanspruchung und Verhalten bei wiederholter Anstrengung. Engineering 1911 II, S. 183, 246, 305.
- Upton und Lewis, The fatigue failure of metals. Americ. Machin. 1912, Nov., S. 678.
- Hopkinson, The fatigue of metals. Engineering, Febr. 1912, S. 113.
- Kapp, Neue elektrische Materialprüfmaschine. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1911, S. 1445.
- Roos of Hjelmsäter, Über Prüfung von Stahl für Maschinenbau mit bes. Berücksichtigung der Ermüdungserscheinungen. Jenkont. Annal. 1912, Heft 2/3.
- Ludwik, Ursprungsfestigkeit und statische Festigkeit. Studie über Ermüdungserscheinungen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1913, S. 209.
- , Über die Ermüdung der Metalle. Ztschr. d. Österr. Ing.- u. Archit.-Ver. 1916, Heft 42, S. 795.
- , Über Dauerversuche. Mitt. des k. u. k. techn. Versuchsamtes 1918, Heft 2, S. 36.
- A. Martens, Über die in den Jahren 1892—1912 im Materialprüfungsamte ausgeführten Dauerbiegeversuche mit Flußeisen. Mitteilungen 1914, S. 51.
- Moore u. Seely, Dauerbeanspruchung. Stahl u. Eisen 1915, S. 1233.
- Rudeloff, Der heutige Stand der Dauerversuche mit Metallen. Verhdlg. d. Ver. d. Bef. d. Gewerbfl. 1916, S. 361.
- Leon, Über die Ermüdung von Maschinenteilen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1917, S. 192.
- Vgl. auch die einschlägigen Arbeiten in Literaturübersicht S. 6, Nr. 12.

D. Technologische Proben.

a) Begriffsfeststellungen

Mit diesem Namen bezeichnet man Materialproben, die über den Grad der Zähigkeit, Brüchigkeit und auch Bearbeitbarkeit für bestimmte Verwendungszwecke Auf-

schluß geben sollen. Sie finden in der Hauptsache als Qualitätsprobe bei der Prüfung der Konstruktionsmaterialien (Kesselbleche usw.) Verwendung.

Für diese Art der Materialprüfung besteht leider noch große Verschiedenheit der Vorschriften, obgleich gerade hier Einheitlichkeit der Ausführungsvorschriften sehr erwünscht wäre, weil die technologischen Proben, die ohne besondere Prüfungseinrichtung mit den Hilfsmitteln jeder Werkstatt auszuführen sind, große Verbreitung gefunden haben. Die einzelnen großen Interessentengruppen haben meistens unabhängig voneinander Prüfungsvorschriften festgesetzt, nach denen bei Abnahmeprüfungen zu verfahren ist (Hamburger und Würzburger Normen; Vorschriften des Verbandes deutscher Eisenhüttenleute, des Germanischen Lloyds, der deutschen Marine usw.); alle weichen in wichtigen Punkten nur unwesentlich voneinander ab, so daß es ohne große Schwierigkeiten möglich wäre, einheitliche, allen Interessen gerecht werdende Vorschriften für diese Proben zu schaffen, die zugleich unter Ausnutzung der Erfahrungen der öffentlichen Prüfungsstellen allen Materialeigentümlichkeiten besser angepaßt werden könnten.

Im folgenden werden besonders die Vorschriften und Versuchsverfahren mitgeteilt werden, nach denen an den öffentlichen Prüfungsstellen, besonders am Lichterfelder Materialprüfungsamt, technologische Proben ausgeführt werden. Man hat zu unterscheiden zwischen Biegeproben, Schmiedeproben und technologischen Proben verschiedener Art.

b) Biegeproben.

Die Biegeprobe dient dazu, den Grad der Zähigkeit oder Sprödigkeit des Materials unter verschiedenen Ver-

suchsbedingungen und bei verschiedenen Materialzuständen zu ermitteln. Die Proben in Form von Flacheisen oder Blechstreifen (besonders in Anwendung für Kesselbleche und neuerdings für Rundeisen, die als Einlagen beim Eisenbeton Verwendung finden) werden über einen Dorn oder eine Kante mit bestimmtem Abrundungsradius oder über eine Rolle von bestimmtem Durchmesser von Hand aus mit geeigneten Werkzeugen (Hammer) oder mit Hilfe geeigneter maschi-

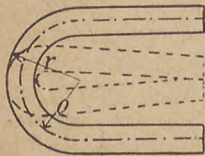


Fig. 41. Biegeprobe.

neller Vorrichtungen so gebogen, daß die beiden Schenkel oder Probenenden schließlich zur Aufeinanderlage (Fig. 41) kommen, vorausgesetzt, daß nicht vorher bereits Bruch der Probe eingetreten ist.

Da bei dieser Art der Beanspruchung das Material an der auf Zug beanspruchten Seite eine starke Dehnung erfahren muß, so wird, sobald die größtmögliche Dehnbarkeit des Materials erreicht ist, das Material an der gezogenen Seite einreißen, wodurch Querrisse, senkrecht zur Längsachse der Probe, zu entstehen pflegen. Auf die Feststellung dieser Querrisse erstreckt sich die Beobachtung während der Biegeprobe. Entweder der Winkel, unter dem beim Einreißen des Materials die Probenenden gegeneinander gebogen sind, oder die sogenannte Biegegröße werden zur Materialbeurteilung benutzt. Die Beobachtung des Auftretens der Querrisse erfordert einige Übung, da die eigentliche Materialverletzung, also der Anbruch des Materials vom ungeübten Beobachter mit einer Oberflächenverletzung verwechselt werden kann. Die Oberflächenverletzung wird meistens dadurch verursacht, daß der auf der Probe belassene Walzzunder, der, wie an anderer Stelle (S. 50) schon be-

merkt wurde, bedeutend härter und weniger formänderungsfähig ist als das Kernmaterial, schon früher zum Zerreißen kommt als das eigentliche Material der Probe; die nach dem Zerreißen der Zunderschicht bloßgelegten blanken Stellen des Materials erscheinen dann wie feine Querrisse, ohne daß das eigentliche Probenmaterial bereits angebrochen ist.

Die obenerwähnte Biegegröße, die auf Vorschlag v. Tetmajers als Gütemaßstab gebräuchlich ist, entspricht

dem Quotienten $Bg = \frac{50 a}{\rho}$, worin a die Dicke der Probe

und ρ den Biegungshalbmesser in der sogenannten neutralen Faser (s. S. 73) bedeutet

(s. Fig. 41). Da die Messung von

ρ an der Probe nicht leicht ausführbar

ist, so bestimmt man den

äußeren Biegungshalbmesser r (siehe

Fig. 41) mit geeigneten Hilfsmitteln.

Ein einfaches Meßinstrument für

diesen Zweck ist im Staatl. Materialprüfungsamt im Gebrauch und

in Fig. 42 abgebildet. Die bogen-

förmigen Ausschnitte am äußeren

Umfange des Messingblechstückes

sind nach Radien abgerundet, die, von den kleinsten

in Frage kommenden anfangend, in nach Millimetern

(bei den größeren Radien von 2 zu 2 mm) ansteigender

Reihenfolge nebeneinander angeordnet sind. An jedem

Ausschnitt ist der Abrundungsradius aufgeschlagen.

Nachdem die Biegeprobe angebrochen ist, probiert man

durch Aufsetzen der Blechlehre auf der Biegestelle

der Probe aus, welcher Ausschnitt der Lehre sich der

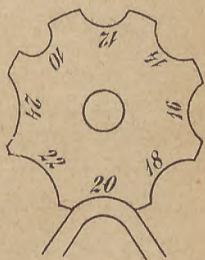


Fig. 42. Radienlehre für Biegeproben.

Abrundung der Probe am besten anpaßt, und bestimmt so den äußeren Biegungshalbmesser r .

ρ ist dann $=r - a/2$; die Biegegröße wird bei solchen Proben, deren Schenkel zur Auflage aufeinander gebracht werden konnten, ohne daß Anbruch eintrat, deren Biege-
winkel also 180° beträgt, gleich 100 werden; denn in diesem Falle wird $\rho = \frac{a}{2}$, der Quotient $\frac{50a}{\rho}$ also = 100. Man

wird für gutes Flußeisen, das zu Konstruktionszwecken Verwendung finden soll, meist die Forderung $Bg = 100$ stellen, bekommt also, im Falle das Material dieser Bedingung nicht genügt, die erzielte Bg in Prozenten der verlangten.

Bezüglich der Probenform bei Biegeproben ist zu bemerken, daß man bestrebt ist, auch hier dem Ähnlichkeitsgesetz Rechnung zu tragen. Im Materialprüfungsamt Lichterfelde finden nach dem Vorschlage von Martens („Materialienkunde“ S. 259), wenn zugänglich, Proben mit nachstehenden Abmessungen Verwendung:

Dicke = a ; Breite = $3a$; ganze Länge $L = 18a$.

In der Biegestelle der Probe und ihrer Nähe, also meistens in der Mitte der Proben, werden die Kanten gebrochen und abgerundet, damit der von der Bearbeitung der Probe (diese wird meistens mit schneidenden Werkzeugen, Kaltsägen usw., vorgenommen) stehengebliebene Grat entfernt wird. Er würde leicht beim Biegen der Probe zu Kantenrissen Veranlassung geben, die die Materialbeurteilung stören könnten.

Die einfachste Ausführung der Biegeprobe erfolgt in der Weise, daß man die Probe über die abgerundete Amböckante mit dem Hammer schlägt. Wegen der mancherlei Willkürlichkeiten, die indessen bei der Ausführung dieser

rohen Proben obwalten können, haben die Konferenzen zur Vereinheitlichung der Prüfungsverfahren als Grundsatz aufgestellt, daß die Biegeprobe nur mit maschinellen Vorrichtungen ausgeführt werden soll. Geeignete Vorrichtungen, von Hand oder hydraulisch betrieben, sind in großer Zahl vorgeschlagen worden. Die Proben werden mit ihnen über Dorne von bestimmtem Abrundungsradius gebogen. Für diese Abrundungsradien schreiben die Vorschriften fast durchweg die Bedingung $r = a$ (Radius gleich Probendicke) vor.

Man unterscheidet bei den Biegeproben je nach Materialzustand und Beschaffenheit der Probe zwischen Kaltbiegeproben, Blabruchproben, Rotbruchproben, und zwar können diese Proben entweder im verletzten (Proben mit Einkerbungen oder Bohrungen) oder unverletzten Zustand des Versuchstückes ausgeführt werden.

Mit Kaltbiegeproben bezeichnet man im Gegensatz zu den bei höheren Wärmegraden ausgeführten Proben solche, die bei Zimmerwärme vorgenommen werden. Das Material wird dabei entweder im sogenannten Anlieferungszustande, d. h. so, wie es vom Erzeuger angeliefert wurde, oder im geglühten oder auch im abgeschreckten Zustande geprüft. Die Prüfung im geglühten Zustande gibt Aufschluß darüber, ob das Material im eingelieferten Zustande von der Bearbeitung her mit Spannungen behaftet war, die seine Formänderungsfähigkeit einschränkten. Das Material erfährt nämlich bei jeder Bearbeitung, die eine Beanspruchung über die Formänderungsgrenze hinaus verursacht (Kaltwalzen, -hämmern usw.), eine Veränderung seiner ursprünglichen Formänderungsgrenze; die Fließgrenze rückt höher hinauf (s. Bd. II), das Material wird weniger formänderungsfähig, wird härter.

Ein solches Material ist mit Spannungen behaftet und verändert andauernd seine Formänderungsgrenze. Durch gleichmäßiges Ausglühen (Temperatur für die verschiedenen Materialien verschieden; für Flußeisen zwischen 750 und 800 ° C) und darauf folgende langsame Abkühlung werden diese Spannungen wieder beseitigt und das Material wird in seinen ursprünglichen spannungsfreien Naturzustand übergeführt.

Die Biegeprobe im abgeschreckten Zustande soll Aufschluß über die Härtefähigkeit des betreffenden Materials geben. Bekanntlich zeigen bestimmte Eisensorten die Eigentümlichkeit, wesentlich härter zu werden, sobald sie im rotwarmen Zustande in kaltem Wasser oder Öl abgeschreckt werden. Für die Abschreck-Biegeprobe werden die Proben hellrot warm gemacht (750 bis 800 °) und schnell in Wasser von etwa 28 ° C unter Umrühren abgeschreckt. Die Temperatur von 28 ° C ist erfahrungsgemäß die geeignetste, durch das Schwenken im Wasser vermeidet man in der Regel das Krummwerden der Probe. Die Abschreckprobe bietet besonders dann Interesse, wenn die Frage zu beantworten ist, ob das vorliegende Material als Stahl anzusprechen ist. Die öffentlichen Prüfungsstellen werden sehr häufig vor diese Frage gestellt, obgleich kaum ein Begriff willkürlichere Auslegung erfahren hat wie der Begriff Stahl. Im zweiten Bande dieses Werkes ist über die Namenregelung, wie sie in den verschiedenen Kulturländern für Stahl gebräuchlich ist, einiges mitgeteilt. Als eine nach der bisherigen landläufigen Anschauung wichtige Eigenschaft von Eisensorten, die als Stahl anzusprechen sind, wurde bisher vielfach die Härtebarkeit angesehen. Zur Ermittlung der Härtebarkeit des Materials ist nun die Biegeprobe besonders geeignet, weil bei härtbarem Material die Biegegröße für den abge-

schreckten Zustand erheblich kleiner ausfällt, als für den angelieferten oder geglühten Zustand.

Bei der Blaubruchprobe wird das Material im sogenannten blauwarmen Zustande geprüft; die Proben sind hierbei bis auf etwa 300°C erhitzt und zeigen, mit einer Feile an den Kanten befeilt, deutlich die blaue Anlauffarbe. War das Material noch nicht hoch genug erhitzt, so pflegt die blaue Anlauffarbe schnell wieder zu verschwinden, hingegen dunkelt sie stark nach, wenn die Erhitzung zu weit getrieben wurde. Die Temperatur von 300° ist besonders für Flußeisen eine kritische Grenze in bezug auf Festigkeit und Formänderungsvermögen. Nach Versuchen von Martens, Rudeloff, Bach u. a. steigt die Festigkeit des Flußeisens bis etwa auf $200\text{--}300^{\circ}$ um mehrere Procente, um dann nach und nach bei höheren Temperaturen wieder abzunehmen (s. Bd. II); hingegen nimmt die Formänderungsfähigkeit bis 300° erheblich ab, um dann wieder zuzunehmen. Bei 300° pflegt das Material am wenigsten Zähigkeit zu zeigen, am sprödesten zu sein und daher bei der Biegeprobe am leichtesten zu brechen. Für viele Verwendungszwecke ist die Kenntnis des Verhaltens des Materials in der Blauwärme daher von hohem Interesse.

Ähnlich verhält es sich mit der sogenannten Rotbruchprobe, bei der die Proben im dunkelrotwarmen Zustande ($500\text{--}600^{\circ}$, im Dunkeln rotglühend erscheinend) geprüft werden. Manche Eisensorten, die, bei Zimmertemperatur und Blauwärme geprüft, zufriedenstellende Biegegrößen lieferten, können noch bei der Rotbruchprobe vorschnell zum Bruch kommen; sie sind rotbrüchig, eine Eigenschaft, die auf zu hohen Schwefelgehalt zurückgeführt wird und besonders für solche Materialien, die im rotwarmen Zustande zum Zwecke der Formgebung Bearbeitung erfahren müssen, sehr unangenehm ist.

Man kennt dann noch eine Reihe von Biegeproben, bei denen man die Proben vor dem Versuch absichtlich verletzt, um festzustellen, inwieweit das Material besonders in der Nähe der verletzten Stelle an Zähigkeit einbüßt. Bei der sogenannten Einkerbprobe werden die Proben an der auf Zug beanspruchten Seite senkrecht zur Längsachse mit einer Einkerbung versehen, die entweder eingehobelt oder eingemeißelt sein kann. Die letztere Prüfungsart ist die schärfere, weil durch das Einmeißeln das Material der Probe erheblich stärkerer Beeinflussung unterworfen wird als beim Einhobeln. Der Anbruch des Materials ist bei der Einkerbprobe schwieriger zu beobachten, weil der im Grunde der Kerbe stehengebliebene Grat beim Biegen der Probe sein Aussehen verändert und dann leicht zu der irrtümlichen Annahme Veranlassung gibt, daß das Material bereits angebrochen ist. Die Einkerbprobe wird im kalten und im blauwarmen Zustande ausgeführt. Über die Einkerbprobe als Schlagprobe s. Näheres auf S. 94.

Häufig angewendet wird ferner auch die Biegeprobe mit gelochten Proben, bei denen das Loch in der Mitte der Probe, wo es in die am stärksten gebogene Stelle fällt, entweder gebohrt oder gestantzt ist. Letztere Ausführungsart ist wegen der stärkeren Inanspruchnahme des in der Nähe des Loches liegenden Materials die schärfere Probe. Lochdurchmesser sollte bei diesen Proben im bestimmten Verhältnis zur Probenbreite stehen; Martens („Materialienkunde“ S. 259) schlägt hierfür vor: $d=2a$; $b=5a$ (a = Probendicke, d = Lochdurchmesser, b = Probenbreite). Erwähnt sei noch, daß man vielfach die Biegeprobe auch bei Wärmegraden unter 0 (bis -40° und tiefer) ausführt, um festzustellen, ob das Material frostbrüchig ist.

c) Schmiedeproben.

Die Schmiedeproben werden in ihrer Ausführung ganz dem jeweiligen Verwendungszweck des Materials angepaßt. Es seien hier nur die am häufigsten angewandten kurz beschrieben.

Die sogenannte Ausbreiteprobe bezweckt, den Grad der Hämmerbarkeit des Materials zu ermitteln, und wird im kalten oder rotwarmen Zustande ausgeführt. Ein Flachstab wird zu diesem Zweck an einem Ende mit der Hammerfinne bearbeitet und so weit ausgebreitet, bis Risse zu beobachten sind. Das Verhältnis der Probenbreite nach dem Ausbreiten bis zur Ribbildung zur ursprünglichen Probenbreite bildet den Gütemaßstab für Beurteilung des Materials. Für gutes Flußeisen oder Schweißeisen wird meistens Ausbreitung bis auf dreifache Probenbreite ohne Ribbildung verlangt werden können.

Die Stauchprobe wird hauptsächlich zur Prüfung von Nieteisen angewandt. Zylindrische Probekörper (aus der Rundstange herausgeschnitten, Walzzunder auf der Probe belassen) mit $l = 2d$ (l = Probenlänge, d = Probendurchmesser) werden im rotwarmen Zustande mit dem Hammer zusammengestaucht, bis Mantelrisse zu beobachten sind. Die Stauchung wird bei gutem Nieteisen bis auf mindestens $\frac{1}{3}l$ ohne Mantelrisse möglich sein müssen.

Die Loch- oder Aufdornprobe wird mit Blechstreifen ausgeführt. Diese werden im rotwarmen Zustande mit dem Lochhammer zunächst gelocht; durch das Loch wird dann ein konischer Dorn (gebräuchliche Abmessungen $d_u = 20$ mm, $d_o = 30$ mm, $L = 80$ mm) hindurchgeschlagen. Das Material muß dies Aufdornen ertragen, ohne Risse zu bekommen.

Zur Ermittlung der Schweißbarkeit dient ferner noch die sogenannte Schweißprobe. Die Enden zweier Flach-

eisenstäbe werden hierbei in Schweißhitze miteinander verschweißt und zur Erprobung der Güte der Schweißung nach der Abkühlung über die Amboß- oder Schraubstockkante bis zum Aufeinanderliegen der beiden Proben-schenkel zusammengebogen. Gut schweißbares Material wird diese Probe aushalten müssen, ohne in der Schweißnaht zu brechen.

Mit fertigem Walzgut kommen ferner noch eine Anzahl technologischer Proben zur Anwendung, die indessen nicht alle hier beschrieben werden können. Erwähnt seien das Einschneiden, Flachdrücken und Aufrollen der Schenkel an Winkeleisen, die sogenannte Treibprobe mit Blechen, das Bördeln, das Anarbeiten von Flanschen an Rohrabschnitten, die Stauch- und Druckprobe mit Rohrabschnitten, das Feinblechprüfverfahren nach Erichsen (Literatur am Schluß des Abschnitt), eine Art Polter- oder Tiefziehprobe und andere mehr. Die Ausführungsbestimmungen für diese Proben werden immer dem jeweiligen Verwendungszweck der zu prüfenden Materialien angepaßt werden müssen und daher in den Abnahmevorschriften festgelegt werden.

d) Technologische Proben verschiedener Art.

Allgemeinere Verbreitung haben die technologischen Proben zur Prüfung von Drähten gefunden, die zu Drahtseilen verarbeitet werden sollen. Sie umfassen neben der Ermittlung der Zugfestigkeit die sogenannte Hin- und Herbiegeprobe und die Verwindungsprobe.

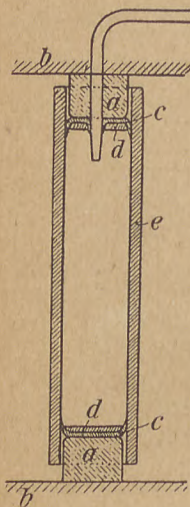
Bei der Hin- und Herbiegeprobe werden die Probedrähte zwischen Schraubstockbacken eingespannt, deren Kanten nach bestimmtem Radius abgerundet sind. Das freie Drahtende wird mit einer geeigneten Vorrichtung um 90° gegen die senkrechte Lage zunächst über die eine

Schraubstockkante gebogen, zurück in die senkrechte Lage gebracht und dann über die andere Schraubstockkante um 90° gebogen, wieder in die senkrechte Lage zurückgebracht und so fort hin- und hergebogen, bis Bruch erfolgt. Die Anzahl der bis zum Bruch gezählten Biegungen, die Biegezahl, gilt als Gütemaßstab. Die Biegung aus der senkrechten Lage um 90° nach einer Seite und zurück in die senkrechte Lage wird als eine Biegung gezählt.

Bei der Verwindeprobe wird das eine Ende des Drahtes festgespannt und vom anderen Ende her der Draht um seine Längsachse gedreht, bis Bruch erfolgt. Die Anzahl der Verwindungen, der Drehungen um die Längsachse, wird gezählt und dient als Gütemaßstab.

Zu den technologischen Proben sind auch die Wasserdrukproben zu zählen, bei denen Rohre durch inneren Wasserdruck geprüft und die Bruchbelastung, gewöhnlich mit Hilfe eines Manometers in Atmosphären, sowie hier und da auch die Formänderung gemessen werden. Die Stahlgefäße zum Transport und Aufbewahren von verdichteten Gasen (Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlensäure usw.) werden gleichfalls durchgängig vor der Ingebrauchnahme mit einem inneren Druck probiert, der höher als der Gebrauchsdruck ist; sie dürfen bei diesen Belastungen keine bleibenden Formänderungen erfahren. Rohrabschnitte müssen für den Versuch an beiden Enden abgedichtet werden, was zweckmäßig durch Lederstulpen geschieht, die innen mit Leim auszugießen sind, dem etwas chromsaures Kali zugesetzt wurde, damit er in Wasser weniger löslich wird. Der Leimeinguß wirkt wie ein Gummipolster und begünstigt die feste Anlage der Manschettenränder an den Rohrwandungen. Ein zweckmäßiger Einbau der Rohrabschnitte für diese Versuche, wie er im Materialprüfungsamte im Gebrauch ist, ist in Fig. 43 dar-

gestellt. Die Holzstücke *a* dienen dazu, die in senkrechter Richtung wirkenden Druckkräfte aufzunehmen und auf das Rahmenwerk zu übertragen. Auf diese Weise bleibt das Versuchsrohr von senkrecht wirkenden Druckspannungen frei und wird nur auf



a = Holzklötze. *b* = Widerlager. *c* = Ledermanschetten. *d* = Leimeinguß. *e* = Versuchsrohr. *f* = Druckwasserzuleitung.

Fig. 43. Versuchseinrichtung des Materialprüfungsamtes für Wasserdruckproben mit Rohren.

inneren Druck beansprucht. Wenn es sich um dünnwandige Rohre oder Gefäße handelt, was ja meistens der Fall sein wird, errechnet sich die Spannung, d. h. die Belastung der Querschnittseinheit, beim inneren Druckversuch nach $\sigma = p \frac{d}{2a}$, worin *p* den

mit Manometer gemessenen inneren Druck in Atmosphären, *d* den inneren Durchmesser, *a* die Wandstärke des Rohrabchnittes oder Gefäßes bedeutet. Auf diese Weise werden z. B. auch Gewehrläufe auf inneren Druck geprüft und gesprengt, wobei Innendrucke erforderlich sind, die nach Tausenden von Atmosphären zählen. Das Lichterfelder Materialprüfungsamt besitzt Preßzylinder, mit denen Innendrucke bis zu 12000 at. erzeugt werden. Der Zylinder einer solchen Vorrichtung ist nach

Art der Geschützrohre aus mehreren warm aufeinandergezogenen Ringen hergestellt, der Kolben hat nur einen Durchmesser von 34 mm. Der Zylinder wird als Druckkörper in eine Prüfungsmaschine eingebaut; auf den

Kolben des Preßzylinders wirkt die von der Prüfungs-
maschine übertragene Kraft. Der im Innern des Zylinders
erzeugte Wasserdruck wird in kupfernen Rohr-
leitungen (10 mm äußerer, 1 mm innerer Durchmesser)
nach dem Innern des Versuchsrohres weitergeleitet.

Literatur.

Erichsen, Ein neues Prüfverfahren für Feinbleche. Stahl
u. Eisen 1914, S. 879.

Keßner, Versuche über die Bearbeitbarkeit von Gußeisen
und Metallegierungen. Gießerei-Ztg. 1916, S. 274.

E. Härteprüfung.

Wie schon auf Seite 21 erörtert ist, hat der Begriff Härte
mannigfache Auslegung erfahren, ohne daß indessen eine
wirklich nach jeder Richtung hin zutreffende Begriffs-
erklärung bisher gegeben worden ist. Ebenso zahlreich
wie die Begriffserklärungen sind auch die Vorschläge zur
Messung der Härte. Von vornherein muß bei allen diesen
Verfahren davon abgesehen werden, Härte in absolutem
Maß zu messen; die Meßverfahren können immer nur mit
Vergleichsmaßstäben arbeiten und bedingen, wenn die Er-
gebnisse verschiedener Prüfungsstellen miteinander ver-
glichen werden sollen, auch vollkommen gleichartig ge-
baute Meßapparate mit gleichen Konstanten.

Eine der bekanntesten älteren Härtebestimmungen ist
diejenige mit Hilfe der sogenannten „Mohsschen Härte-
skala“, die von Mohs für mineralogische Zwecke auf-
gestellt ist und einige besonders charakteristische Minerale
in nachstehender Reihenfolge ihrer Härte nach einordnet:

- | | |
|--------------|--------------|
| 1. Talk, | 6. Feldspat, |
| 2. Gips, | 7. Quarz, |
| 3. Kalkspat, | 8. Topas, |
| 4. Flußspat, | 9. Korund, |
| 5. Apatit, | 10. Diamant. |

Von diesen Mineralien ritzt jedes das in der Skala an vorhergehender Stelle stehende, und es wäre möglich, auch die Metalle nach dieser Skala in bezug auf ihre Härte einzuordnen. Indessen hat das Verfahren für diesen Zweck nur wenig Anklang und Verbreitung gefunden.

Mehr im Gebrauch sind Verfahren, bei denen das Eindringen eines zweiten Körpers in den zu prüfenden Körper als Maßstab für die Härte benutzt wird, wobei zu unterscheiden ist zwischen Eindring- und Ritzverfahren. — Beim Eindringverfahren werden Stempel der verschiedensten Form verwendet, die unter Belastung, meistens durch eine Prüfungsmaschine, in den zu prüfenden Körper eingedrückt werden, wobei entweder die Belastung für bestimmte Eindrücktiefen oder die Eindrücktiefen für bestimmte Belastungen als Vergleichsmaßstab dienen. Auf diesem Grundsatz beruhen die Verfahren von Middlberg, Kerpely, Auerbach-Kirsch, Rudeloff-Föppl, die sich im großen und ganzen nur durch die Form der verwendeten Stempel unterscheiden.

In neuerer Zeit ist besonders das Verfahren von Brinell (bei den preußischen Staatseisenbahnen übrigens schon vor Brinell auf Grund der Untersuchungen von Kohn zur Schienenprüfung verwendet) in Aufnahme gekommen, der die Härte mit Hilfe einer Stahlkugel, die in den zu prüfenden Körper eingedrückt wird, bestimmt. Als Maß dient die Eindrücktiefe bzw. der Durchmesser der Eindruckstelle. Die Brinellsche Härtezahl (H) gibt an:

$$H = \frac{P}{f_k} \text{ (kg/qmm),}$$

worin P die zur Erzeugung des Eindruckes angewendete Druckbelastung und f_k die Oberfläche der durch den Eindruck gebildeten Kugelkalotte bezeichnet. Zur Errechnung

der letzteren muß der Durchmesser des Eindruckkreises (d) gemessen werden. Es ist dann

$f_k = \pi Dh$, wenn D der Durchmesser der Stahlkugel und

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

E. Meyer (Literatur s. unten) hat erwiesen, daß die von Brinell in die Rechnung eingeführte Größe f_k die sonst einfachen physikalischen Beziehungen seiner Härtemessung unnötig verwickelt macht. Die Härtezahl läßt sich einfacher und einwandfreier aus dem Quotienten

$$\frac{P}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

ermitteln, d. h. also der Division der angewendeten Druckbelastung P durch die Fläche des Eindruckkreises (Projektion der Berührungsfläche zwischen Kugel und Probekörper auf eine zur Druckrichtung senkrechte Ebene).

Der Deutsche Verband für die Materialprüfungen der Technik hat sich jedoch aus verschiedenen theoretischen und praktischen Erwägungen entschlossen, die Bestimmung der Kugeldruckhärte nach Brinell und nicht nach der Meyerschen Formel zu empfehlen.

Als Durchmesser der gehärteten Eindruck-Stahlkugel empfiehlt Brinell 10 mm, als Druckbelastung für Eisen und Stahl 3000 kg, für weichere Metalle 500—1000 kg.

Vereinheitlichungen über die Anwendung der Kugeldruckproben nach Brinell sind neuerdings durch den Deutschen Verband für die Materialprüfungen der Technik getroffen worden. Hiernach gilt folgendes:

1. Als Einheitskugel die Kugel von 10 mm Durchmesser.

2. Für dünnwandige Proben Verwendung kleinerer Kugeln nach folgender Zusammenstellung:

Dicke der Proben in mm:	> 6 ,	$6-3$,	< 3 ,
Durchmesser D der Stahlkugel in mm:	10	5	2,5.

3. Druckbelastung P :

Für Eisen und Stahl $P = 30 D^2$ 3000 750 187,5,

Für Kupfer, Messing,

Bronzen usw.: $P = 10 D^2$ 1000 250 62,5.

Belastungsdauer 30 Sekunden.

Für Stahl von $H \geq 140$ sind 10 Sekunden ausreichend. Für Zink und andere stark fließende Werkstoffe kann es angezeigt sein, die Belastungsdauer > 30 Sekunden zu wählen; um wieviel, richtet sich nach dem Zweck der Prüfung.

4. Der Abstand der Eindruckmitte vom Rande der Probe soll so groß sein, daß der Rand nicht augenfällig ausgebogen wird, was meistens erreicht wird, wenn der Abstand nicht kleiner als der Kugeldurchmesser ist.
5. Der Eindruckdurchmesser ist auf $\frac{1}{100}$ mm anzugeben. Bei unrunder Eindrücken, die besonders bei Walzstahl vorkommen, ist der mittlere Durchmesser maßgebend. Bei rauher Oberfläche, groben Drehriefen wird der Eindruckdurchmesser zu groß und demgemäß die Härteziffer zu klein gefunden.
6. Die zwischen einzelnen Kugeln bestehenden Härteunterschiede beeinflussen die Härteziffer nicht, solange H der Kugel ≤ 450 kg-qmm ist. Bei Prüfung härterer Werkstoffe ist zu berücksichtigen, daß H mit Abnehmen der Kugelhärte abnimmt; in solchen Fällen empfiehlt sich die Verwendung besonders harter Kugeln. (Gute Kugeln haben mindestens eine Härte

von 630 kg-qmm, gemessen beim Aneinanderdrücken zweier gleichharter Kugeln als mittlere Pressung in der Berührungsfläche vom Durchmesser d , das ist

$$\frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

7. Für verschieden gerichtete Druckflächen können bei ein und derselben Probe verschieden große Eindrucksdiameter und dementsprechend verschiedene Werte für H gefunden werden.
8. Für Proben, deren Dicke gering — kleiner als ungefähr $1,5 d$ — ist, eignet sich die gewöhnliche Unterlage nicht immer, insofern, als bei weicherer Unterlage ein zu kleiner, bei härterer Unterlage ein zu großer Wert für H erhalten werden kann.
9. Für Metalle, die oben nicht angeführt sind, mag die Druckbelastung P in der Regel so gewählt werden, daß sich mit der 10 mm-Kugel Eindrücke von 3—5 mm Durchmesser ergeben.

Aus der sehr umfangreichen Spezialliteratur über die Brinell-Kugelprobe sind am Schlusse dieses Abschnittes einige Abhandlungen aufgezählt.

Apparate zur Ausführung der Brinellprobe sind in verschiedener Bauart im Gebrauch, (Aktiebolaget Alpha, Stockholm; Mohr u. Federhaff, Mannheim, u. a.). Martens hat für Kugeleindruckproben, ähnlich dem Brinellverfahren, einen Apparat konstruiert (Beschreibung s. Ztschr. d. Ver. d. Ingen. 1908, S. 1719), der im unteren Teil einen Druckerzeuger (durch Wasserleitungsdruck betrieben) und gleichzeitig, da er als Meßdose (s. S. 134) gebaut ist, einen Druckmeßapparat darstellt, während der obere Teil als Tiefenmeßvorrichtung ausgebildet ist. —

Erwähnt seien hier noch von ähnlichen Härteprüfverfahren die Kegeldruckprobe nach Ludwik (Literatur s. unten), der an Stelle der Brinellschen Stahlkugel einen Stahlkegel bestimmter Abmessungen als Eindruckkörper benutzt, und ferner das Skleroskop von Shore (Literatur s. unten), der die Härte aus dem Rückprall bestimmt, den eine Stahlkugel erfährt, die aus bestimmter Höhe frei auf den zu prüfenden Körper herabfällt (sogenannte Kugelfallprobe).

Unter den Ritzverfahren ist das Verfahren von Martens („Materialienkunde“ S. 241) zu nennen, der

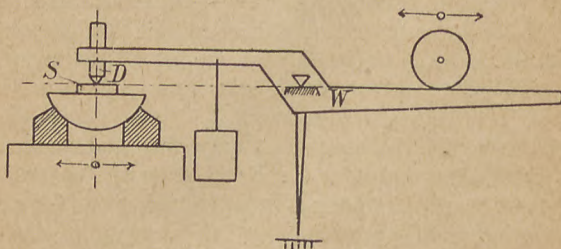


Fig. 44. Ritzhärteprüfer nach Martens („Materialienkunde“ S. 241).

hierzu einen besonderen Apparat konstruiert hat, dessen Schema in Fig. 44 dargestellt ist. Der Wagebalken W trägt auf der einen Seite ein Laufgewicht, das längs einer am Hebel angebrachten Teilung verschoben werden kann. Am anderen Ende des Wagebalkens ist ein Diamant D eingesetzt, dessen Spitze nahezu unter 90° zugeschärft ist. Mit diesem Diamanten kann das Probestück, das auf S befestigt wird, unter verschiedenen Belastungen, die unter Vermittlung des festen Belastungsgewichtes und des verschiebbaren Laufgewichtes eingestellt werden, geritzt werden. Das Ritzen geschieht durch Verschieben des

Auflagertisches mit der Probe gegen den Diamanten; es werden unter verschiedenen Belastungen auf dem Probe-
stücke in bestimmten Abständen voneinander Strich-
gruppen erzeugt und die Ritzbreite der einzelnen Striche
unter dem Mikroskop ausgemessen. Aus Strichbreite und
Belastung des Diamanten wird der Vergleichsmaßstab ge-
bildet. Nach dem Vorschlage von Martens sollte als Härte-
maß diejenige Belastung des Diamanten in Grammen gel-
ten, unter der in dem zu prüfenden Material eine Strich-
breite von 0,01 mm erzielt wird.

Im gewöhnlichen Sprachgebrauch des Technikers
decken sich die Begriffe Härte mit hoher Festigkeit, —
ein sehr harter Stahl ist gewöhnlich ein Stahl mit hoher
Festigkeit, dessen Fließgrenze (σ_S) nahe an der Bruch-
grenze (σ_B) liegt. Es hat daher auch nicht an Vorschlägen
gefehlt, die Festigkeitseigenschaften als Maßstab für die
Härte zu benutzen oder umgekehrt aus der Brinellhärte-
zahl auf die Festigkeit des Materials zu schließen. Indessen
ist diese Identität zwischen Härte und Festigkeit nicht
bei allen Materialien zutreffend. Gußeisen z. B., ein harter
Körper, hat nur geringe Zugfestigkeit. Das zurzeit vor-
liegende Beobachtungsmaterial reicht auch noch nicht aus,
um einwandfrei feststehende Zahlenwerte für die Be-
ziehung zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit bei den
verschiedenen Materialien angeben zu können. (Literatur
hierüber s. am Schlusse des Abschnitts.)

Der Deutsche Verb. f. d. Materialprüfungen der Technik
gibt als angenäherte Beziehung an:

für Kohlenstoffstähle ($\sigma_B = 30 - 100 \text{ kg/qm}$)
 $\sigma_B = 0,36 H,$

für Chromnickelstähle ($\sigma_B = 65 - 100 \text{ kg/qm}$)
 $\sigma_B = 0,34 H.$

Literatur.

- Brinell, Ein Verfahren zur Härtebestimmung nebst einigen Anwendungen desselben. Baumaterialienkunde 1900, S. 276.
- L. Grenet, Ausführung der Brinellprobe mit Hilfe eines Materiales bekannter Härte. Revue Mét. 1908, S. 928.
- Ludwik, Härtebestimmung mittels Brinellscher Kugeldruckprobe. Ztschr. d. Österr. Arch.- u. Ing.-Ver. 1907, S. 191.
- Malström, Brinellversuche mit Gußeisen. Dinglers polyt. Journ. 1907, S. 33.
- Geßner, Härtebestimmung mittels der Ludwikschen Kegelprobe unter Stoßwirkung. Ztschr. d. Österr. Arch.- u. Ing.-Ver. 1907, S. 799.
- Martens-Heyn, Vorrichtung zur vereinfachten Prüfung der Kugeldruckhärte. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1908, S. 1719.
- E. Meyer, Untersuchungen über Härteprüfungen und Härte. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1908, S. 645, 740, 835.
- Schwarze, Radreifenuntersuchungen nach dem Kohn-Brinell-Verfahren. Zentralbl. d. Bauverwaltung 1911, S. 487.
- , Rechnerische Ermittlung der Härte nach Hertz und Versuche usw. Annalen f. Gewerbe u. Bauwesen 1913, Heft 5.
- Kohn, Der Schienenstoff und seine Prüfung, insbesondere die Kugeldruckprobe. Zentralbl. d. Bauverwaltung 1908, S. 515.
- Liepe, Verwendung der Brinellprobe zu Kraft- und Schlagarbeitsmessungen. Verhandl. d. Ver. z. Befördg. des Gewerbl. 1912, Jan., S. 78.
- Révillon, Anwendung der Brinellprobe bei Untersuchung von Spezialstählen. Revue Mét. 1908, Bd. 5, S. 270.
- Zahlentafeln für die Brinellsche Härteprobe. Amer. Machinist 1911, S. 986.
- Hanriot, Abhängigkeit der Brinell-Härtezahls vom Kugeldurchmesser. Génie civil 1912, S. 526.
- Brinell-Härteprüfapparat der Alpha A.-G., Stockholm. Engineering 1909, Nov., S. 538.
- Kürth, Untersuchungen über den Einfluß der Wärme auf die Härte von Metallen (Kugeldruckproben). Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1909, S. 85, 209.
- Ballentine, Härteprüfung von Metallen. Amer. Machinist 1907, S. 698.
- Robin, Die Härte von Stahl bei höheren Wärmegraden. Revue Mét. 1908, S. 893.

- Turner, Härteproben. Engineering 1909 I, S. 835.
- Kürth, Eine Beziehung zwischen Härte, Streckgrenze und innerer Energie zäher Metalle. Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1908, S. 1560, 1608.
- Shore, Ein Apparat zur Härteprüfung. Amer. Machinist 1907, S. 747. (Kugelfallprobe.)
- Schneider, Kugelfallprobe. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1910, S. 1631.
- Härteprüfmaschine von Amsler. Amer. Machinist 1910, S. 681.
- Kirner, Pendelhärtemesser. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1910, S. 1834.
- Devries, Härtemeßverfahren. Amer. Machinist 1911, S. 648.
- Saniter, Härteprüfungen. Amer. Machinist 1912, Okt., S. 516.
- Härteprüfmaschine nach Avery u. Co. Engineering 1912, Sept., S. 353.
- Ludwik, Die Härte der technisch wichtigsten Legierungen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1917, S. 549.
- Shepard, Hardness tests of brass. Amer. Machinist 1917, S. 935.
- Batson, Value of the indentation methods in the determination of hardness. Engineering 1918, S. 475.
- Über Beziehungen zwischen Brinellhärte und Zerreißfestigkeit:
- Haig, Extending the use of the Brinell ball test for metals. Amer. Machinist 1914, S. 59.
- Shepard u. Porter, Hardness tests of cold rolled-steel. Amer. Machinist 1915, S. 277.
- Brayton, Tensile strength and hardness of steel. Iron Age 1918, S. 627.
- Shore, Hardness-testing. Engineering 1918, S. 444.
- Berndt, Zusammenhang von Kerbschlagarbeit, Zerreißfestigkeit, Dehnung und Brinellhärte. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1918, S. 421.
- Döhmer, Beziehungen zwischen Zerreißfestigkeit und Härtezahlen nach Brinell für Eisen- und Stahlsorten. Werkstatt-Technik 1919, S. 33.
- Edwards, Härteprüfungen und die Beziehungen zwischen Härte- und anderen physikalischen Eigenschaften. Journal of Birmingham Metallurgical Society 1919, Juniheft.
- Vgl. auch die einschlägigen Arbeiten in Literaturübersicht S. 6, Nr. 12 u. 13.

III. Hilfsmittel für Festigkeitsversuche.

Die Materialprüfungstechnik bedarf besonders für die Festigkeitsversuche der maschinellen Hilfsmittel, um die Versuchsmaterialien den beabsichtigten Beanspruchungen zu unterwerfen und um die vom Probekörper erlittenen Formänderungen zu messen. Ersterem Zwecke dienen die Prüfungsmaschinen, letzterem die Meßwerkzeuge.

1. Die Prüfungsmaschinen.

a) Allgemeines.

Wie schon auf Seite 30 erwähnt ist, hat die wachsende Bedeutung der Materialprüfungstechnik eine große Mannigfaltigkeit in der Bauweise von Prüfungsmaschinen gezeitigt. Ohne näheres Eingehen auf Konstruktionseinzelheiten seien hier nur die wichtigsten und bekanntesten von ihnen kurz skizziert. Eine Fülle von Material über Einzelheiten findet der Konstrukteur in Martens „Materialienkunde“ (Abschnitt IV).

Die drei wichtigsten Teile einer Prüfungsmaschine sind: der Krafterzeuger, der Kraftmesser, das Maschinengestell. Der Krafterzeuger bringt durch geeignete Vorrichtungen die Kräfte in der beabsichtigten Größe und Richtung zur Wirkung auf den Probekörper.

Der Kraftmesser gestattet, die vom Probekörper aufgenommenen Kräfte zu messen. Das Maschinengestell ist vermittelndes Konstruktionsglied zwischen Krafterzeuger und Kraftmesser. Es ermöglicht den sogenannten Kraftschluß, indem es den Kreis, in dem die zur Wirkung kommenden Kräfte verlaufen, schließt: Krafterzeuger — Probekörper — Kraftmesser — Maschinengestell — Krafterzeuger. Es gestattet ferner, die ganze Maschine mit ihrem Fundament in feste Verbindung zu

bringen, sofern es sich nicht um kleinere, transportable Maschinen handelt, und dient schließlich auch dazu, um Hilfseinrichtungen, wie Schaulinienzeichner oder Meßapparate, an der Maschine zu befestigen.

b) Krafterzeuger.

Für den Krafterzeuger kann hydraulischer oder mechanischer Antrieb benutzt werden. Der Krafterzeuger ist also entweder eine hydraulische Presse oder ein Schraubenpaar, Spindel und Mutter, das durch ein Schneckengetriebe von Hand oder mit Hilfe eines motorisch betriebenen Vorgeleges betätigt wird. Im ersteren Falle wird in der Regel der Kolben der hydraulischen Presse der die Kraft übertragende Teil sein; der Probekörper wird also mit dem Kolben gewöhnlich unter Vermittlung von Einspannvorrichtungen (s. S. 30) in Verbindung gebracht.

Im Falle des mechanischen Antriebes wird die den Probekörper fassende Einspannvorrichtung an der Schraubenspindel befestigt sein.

Ogleich der hydraulische Antrieb umfangreichere maschinelle Vorkehrungen erfordert als der mechanische, hat er doch die größere Verbreitung gefunden. Weitaus die meisten Konstruktionen besonders größerer Prüfungsmaschinen haben hydraulischen Krafterzeuger. Seine Vorzüge gegenüber dem mechanischen Antrieb bestehen darin, daß er gestattet, die Belastungsgeschwindigkeit schnell in beliebigen Grenzen zu steigern oder zu vermindern, während beim mechanischen Antrieb, besonders wenn Vorgelege Verwendung finden, dies meist nur in gewissen Grenzen möglich ist. Man kann ferner bei hydraulischem Antrieb mit einfachen Konstruktionen höhere Krafterleistungen erzielen als mit dem mechanischen und vermag ebenso wie

mit dem letzteren die Belastung stoßfrei zu steigern und einzelne Belastungsstufen hochzuhalten, vorausgesetzt, daß die erforderlichen Hilfseinrichtungen (Absperrventile, Kolbendichtungen usw.) zuverlässig wirken, was bei zweckmäßiger Konstruktion leicht zu erreichen ist. Der mechanische Antrieb hat andererseits den Vorzug, daß die Maschinen meist leichter ortsveränderlich und schließlich auch einfacher in der Wartung und Bedienung sind.

Der hydraulische Antrieb besteht in der Regel aus einem sogenannten hydraulischen Preßzylinder, d. h. einem zylindrischen Hohlgefäß, in dem ein Kolben möglichst reibungsfrei geführt ist. Auf die Kolbenfläche wirkt im Zylinder eine Preßflüssigkeit — Wasser, Öl, Glyzerin —, während der aus dem Zylinder herausragende Teil des Kolbens die Kraft direkt oder durch geeignete Übertragungsvorrichtungen an den Probekörper abgibt. Um nun, nachdem der Kraftschluß (s. S. 126) hergestellt ist, die Kraft so weit steigern zu können, daß unter ihrer Einwirkung die Festigkeit von Probekörpern aus widerstandsfähigem Material überwunden wird, muß die auf die Kolbenfläche wirkende Preßflüssigkeit unter so hohem Drucke stehen, daß Produkt aus Druck der Preßflüssigkeit ϕ (Atmosphären) mal Kolbenfläche F (Quadratcentimeter) eine Belastung P in Kilogramm ergibt, die größer als die Zerreiß-, Druck- usw.-Festigkeit des Probekörpers ist.

Für einen Normaldruckkörper (s. S. 67) aus Gußeisen mit etwa 8000 at. (=8000 kg/qcm) Druckfestigkeit würde sich beispielsweise die erforderliche Kraftleistung und die Bemessung des Preßwasserdruckes wie folgt er rechnen:

$$P = \phi \cdot F \quad \text{und}$$

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

$$-\sigma_B = 8000 \text{ at.}$$

$$-P_B = -\sigma \cdot f \text{ (s. S. 62).}$$

Der Druckkörperquerschnitt, wenn $d = 3,0 \text{ cm}$

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 7,07 \text{ qcm.}$$

Die zum Zerdrücken des Körpers nötige Gesamtbelastung

$$-P_B = 8000 \cdot 7,07 = \sim 57\,000 \text{ kg.}$$

Steht an der zur Prüfung benutzten Maschine als Kraft-erzeuger ein Preßzylinder zur Verfügung, dessen Kolben-durchmesser 30 cm, sein Querschnitt 707 qcm ist, so würde, um den obengenannten Druckkörper zum Bruch bringen zu können, die Preßflüssigkeit im Zylinder unter einem Druck von

$$p = \frac{P}{F} = \frac{57\,000}{707} = \sim 80 \text{ at.}$$

stehen müssen. — Sehr gebräuchliche deutsche Prüfungs-maschinen (z. B. Pohlmeier-, Martens-, Werdermaschinen usw., s. die Beschr. S. 137) haben im Krafterzeuger solche Kolbenabmessungen, daß man zur Erreichung der Höchst-leistung der Maschine mit Preßwasserdrucken von 150 bis 200 at. auskommt.

Die Erzeugung des Druckes in der Preßflüssig-keit geschieht durch Pumpwerke, die entweder von Hand oder durch motorischen Antrieb betätigt werden. In grö-ßeren Anlagen, z. B. den öffentlichen Prüfungsstellen, wird man meistens die letztere Antriebsart finden und zudem mit Vorrichtungen, die die Prüfungsmaschinen nahezu gänzlich frei von den nicht zu vermeidenden Pumpen-stößen machen. Solche Anstalten haben gewöhnlich ge-meinsam für alle aufgestellten Prüfungsmaschinen eine

Zentrale, in der die Druckwassererzeugung besorgt wird und von der aus mit Rohrleitungen das Preßwasser nach den einzelnen Verbrauchsstellen geführt wird. Eine Preßwasserzentrale enthält in der Regel das Pumpwerk und einen sogenannten Akkumulator, d. h. einen Sammler, der vom Pumpwerk gespeist wird. Der Akkumulator hat den Zweck, stets eine bestimmte Menge Preßflüssigkeit unter bestimmtem, gleichbleibendem Drucke in Vorrat zu halten, ohne daß es erforderlich ist, daß das Pumpwerk andauernd in Betrieb bleibt. Die Tätigkeit des Pumpwerkes zum Wiederauffüllen des Akkumulators paßt sich vielmehr dem jeweils schwankenden Bedarf an Druckwasser an; geeignete Vorrichtungen (zum Anheben des Saugventils oder automatische Anlasser für den Antriebsmotor) veranlassen, daß das Pumpwerk erst wieder in Tätigkeit tritt, wenn der Vorrat an Druckwasser im Akkumulator nahezu aufgebraucht ist. Die Zwischenschaltung des Akkumulators zwischen Pumpwerk und Verbrauchsstelle hat ferner den Vorteil, daß die Prüfungsmaschine im Betriebe nicht andauernd durch die Pumpenstöße, die besonders dann störend sind, wenn sie sich auf das Anzeigerwerk der Lastmeßvorrichtung übertragen, beeinflußt wird.

Die Weiterleitung der Preßflüssigkeit vom Akkumulator nach den Krafterzeugern der Prüfungsmaschinen geschieht durch Rohrleitungen — meist gezogene Stahlrohre oder Mannesmannrohre —, in die an geeigneten Stellen Ventile zum Entleeren und Entlüften der Leitung, sowie Schlammfänger zum Absondern von Schlamm- oder Rostteilen eingebaut werden. Um die Zuflußgeschwindigkeit des Druckwassers zu den Maschinenzylindern und die Drucksteigerung in der Maschine regeln zu können, werden Steuerkörper vor jeder Maschine angeordnet. Eine zweckmäßige Konstruktion eines solchen Steuerkörpers

nach Angaben von Martens ist der „Denkschrift zur Eröffnung des Königl. Materialprüfungsamtes“ S. 283 entnommen und in Fig. 45 dargestellt. Die der Figur beigegebenen Erläuterungen kennzeichnen die Wirkweise. Die städtische Wasserleitung ist an die Ventile herangeführt, um die Leergangsarbeiten der Maschine, also das Heben

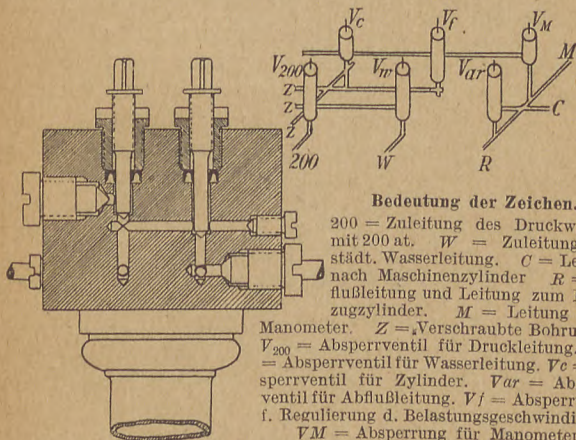


Fig. 45. Steuerkörper für hydraulische Prüfungsmaschinen nach Martens (Denkschrift S. 283).

und Senken des Preßkolbens bis zum Kraftschluß (s. S. 126), mit Wasserleitungsdruck bewirken zu können.

Über den mechanischen Krafterzeuger ist Besonderes nicht zu bemerken. Seine Hauptbestandteile, bestehend aus Schraube und Schneckenrad, dürften bekannt sein. Sowohl die Steuerorgane bei hydraulisch betriebenen Maschinen als auch die Antriebsvorrichtung mechanisch betriebener Krafterzeuger sollten so gebaut und instand gehalten sein, daß es möglich ist,

bestimmte Belastungsstufen an der Maschine möglichst genau nach dem Kraftanzeiger einzustellen und hochzuhalten, damit man gegebenenfalls Messungen am Probekörper unter diesen Belastungsstufen ausführen kann. Das ist nicht nur wichtig für die Prüfung und Eichung der Maschinen (s. S. 153), sondern auch für alle die Fälle, in denen Belastungen auf vorgeschriebene Höhe einzustellen sind (z. B. bei Reckproben mit Ketten u. a.) oder Entlastungen von bestimmter Belastungsstufe zur Ermittlung bestimmter Formänderungsgrenzen (z. B. 0,2 % Streckgrenze, s. S. 19) vorzunehmen sind. Diesem Gesichtspunkte wird leider vielfach von Konstrukteuren und Erbauern von Prüfungsmaschinen nicht in ausreichendem Maße Rechnung getragen.

c) Kraftmessung.

Die Kraftmessung an den Prüfungsmaschinen erfolgt entweder mit Hilfe von Wagen oder hydraulisch.

Als Wagen kommen besonders Hebelwagen, Neigungswagen und Federwagen in Betracht.

Die Hebelwagen bestehen in der Regel aus einem ungleicharmigen Wagehebel, der mittels Schneide in einer Pfanne drehbar gelagert ist und an dessen kurzem Hebelarm der Probekörper unter Vermittlung der Einspannvorrichtungen angreift und die Kraft überträgt. Am Ende des anderen, langen Hebelarmes angehängte oder auf eine dort angehängte Wageschale aufgesetzte Gewichte halten dann dieser Kraft das Gleichgewicht. Die angehängten oder aufgesetzten Gewichte sind hierbei um soviel mal kleiner als die am kurzen Hebelarm angreifende Kraft, wie der lange Hebelarm länger als der kurze ist (Übersetzungsverhältnis). Bei einem Hebelübersetzungsverhältnis von

1 : 500 wird also einer Kraft von 500 kg, angreifend am kurzen Ende des Hebelarms von der Länge 1, schon mit 1 kg Gewicht am Ende des langen Hebelarmes von der Länge 500 das Gleichgewicht gehalten. Eine Maschine mit ungleicharmigem Wagehebel als Kraftmeßvorrichtung s. in Fig. 49. Vielfach wird der ungleicharmige Wagehebel auch als Winkelhebel gebaut. Mit Winkelhebel als Kraftmesser arbeitet die Werdermaschine (s. Fig. 48).

Bei dieser Art der Hebelwagen bleibt also das Hebelübersetzungsverhältnis konstant und die Gewichte zum Auswägen der Kräfte müssen der Größe der Kraft angepaßt werden. Bei den sogenannten Laufgewichtswagen jedoch wird ein Gewicht von gleichbleibender Größe auf dem langen Hebelarm längs einer Skala verschoben. Es wird in diesem Falle also das Hebelübersetzungsverhältnis entsprechend der Kraftgröße verändert. Mit Laufgewichtswagen sind Maschinen von Mohr u. Federhaff, Losenhausen, Schenk u. a. ausgerüstet.

Die Konstruktion der sogenannten Neigungswagen veranschaulicht die Darstellung der Pohlmeiermaschine in Fig. 50, S. 140. Sie wirken ebenso wie die allgemein bekannten Briefwagen: Im Drehpunkt f des ungleicharmigen Hebels ac ist mit Schneide und Pfanne drehbar ein Pendel p gelagert. Die Kraft P greift am kurzen Hebelarm an. Der erfolgende Ausschlag des Pendels, dessen Größe mit geeigneten Vorrichtungen gemessen wird (s. Pohlmeiermaschine Fig. 50), ist proportional der Kraft P .

Die Federwage findet besonders für Maschinen mit kleineren Krafterleistungen Verwendung. Das Maß der Kraft ist hierbei der Federweg, die Längenänderung der Feder. Mit Federwagen arbeiten die Papierzerreißapparate von Hartig-Reusch und Wendler (Fig. s. im 2. Bdch.).

Die hydraulische Kraftmessung geschieht in der

einfachsten Form durch Anbringung eines Manometers am Preßzylinder des Krafterzeugers. Es ist sehr unzweckmäßig, bei dieser Art der Kraftmessung den Stutzen zur Aufnahme der Manometer in die Rohrleitung einzubauen, die vom Pumpwerk zum Preßzylinder der Maschine führt. Hierdurch kann die Lastanzeige sehr fehlerhaft beeinflusst werden. Die Manometer sind vielmehr entweder unmittelbar am Preßzylinder oder an einer von letzterem nach dem Manometerstutzen direkt führenden Rohrleitung anzuordnen.

Der Druck der Preßflüssigkeit im Preßzylinder multipliziert mit der Kolbenfläche des Preßkolbens gibt das Maß für die Kraft, die auf den Probekörper übertragen wird, wobei indessen zu berücksichtigen ist, daß ein Teil der Kraft durch die Überwindung der Reibung der Manschette an der Zylinderwandung aufgebraucht wird; die auf den Probekörper wirkende Kraft ist also um diesen Reibungsbetrag kleiner als das Produkt aus Preßflüssigkeitsdruck mal Kolbenfläche. Erfahrungsgemäß ist dieser Reibungsbetrag zwar für den ganzen Belastungsbereich der Maschine nicht gleich groß, aber bei guter Instandhaltung der Maschine für die einzelnen Belastungsstufen nahezu gleichbleibend und an größeren Maschinen in der Regel kleiner als ein Prozent der Gesamtkraft, weswegen er für die Messungen bei praktischen Versuchen an solchen größeren Prüfungsmaschinen vernachlässigt werden darf, vorausgesetzt, daß man seine Größe einmal festgestellt hat und sie von Zeit zu Zeit nachkontrolliert. Mit hydraulischer Kraftmessung dieser Art arbeiten die Maschinen nach Fig. 53, S. 143 (400 t-Betonpresse nach Martens).

Die hydraulische Kraftmessung kann ferner auch durch eine besondere Meßvorrichtung, die sogenannte Meßdose, erfolgen. Fig. 46 zeigt eine Meßdose nach Martens. Die

Meßdose ist ein zylindrisches Gehäuse *g*, in dem eine Messingblech- oder Gummimembran *m* ausgespannt ist, unter der sich Wasser, vielfach auch Glyzerin befindet. Auf der Membran ruht der Dosedeckel *d*, auf den die vom Probekörper aufgenommene Kraft übertragen wird. Durch den Druck auf den Dosen- deckel wird das Wasser unter der Membran unter Druck gesetzt; dieser Druck wird mittels Manometers gemessen. Die beiden Stahlbleche *f* dienen zur Führung des Dosedeckels. Der Deckel selbst arbeitet mit nur geringem Spiel, höchstens 0,2 mm, d. h. seine Auf- und Abwärtsbewegung kann höchstens 0,2 mm betragen. Das Membranblech, aus 0,2 mm dickem Messingblech, hat dieser Bewegung zu folgen, weswegen das Spiel äußerst gering bemessen werden muß, damit das Messingblech nicht an den Auflagerstellen durchgedrückt wird. Erforderlich ist ferner, daß der Druckwasserraum unter der Membran gut luftleer gemacht ist, so daß er ganz mit Wasser angefüllt werden kann. Ist Luft in dem Raume enthalten, so wird diese als elastischer Körper unter der Druckwirkung durch den Dosedeckel elastisch zusammenge-

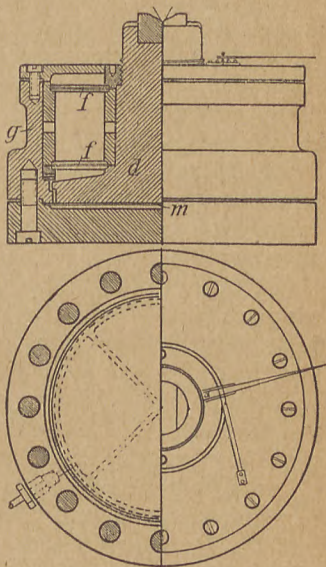


Fig. 46. Meßdose nach Martens
(„Denkschrift“ S. 284).

drückt; dadurch werden dem Dosendeckel größere Wege gestattet werden, und es liegt die Gefahr nahe, daß der Deckel an seiner Spielbegrenzungsfläche zur Auflage kommt. Die Folge davon wäre, daß die Druckwirkung auf das Membranblech und die Preßflüssigkeit aufhört und das Manometer der Meßdose keine Belastung des Probekörpers mehr anzeigt, während in Wirklichkeit die Kraft vom Probekörper durch den Dosendeckel auf dessen Spielbegrenzungsfläche übertragen wird. Das Deckelspiel wird man daher durch geeignete Vorrichtungen mit unter Beobachtung halten müssen. Die Meßdosen sind bei neueren Maschinenkonstruktionen, z. B. Losenhausen oder Mohr u. Federhaff, in verbesserter Form viel als Kraftmesser verwendet worden, und zwar sowohl für Druckpressen, als auch für Zerreißmaschinen.

Da das bei jeder Art der hydraulischen Kraftmessung verwendete Meßinstrument, das Manometer, in seinen Anzeigen Veränderungen unterworfen sein kann, so ist es erforderlich, um diese Veränderungen rechtzeitig erkennen zu können, am Kraftmesser zwei Manometer vorzusehen, von denen das eine als Gebrauchsmanometer, das andere als Kontrollmanometer zu benutzen ist. Letzteres sollte sicher abstellbar sein und nur eingeschaltet werden, um seine Anzeigen von Zeit zu Zeit mit denen des Gebrauchsmanometers zu vergleichen, wobei jedoch zweckmäßig nicht bis zum Bruch eines etwa in die Maschine eingebauten Probekörpers vorzugehen ist, denn der hierbei auftretende Schlag würde auch die Richtigkeit der Anzeige des Kontrollmanometers gefährden. Stimmen die Ableesungen an beiden Manometern nicht mehr überein, so deutet dies auf eine Änderung im Zeigerwerk des einen oder anderen Manometers hin, was dann Veranlassung zur Nachprüfung der Manometer sein sollte. Diese Nachprü-

fung der Manometer der Maschine kann jedoch nicht eine regelmäßige Nachprüfung der Maschine und ihres Erhaltungszustandes (s. Abs. 3, S. 154) ersetzen, weil andere Umstände (z. B. Kolben- und Manschettenreibung, unvollständige Meßdosenfüllung u. a.) am Zustandekommen unrichtiger Kraftanzeige ebenso mitwirken wie unrichtig anzeigende Manometer.

Manometer zur Kraftmessung sollten nicht nach kg, t oder at. eingeteilt, sondern mit einfacher Gradeinteilung und zweckmäßig ausgeführtem Zeiger versehen sein. Es läßt sich doch nicht, auch wenn Einteilung nach kg oder dgl. vorgesehen ist, umgehen, wenn richtig gemessen werden soll, die zu jeder Manometeranzeige gehörigen wirklichen Belastungen des Probekörpers aus einer Belastungstabelle zu entnehmen, die auf Grund der Prüfung und Eichung der Maschine aufgestellt worden ist. Die Gradeinteilung weist jeden Beobachter ohne weiteres auf die Benutzung dieser Belastungstabelle hin, während eine kg-, t- oder at.-Teilung dazu verleitet, die Anzeigen des Manometers ohne weiteres als richtig hinzunehmen.

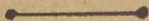
d) Einige Arten von Prüfungsmaschinen.

In den Fig. 48—54 sind eine Anzahl der bekanntesten Arten von Prüfungsmaschinen dargestellt.

Eine Wiedergabe von Abbildungen oder Konstruktionszeichnungen der Maschinentypen würde zu breiten Raum erfordern haben, weswegen hier die schematische Darstellung gewählt ist, die Martens in seiner „Materialienkunde“ und in der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1886, S. 171 eingeführt hat. Sie ist außerordentlich geeignet, das Wesentliche einer Maschine leicht übersichtlich auszudrücken, und ermöglicht schnelleres Verständnis



Einspannklaue.



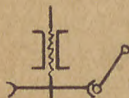
Probestab.



Fester Stützpunkt für Hebel.



Schraubenspindel mit Handrad.



Antrieb durch Schraube mit Schneckengetriebe von Hand oder motorisch.



Maschinengestell.



Meßdose.

Fig. 47. Zeichenbedeutung für schematische Darstellung von Prüfungsmaschinen.

als Abbildungen. Fig. 47 veranschaulicht die Bedeutung der angewendeten Zeichen.

Die Maschine nach Fig. 48 ist die Werdermaschine, eine der ältesten, von Werder konstruierten Maschinen liegender Konstruktion, die mit großer Genauigkeit der Kraftanzeige arbeitet und in ihrer Verwendung sehr vielseitig ist. Ihre höchste Kraftleistung ist 100 000 kg. Sie gestattet, Zug-, Druck-, Biege-, Knick-, Scher- und Torsionsversuche anzustellen. Das Maschinenbett ist so eingerichtet, daß Versuchsstücke bis zu 9 m Länge geprüft werden können. Zu dem Zwecke kann die Traverse t auf dem Maschinenbett je nach der Länge des Versuchsstückes verschoben werden; die Kraftübertragung zwischen dieser Traverse und dem festen Maschinengestelle wird durch eingebaute Zwischenstücke vermittelt.

Der Antrieb der Maschine ist hydraulisch. Die Kraftmessung erfolgt durch Hebelwage; der Wagehebel ist als

Winkelhebel ausgebildet. Der kurze Hebelarm ist 3 mm lang, was dadurch erreicht ist, daß die beiden

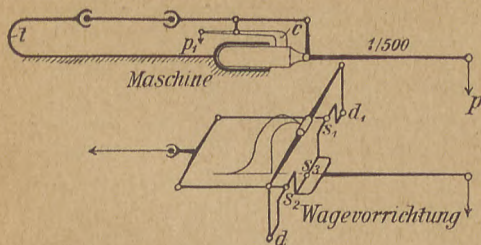


Fig. 48. Schema der Werdermaschine.

seitlichen Schneiden S_1 und S_2 um 3 mm höher liegen als die mittlere Schneide S_3 , die mit den Dreh-

punkten $d d_1$ in einer Ebene liegt. Der lange Hebelarm ist 1500 mm lang, das Übersetzungsverhältnis also 1 : 500. Die Maschine ist mit einer Kontrollwage c ausgestattet, um das Übersetzungsverhältnis der

Hauptwage kontrollieren zu können. Die Gewichte

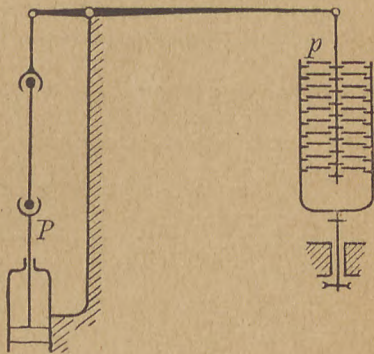


Fig. 49. Schema der Martensmaschine.

müssen von Hand auf die Wageschale aufgesetzt werden.

Eine stehende Maschine mit 50 000 kg höchster Kraftleistung, von Martens konstruiert, zeigt schematisch Fig. 49. Sie ist nur für Zugversuche verwendbar und eignet

sich ihrer genauen Lastanzeige wegen besonders für Zugversuche mit Feinmessungen. Der Antrieb ist hydraulisch. Die Kraftmessung geschieht durch eine Hebelwage. Das Hebelübersetzungsverhältnis ist 1 : 250. Die Gewichte zum Auswiegen der

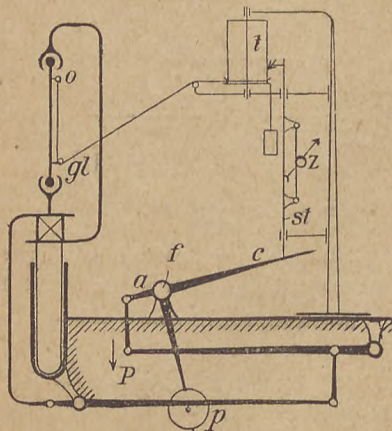


Fig. 50. Schema der Pohlmeiermaschine.

Kräfte werden in Form von Scheiben (jede im Gewicht von 4 kg) durch besondere Vorrichtung stoßfrei zum Anhängen am Ende des langen Hebelarmes gebracht; die Maschine wird ebenso wie die Werdermaschine von der Maschinenbaugesellschaft Nürnberg gebaut.

Eine andere für die Versuche der Praxis geeignete Maschine, die Pohlmeiermaschine, zeigt Fig. 50. Sie wird für Kraftleistungen von 25 000, 50 000 und 100 000 kg von der Maschinenfabrik Ehrhardt in Zella-St. Blasii gebaut und ist für Ausführung von Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Lochversuchen benutzbar. Der Antrieb ist hydraulisch; die Kraftmessung geschieht durch eine Neigungswage. Der Pendelausschlag wird durch eine Übertragungsstange *st*, die auf dem Hebel *a c* gestützt ist, auf ein Zeigerwerk *z* übertragen, an dessen Skala die Belastung bis auf 10 kg abgelesen werden kann. Diese Einrichtung erleichtert die Benutzung der Maschine auch durch weniger

geübte Beobachter sehr, weil sich die zu ermittelnden charakteristischen Belastungsstufen (Streckgrenze, Bruchgrenze, Zerreißgrenze) deutlich durch Stehenbleiben oder Abfallen des Zeigers am Zeigerwerke erkennbar machen. Die Maschine ist zudem mit Schaulinienzeichner nach Konstruktionsangaben von Martens ausgerüstet. Die Belastungen werden durch den an der Übertragungsstange *st* befestigten Schreibstift auf der Trommel *t* als Ordinaten aufgetragen; die Trommel wird durch Schnurzug, der über eine Gleitrolle *gl* zur oberen, am Probestabe angebrachten Öse *o* geführt und dort befestigt ist, entsprechend der Längenänderung, die der Probekörper erfährt, gedreht, so daß in dem aufgezeichneten Schaubild die Formänderungen des Versuchskörpers als Abszissen aufgetragen werden.

Eine Maschine mit mechanischem Antrieb und Messung der Belastung mittels Differentialgehänge und Laufgewichtswage zeigt Fig. 51. Sie ist von Mohr u. Federhaff in Mannheim erbaut und viel in der Praxis, besonders für Zerreißversuche mit Metallen usw., in Benutzung. Sie wird in verschiedenen Größen gebaut und ist für gewöhnlich über ein Reibungsvorgelege elektromotorisch angetrieben. Statt des Differentialgehänges ist an den neueren Maschinen ein ungleicharmiger Wagehebel, ähnlich dem der Martensmaschine (s. Abb. 49), verwendet. Die Firma baut die gleichen Maschinen auch für Druck- und Biegeversuche, vielfach auch mit hydraulischem Antrieb.

Viel Verwendung in der Baumaterialprüfung finden zur Ausführung von Druckversuchen die Pressen von Amsler-Laffon (Fig. 52). Der Antrieb ist auch bei ihnen hydraulisch, die Kraftmessung jedoch hydrostatisch. Der hydraulische Antrieb, bei dem Rizinusöl als Preßflüssigkeit benutzt wird und der mit eingeschliffenen Kolben nach Amagatschem Prinzip arbeitet, wird von Hand mit-

tels Schneckenrades betätigt. Durch Druckreduktions-

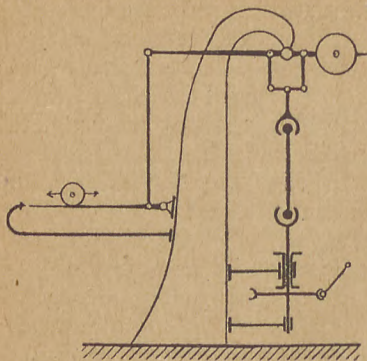


Fig. 51. Schema der Maschine von Mohr u. Federhaff.

kolben d wird der im Preßzylinder erzeugte Druck so reduziert, daß die Messung an einem Quecksilbermanometer erfolgen kann. Die Skala des Manometers gibt die Belastungen in Kilogramm und in Kilogramm/Quadratmeter für den Normaldruckkörper (Würfel von 7,1 cm Kantenlänge) an.

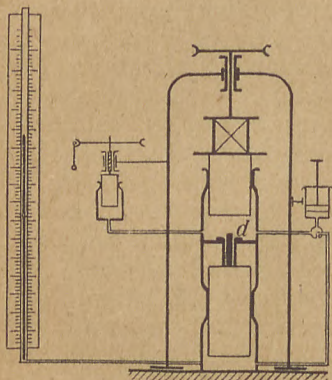


Fig. 52. Schema der Druckpresse von Amsler-Laffon.

Zwei andere Maschinen, gleichfalls mit hydraulischem Antrieb und hydraulischer Kraftmessung, zeigen die Fig. 53 u. 54. Nach dem Schema Fig. 53 ist eine Betondruckpresse für 400 t Kraftleistung, von Martens konstruiert, von der Nürnberger Maschinenfabrik äußerst gedungen gebaut und zur Verwendung auf dem Bauplatz auf fahr-

barem Untergestell geeignet. Der Antrieb geschieht durch

eine Handpumpe, die Kraftmessung durch zwei am Preßzylinder angeschlossene Hydraulikmanometer. Die Maschine nach Fig. 54 ist nach Konstruktionsangaben von Martens für die Ausführung von Dauerversuchen im Materialprüfungsamt von A. Borsig gebaut, für Zug- und Druckversuche benutzbar und mißt die Kräfte mit einer Meßdose *m*.

Aus der Fülle anderer Konstruktionen seien hier noch erwähnt die Maschinen von Gravenstaden,

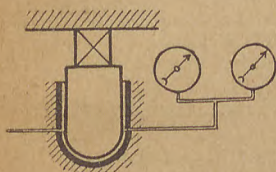


Fig. 53. Schema der 400 t Betonpresse nach Martens.

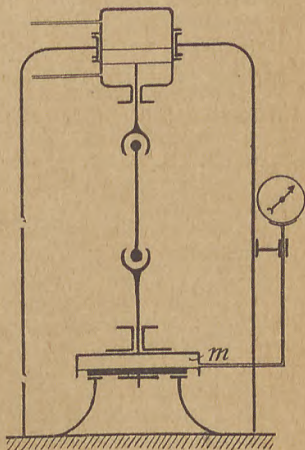


Fig. 54. Maschine für Dauerversuche nach Martens.

Gollner, Losenhausen, Schenk, Spieß, Tarnogrocki u. a. und von ausländischen, besonders englischen und amerikanischen Maschinen die Konstruktionen von Kirkaldy, Sellers, Tinius Olsen, Riehlé Bros, Emery. Eine Reihe von Spezialmaschinen für die Festigkeitsversuche mit Papier und Bindemitteln sind im 2. Bändchen beschrieben.

Literatur.

Aus den nachstehenden Literaturangaben ist zu entnehmen, wo Beschreibungen über Prüfungsmaschinen zu finden sind:

- Rudeloff, Neuere Festigkeitsprobiermaschinen. Dingers polyt. Journal 1905, S. 375, 401.
- 150 t-Anker- und Kettenprüfmaschine Mohr u. Federhaff. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1905, S. 2054.
- Materialprüfung und moderne Prüfungsmaschinen. Gießerei-Ztg. 1905, S. 680, 743, 777.
- Stehende 600 000 kg-Prüfungsmaschine nach Riehlé. Engineering 1906 I, S. 206.
- Neuere Materialprüfmaschinen. Gießerei-Ztg. 1907, S. 365.
- Neuere Materialprüfmaschinen. Ztschr. f. Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1907, S. 239.
- 4500 t-Pressen der U. S. Geological-Survey. Engineering record 1908, Bd. 58, S. 160.
- Martens, Druckfestigkeitsprüfer für Zement. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1909, S. 694. Dingers polyt. Journal 1909, S. 305.
- Wazau, Neuere Festigkeitsmaschinen der Mannheimer Maschinenfabrik Mohr u. Federhaff. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1909, S. 1443, 1504, 1544, 1584.
- Seydel, 3000 t-Prüfmaschine. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1912, S. 479. Dingers polyt. Journal 1912, S. 168.
- Kurrein, Universal-Prüfmaschine Losenhausen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1912 II, S. 1943.
- Liegende Universalprüfmaschine Mohr u. Federhaff. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1913, S. 1278.
- Kurrein, Der gegenwärtige Stand des Materialprüfmaschinenbaues. Eisenbau 1913, S. 255.
- , 1000 t-Emery-Maschine des Bureau of Standards Washington. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1913, S. 1125.
- Irion, Neuere Prüfmaschinen. Ztschr. d. Ver. d. Ing. 1920, S. 477.

2. Meßwerkzeuge.

a) Allgemeines.

Unter den Meßwerkzeugen kommen erstens solche in Betracht, mit denen die Abmessungen der Probekörper vor und nach dem Versuch festgestellt werden, und zweitens solche, die zur Ermittlung der Formänderungen während des Versuchs dienen.

Die ersteren können Strich- oder Endmaße sein. Strichmaße sind die Maßstäbe mit Millimeter- und Zenti-

metereinteilung; die Endmaße sind Schublehren und Schraubenlehren, auch Mikrometerschrauben genannt. Beide Arten dürften hinlänglich bekannt sein, so daß ihre Beschreibung sich an dieser Stelle erübrigt. Größeres Interesse erfordern die Meßwerkzeuge zur Bestimmung der Formänderungen während des Versuchs. Sie können dazu dienen, nur die größeren Formänderungen oberhalb der Fließgrenze (s. S. 18) des Materials zu messen und dementsprechend grobe Werkzeuge sein, oder sie müssen zur Ermittlung der sehr kleinen elastischen Formänderungen unterhalb der Elastizitäts- oder Proportionalitätsgrenze (s. S. 16) benutzt werden und dann außerordentlich empfindlich und sehr genau und sauber gearbeitet sein.

b) Grobmeßapparate.

Für die Messung der größeren Formänderungen werden Anlegemaßstäbe verwendet, die beim Zerreißversuch mit Federklemmen am Probestab befestigt werden. Einen solchen Anlegemaßstab in einfachster Form, wie ihn sich jeder leicht selbst herstellen kann, zeigt Fig. 55. An der kleinen Holzleiste h ist ein Stück Papiermaßstab mit Millimeterteilung aufgeleimt, während bei s eine Holzschraube eingeschraubt ist, deren Kopf schneidenförmig zugefeilt ist. Der Abstand zwischen der so gebildeten Schneide und der Nullmarke der Millimeterteilung

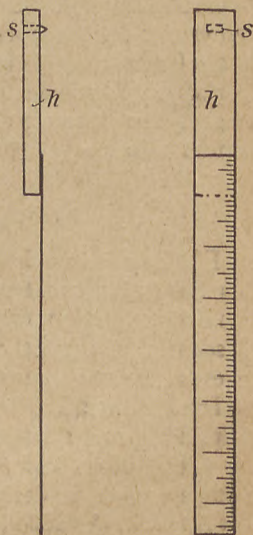


Fig. 55. Anlegemaßstab.

begrenzt die Meßlänge, innerhalb der die Dehnung des Stabes während des Versuches gemessen wird. Man befestigt den Anlegemaßstab mittels Federklemme so am Stabe, daß die Nullmarke der Millimeterteilung sich mit einer am Stabe eingeritzten Strichmarke deckt. Dehnt der Stab sich innerhalb der Meßlänge, so ist diese Dehnung an der jeweiligen Stellung der Strichmarke zur Millimeterteilung auf dem Papiermaßstab abzulesen, wobei man $\frac{1}{10}$ mm noch genau schätzen kann. Zur Errechnung von

$\varepsilon = \frac{\lambda}{l}$ (s. S. 27) muß man die abgelesene Dehnung noch

durch die Meßlänge dividieren. Diese Rechnung ersparen die sogenannten Prozentmaßstäbe, die ebenfalls Anlegemaßstäbe sind, aber eine Teilung haben, die nach Prozenten der Meßlänge ausgeführt ist. Bei einer Meßlänge von 150 mm sind bei diesen Maßstäben die einzelnen Teilmarken in Abständen von 1,5 mm voneinander aufgetragen. Die Dehnung des Stabes um eine Teilmarke entspricht einem ε von 1 %.

c) Feinmeßapparate.

Für die Messung der elastischen Formänderungen werden Feinmeßinstrumente verwendet. Eine große Anzahl von Konstruktionen sind auch hier, wie bei den Prüfungsmaschinen, zu verzeichnen; die meiste Verbreitung haben indessen die sogenannten Spiegelapparate gefunden.

Die Idee, die Gaußsche Spiegelablesung für die Materialprüfung zu verwenden, rührt von Bauschinger her, der zuerst einen solchen Apparat für die Versuche mit Feinmessungen an der Werdermaschine konstruiert hat. Der Apparat, der außerordentlich genau arbeitet, hat sich indessen für die Verwendung an anderen, besonders den

Maschinen stehender Konstruktion als unhandlich erwiesen. Aus diesem Grunde hat Martens seinen sehr zweckmäßig eingerichteten und leicht zu handhabenden Spiegelapparat nach dem gleichen Prinzip konstruiert. Fig. 56 veranschaulicht die Einzelteile des Apparates. Der schneidenförmige Stahlkörper s von rhombischem Querschnitt, bei dessen Herstellung besonders auf peinlichste

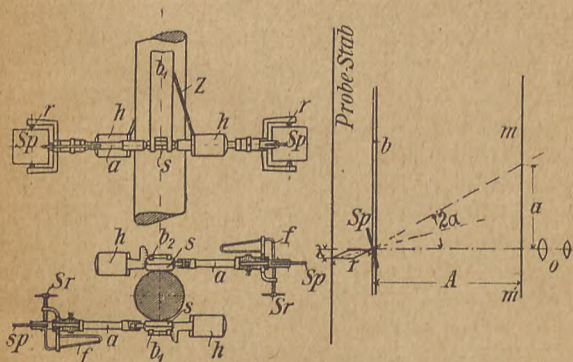


Fig. 56. Spiegelapparat nach Martens (aus „Denkschrift“ S. 324).

Sauberkeit und Parallelität der Schneidkanten zu achten ist, trägt in seiner Verlängerung in einer Achse a einen Planspiegel sp , der um seine Horizontalachse drehbar ist und mit Hilfe der kleinen Schraube sr auch um seine Vertikalachse gedreht werden kann, wobei die Drehung in Spitzen erfolgt, die in die Fassung r eingelassen sind und in Körnermarken des Spiegels eingreifen. Für die Rückwärtsbewegung des Spiegels beim Zurückschrauben der Schraube sr sorgt die Feder f . Unter Vermittlung zweier Stahlschienen b_1, b_2 (Meßfedern) und einer Federklemme werden zwei solcher Spiegelapparate mit ihren Schneiden-

körpern, wie Fig. 56 zeigt, an zwei gegenüberliegenden Längsfasern am Stabe angesetzt. Die Meßfedern b haben am oberen Ende eine Schneide, die in eine am Stabe zur Begrenzung der Meßlänge (d. h. derjenigen Länge, auf die die elastischen Formänderungen gemessen werden sollen) eingeritzte Ringmarke eingesetzt wird. Am unteren Ende der Meßfeder ist eine Nute eingearbeitet, die die Meßlänge nach unten hin begrenzt. Bei den Apparaten neuerer Konstruktion erübrigt sich die Anbringung einer Ringmarke am Stabe gegenüber den Nuten der Meßfedern, weil mit den am Handgriff h angebrachten Zeigern z die Lage der Schneidenachse zur Längsachse des Versuchsstabes richtiggestellt werden kann. Am oberen Ende der Federlänge, wo die Schneiden der Meßfedern am Stabe angesetzt werden, empfiehlt sich indessen die Anbringung einer solchen Ringmarke am Stabe, schon damit die beiden Meßfedern in gleicher Höhe am Stabe angesetzt werden; indessen ist der Apparat auch ohne diese Ringmarke bei einiger Übung bequem zu handhaben.

Die Wirkweise des Apparates ist folgende: Erfährt der Stab eine Längenänderung innerhalb der Meßlänge, so wird eine drehende Bewegung der Spiegelschneide, also auch des Spiegels erfolgen, deren Größe mit Hilfe des Fernrohres o aus der Verschiebung des Spiegelbildes der Skala m gegen das Fadenkreuz des Fernrohres abgelesen werden kann.

Das Übersetzungsverhältnis des Apparates ergibt sich aus nachstehenden Beziehungen. Die Dehnung λ des Stabes (s. Fig. 56) ist $\lambda = r \sin \alpha$, worin r die Breite des Schneidenkörpers, α der vom Spiegel durchlaufene Winkel. Die Ablesung a an der Skala ist, weil der Lichtstrahl wegen der Spiegelwirkung den Winkel 2α durchläuft (das Spiegelbild der Skala erscheint im Spiegel um ebensoviel hinter

dem Spiegel liegend, als die Skala vom Spiegel entfernt ist), $a = A \tan 2\alpha$, worin A den Abstand der Skala von den Spiegeln bedeutet. Das Übersetzungsverhältnis ist also:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r \sin \alpha}{A \tan 2\alpha}.$$

Da nur sehr kleine Winkel α in Frage kommen, so kann gesetzt werden:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r}{2A}.$$

Macht man also, wie es für gewöhnlich geschieht, die Schneidenbreite $r = 4$ mm, den Abstand $A = 1000$ mm, so ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von 1 : 500; d. h. eine Zunahme der Ablesung an der Skala um 1 mm bedeutet $\frac{1}{500}$ mm Dehnung des Stabes. Da die Fernrohre die Intervalle zwischen den Millimeterstrichen der Skala vergrößert erscheinen lassen, so kann man bei einiger Übung mit Genauigkeit die $\frac{1}{10}$ mm schätzen, so daß dann die Formänderung des Stabes in $\frac{1}{5000}$ mm abgelesen wird. Diese Meßgenauigkeit kann noch erhöht werden, wenn der Skalenabstand entsprechend vergrößert wird. Bis zu $\frac{1}{20000}$ mm sind diese Messungen mehrfach vorgenommen worden. Die Messung mit zwei Spiegelapparaten an zwei gegenüberliegenden Längsfasern des Stabes hat den Vorzug, daß λ als Mittelwert beider Ablesungen angegeben wird und ferner bei entsprechender Aufstellung der Ableseskalen etwa eintretende Bewegungen des Stabes im Raum auf das Meßergebnis keinen Einfluß haben. Tritt eine solche Bewegung des Stabes im Raume, z. B. Schiefstellung zur Zugachse der Maschine, ein, so wird die Ablesung von einem Spiegelapparate um so viel vergrößert, als sie am anderen verkleinert wird, eine Zunahme der Ab-

lesung, als Mittelwert beider Ablesungen errechnet, wird also in diesem Falle, wenn keine wirkliche Stabdehnung erfolgt ist, nicht zu verzeichnen sein. Würde man nur mit einem Spiegelapparate arbeiten, so würden diese Bewegungen im Raum das Meßergebnis fehlerhaft beeinflussen.

Beim Ansetzen der Schneidenkörper an den Probestab ist darauf zu achten, daß die Ebene der Schneidenkanten keinen zu großen Winkel gegen die Längsachse des Stabes bildet, denn schon, wenn die horizontale Schneidenachse um 5° gegen die Stablängsachse geneigt ist, wird der Fehler der Messung bereits über ein Prozent. An den Spiegelapparaten neuerer Konstruktion ist daher ein Zeiger z senkrecht zur Horizontalachse des Schneidenkörpers (s. Fig. 56) angebracht, der beim Ansetzen des Spiegelapparates auf eine Marke an der Meßfeder einspielen muß, wenn die Schneide die richtige Anfangsstellung hat (vgl. hierzu: Jensch, Der systematische Fehler der Messung mit dem Martensschen Spiegelapparat, „Mitteilungen“ 1920, H. 1). — Die Handhabung des ganzen Apparates ist bei einiger Übung außerordentlich einfach. Ein einigermaßen geübter Beobachter wird in längstens 10 Minuten den ganzen Apparat fertig angesetzt und eingestellt haben. Die Reihenfolge der Handhabungen ist zweckmäßig die folgende:

1. Einlegen des Probestabes in die Maschine,
2. Ansetzen der beiden Meßfedern — Anbringen der Federklemme — Einsetzen der Spiegelapparate — Ausrichten des Apparates,
3. Einstellen der Fernrohre so, daß Fadenkreuz auf Mitte der Spiegel steht,
4. Ansetzen der Skalen senkrecht zur Fernrohrachse,
5. Drehen des Stabes so, daß Spiegelbilder der Skalen seitlich gleich weit von den zugehörigen Fernrohrachsen erscheinen,

6. Festlegen des Stabes durch eine sogenannte Nullbelastung, damit das ganze System keine Bewegung im Raume mehr machen kann,
7. durch Drehen an den kleinen Schrauben *sr* (siehe Fig. 56) die Skalenbilder in das Gesichtsfeld der zugehörigen Fernrohre bringen,
8. den genauen Abstand der Skalen von den Spiegeln mit Hilfe einer Meßplatte, die gleich der Entfernung A ist, einstellen,
9. durch Kippen der Spiegel um die Horizontalachse die Nullmarke der Skala auf den Horizontalfaden des Fadenkreuzes einstellen,
10. so lange mit Beginn des Versuches warten, bis an der Ablesung keine Veränderung mehr festzustellen ist. Letztere wird durch Wärmeausdehnung des Meßapparates veranlaßt; die Apparate sind durch das Anfassen und Anhauchen beim Ansetzen mehr oder weniger erwärmt und müssen erst die Raumtemperatur wieder annehmen.

Der Apparat von Bauschinger unterscheidet sich im Prinzip hauptsächlich darin von dem Martensschen Apparat, daß an Stelle des schneidenförmigen Körpers Hartgummirollen verwendet sind, in deren verlängerter Achse die Spiegel befestigt sind und an denen tangential die Meßfedern angreifen, die Rollen mit den Spiegeln also entsprechend der Stabdehnung in drehende Bewegung versetzen.

Der Martenssche Apparat ist auch als Zeigerapparat unter Beibehaltung des gleichen Prinzipes ausgeführt. Fig. 57 zeigt seine Anordnung und erübrigt wohl weitere Erläuterung.

Viel verwendet sind auch die Mikrometerschrauben als Feinmeßinstrumente für Längenmessungen.

Für andere Versuchsarten, besonders für Biegeversuche, finden Rollenapparate, die gleichfalls von Bau-
schinger konstruiert sind, Verwendung. Fig. 58 zeigt

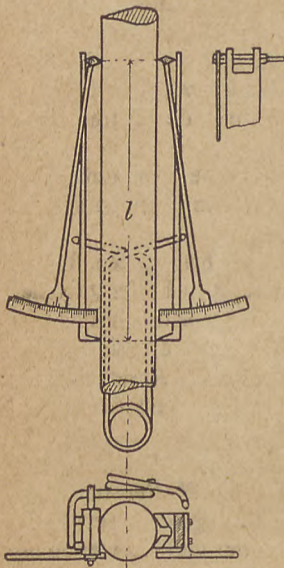


Fig. 57. Zeigerapparat nach Martens-Kennedy („Materialienkunde“ S. 455).

einem solchen Rollenapparat. Er besteht aus einer in Spitzen gelagerten Hartgummirolle r , die einen Zeiger z trägt, der an der Bogenskala S abläuft. Die Übertragungsstange st ist mit Klemmschraube an demjenigen Punkte befestigt, dessen Bewegung gemessen werden soll; st überträgt diese Bewegung dadurch, daß sie mit ihrem anderen Ende tangential am Rollenumfange des Apparates angreift, also das Vorgehen des Zeigers z längs der Bogenskala entsprechend der Bewegung des Meßpunktes bewirkt. Das Übersetzungsverhältnis ist, je nachdem die Übertragung an der Rolle mit dem größeren oder kleineren Durchmesser angreift, 1 : 20 oder

1 : 50. An der Millimeterteilung der Bogenskala können also entweder $\frac{1}{200}$ oder $\frac{1}{500}$ mm geschätzt werden. Für die Messungen beim Biegeversuch sind, um die Durchbiegung in der neutralen Linie (S. 73) zu messen, drei solcher Apparate, wie Fig. 31 zeigt, angeordnet. Die Apparate arbeiten sehr genau, so daß die

Größe der elastischen Formänderung und die Proportionalitätsgrenze scharf ermittelt werden können.

Die große Zahl von sonstigen Feinmeßgeräten an dieser Stelle zu beschreiben, verbietet der beschränkte Rahmen

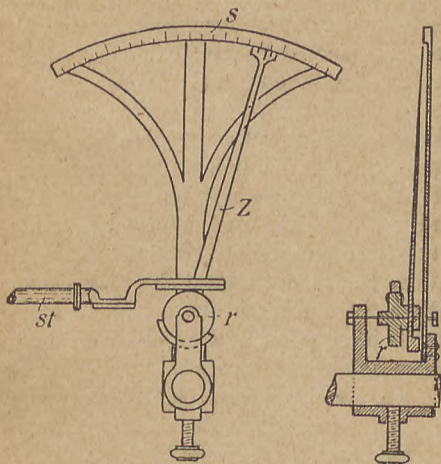


Fig. 58. Rollenapparat nach Bauschinger.

des vorliegenden Buches; erwähnt seien noch die Tellerapparate nach Martens, die neuerdings wesentlich verbessert von Leuner (Dresden) gebaut werden, sowie die besonders für Knickversuche zu benutzenden Fühlhebelapparate nach Bauschinger.

3. Kontrolle und Eichung der Hilfsmittel.

Wenn die bei der Materialprüfung benutzten Hilfsmittel einwandfreie und zuverlässige Ergebnisse liefern sollen, ist es erforderlich, daß der sie benutzende Beob-

achter sich klar ist über die in ihnen steckenden Fehlerquellen, über die Größe der ihnen etwa anhaftenden Fehler und über die Art und Weise, wie deren Größe auf das geringste Maß beschränkt werden kann. Die in den vorigen Abschnitten geschilderten Maschinen und Meßapparate sind sämtlich mehr oder weniger komplizierte Apparate, deren Einzelteile genauer Bearbeitung, sorgfältigsten Einbaues usw. bedürfen, wenn das Ganze richtig wirken soll. Ein solcher Mechanismus darf nicht ohne weiteres immer als Präzisionsinstrument betrachtet werden; wenn er dies im Anfang wirklich sein sollte, so bleibt es immer noch zweifelhaft, ob er dauernd ein Instrument ist, dessen Angaben blindlings als richtig anzusehen sind. Daher als oberster Grundsatz beim Gebrauch der Meßapparate in der Materialprüfung: „Man ergründe durch Vergegenwärtigung der theoretischen Grundlagen und der Wirkweise des Apparates seine Fehlerquellen, suche die Größe der Fehler festzustellen und erwäge, inwieweit diese Fehler bei der Auswertung des Meßergebnisses Berücksichtigung zu finden haben.“ Allgemein zutreffende Anweisungen lassen sich hierfür nicht geben. Für die Apparate zur Messung der Formänderungen wird man in vielen Fällen sich mit der Überzeugung, daß der dem Meßapparate anhaftende Fehler der Anzeige ein nur wenig veränderlicher ist, zufrieden geben können, vorausgesetzt, daß man diese Überzeugung durch häufiger wiederholte Prüfungen des Apparates gefestigt hat. Diese Meßwerkzeuge finden ja, wie aus den vorhergehenden Abschnitten hervorgeht, vielfach nur als sehr empfindliche Anzeiger, zur möglichst genauen Ermittlung charakteristischer Formänderungsgrenzen, Verwendung. Wenn es sich z. B. darum handelt, die Proportionalitätsgrenze durch Messung der elastischen Formänderungen eines Materiales zu ermitteln, so ist es für diese Messung

ziemlich gleichgültig, ob die Maßeinheit des verwendeten Spiegelapparates wirklich, wie angegeben, $\frac{1}{10000}$ mm oder ob sie vielleicht $\frac{1}{9998}$ mm ist, wenn man nur die Sicherheit hat, daß der betreffende Spiegelapparat immer nahezu mit dem gleichen Vergleichsmaßstab arbeitet. Kommt es jedoch auf Messung in absolutem Maß an, so wird die Kunst des sachverständigen Beobachters darin bestehen müssen, die Fehler seines Meßapparates entsprechend zu bestimmen und zu berücksichtigen. Für die Prüfungsmaschinen kann man, je nach der Gleichförmigkeit des mit ihnen zu prüfenden Materiales, bestimmte zulässige Fehlergrenzen festsetzen und durch häufigere Prüfung der Lastanzeige ermitteln, wie groß deren Fehler sind. Für Maschinen, mit denen Maschinenbau- und Konstruktionsmaterialien sowie Materialien mit ähnlichem Gleichförmigkeitsgrade geprüft werden, wird im allgemeinen ein Fehler der Anzeige bis zu ± 1 % zulässig sein; für Pressen zum Prüfen von Baumaterialien, Gesteinen, Bindemitteln usw. wird man Fehler bis zu $\pm 2,5$ % zulassen können. Größere Genauigkeit bei den Maschinen anzustreben, ist nicht unmöglich, aber in Ansehung der Ungleichförmigkeit unserer Materialien zwecklos.

Über die Wichtigkeit regelmäßiger und zuverlässiger Prüfung und Eichung von Festigkeitsprobiermaschinen sind weite Kreise der Benutzer solcher Maschinen noch nicht hinreichend aufgeklärt. Derartige Maschinenprüfungen sollten nicht nur einmal nach der Aufstellung der Maschine vorgenommen, sondern in regelmäßigen Zeitabständen (bei vielbenutzten Maschinen mindestens jährlich einmal) wiederholt werden. Man sollte solche Prüfungen auch nicht nur deswegen vornehmen lassen, weil Abnahmebeamte oder Behörden die Beibringung eines amtlichen Prüfungszeugnisses verlangen, sondern aus eige-

nem Antriebe und in eigenem Interesse, denn falsch anzeigende Prüfungsmaschinen können schwere wirtschaftliche Schädigungen des eigenen Betriebes mit sich bringen.

Zur Prüfung der Lastanzeigen der Maschinen haben verschiedene Konstrukteure (z. B. Pohlmeier, Werder) an ihren Maschinen Kontrollwagen angebracht, die aber die gewünschte Genauigkeit der Kontrolle oft nicht gewährleisten. Vom Lichterfelder Materialprüfungsamte ist hierfür ein Verfahren, von Bauschinger herrührend, vervollkommen worden, das vielfache Anwendung gefunden hat. Es beruht auf der Verwendung sogenannter Kontrollstäbe oder Kontrolldruckkörper. Aus einem gut elastischen Material mit hoher Elastizitätsgrenze (S. 16) — neuerdings kann bei den großen Fortschritten der Stahlveredelungstechnik bis auf etwa 40 kg/qmm heraufgegangen werden — wird ein Rundstab oder Druckkörper in solchen Querschnittsabmessungen hergestellt, daß er die durch die Höchstleistung der Prüfungsmaschine gegebene höchste Belastung zu tragen vermag, ohne daß seine Proportionalitätsgrenze überschritten wird, also ohne daß seine elastischen Eigenschaften durch diese Belastung eine Änderung erfahren. Dieser Kontrollprobekörper wird geeicht, d. h. es werden mit Hilfe genau arbeitender Spiegelapparate seine elastischen Formänderungen für bestimmte Spannungsstufen ermittelt, wobei man den sogenannten „Sollwert“ des Kontrollkörpers, d. h. aus einer größeren Zahl von Beobachtungen Mittelwerte für die Formänderung unter bestimmten Belastungsstufen ermittelt (beim Zugstab die Dehnung, beim Druckkörper die Zusammendrückung in $\frac{1}{10000}$ mm). Wird ein so geeichter Kontrollkörper nun in die zu prüfende Maschine eingebaut, und werden die der Eichung zugrunde gelegten Belastungen mit Hilfe des Lastanzeigers der Maschine wieder

hergestellt, so müssen als Formänderungen, wiederum mit den Martensschen Spiegelapparaten gemessen, die bei der Eichung gefundenen Sollwerte auch in der Prüfungs-
maschine gefunden werden, wenn die Lastanzeige dieser Maschine richtig ist. Abweichungen von diesen Sollwerten geben den Fehler der Maschine. Es ist unbedingt nötig, hierbei die Lastanzeige der Maschine über den ganzen Meßbereich des Kraftmessers zu prüfen, da der Fehler der Maschinen nicht immer gleich groß für ihren ganzen Belastungsbereich zu sein pflegt. Das ist auch der Grund für die Unzulänglichkeit eines noch häufig angewendeten Prüfungsverfahrens, bei dem man aus dem gleichen Material Zerreißstäbe in zwei Serien herstellt, die eine Serie auf einer amtlich geeichten Maschine oder in einem amtlichen Prüfungslaboratorium zerreißen läßt und die zweite Serie auf der zu prüfenden Maschine zerreißt, um so festzustellen, ob und inwieweit die angezeigten Bruchlasten beider Serien übereinstimmen, und hieraus Schlüsse über die Richtigkeit der Lastanzeige der zu prüfenden Maschine zu ziehen. Bei diesem Verfahren wird nur die Lastanzeige des sehr beschränkten Bereiches, in dem die Bruchlast der betreffenden Stäbe liegt, geprüft; überdies setzt das Verfahren voraus, daß das Material der Versuchsstäbe sehr gleichmäßig ist.

Die Eichung eines Kontrollkörpers setzt neben der Verwendung eines zuverlässig arbeitenden Spiegelapparates (S. 147) auch eine Belastungsvorrichtung mit richtiger Lastmessung voraus. Im Materialprüfungsamte wird hierzu der sogenannte Kontrollstabprüfer nach Martens-Hoppe verwendet (Abbildung s. Denkschrift zur Eröffnung des Amtes, S. 290). An den Kontrollstab können in dieser Maschine 10 geeichte Gewichtsscheiben von je 1000 kg Gewicht unter Vermittlung eines hydraulischen

Zylinders, dessen Kolben die Gewichtsstücke trägt, nacheinander angehängt werden. Die Stäbe können also mit diesem Apparat bis zu 10 t Belastung geeicht werden. Die weitere Belastung solcher Kontrollstäbe, die Belastungen von über 10 t ausgesetzt werden sollen, geschieht in gut justierten Prüfungsmaschinen des Amtes. Das Materialprüfungsamt gibt solche geeichte Kontrollkörper für niedrige und hohe Belastungsgrenzen an Interessenten ab, die sich ihre Maschinen dann selbst mit diesen Kontrollkörpern nachprüfen können, vorausgesetzt, daß sie die erforderlichen Hilfsmittel, wie Spiegelapparate u. a., besitzen und über genügend geübte Beobachter verfügen. Ist letzteres nicht der Fall, so ist es zweckmäßiger, die Prüfung einer amtlichen Prüfungsstelle zu übertragen. Das Materialprüfungsamt besitzt für die Kontrolle von Maschinen Stäbe und Druckkörper für 5 bis 500 t Maximalbelastung.

Andere Kontrollverfahren für die Maschinenprüfung, z. B. der Einbau geeichter Meßdosen nach Martens oder die Kontrolle durch Messung der elastischen Formänderungen der Maschinenteile (Frémont), haben allgemeinere Verbreitung noch nicht gefunden. Neuerdings hat man auch geeichte Kontrollkörper angewendet, bei denen die erzeugte Formänderung gemessen wird durch die Verdrängung von Flüssigkeiten (Öl, Glyzerin, Wasser, Quecksilber u. a.) aus einem im Kontrollkörper vorgesehenen Hohlraum. Solche Kraftprüfer sind von Wazau und von Amsler-Laffon gebaut worden (vgl. Wazau, Neue Kraftmesser, Zeitschr. d. Ver. d. Ingen. 1912, S. 268 und Martens, Über die Messung großer Kräfte im Materialprüfungswesen, Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akad. d. Wissensch. 1911, L. III, Sitzung vom 21./12, S. 1132).



Stichwortverzeichnis.

Zahlen bedeuten die Seitenzahlen.

- Ähnlichkeitsgesetz 42.
Akkumulator (hydraulisch) 130.
Amsler-Laffon-Maschine 141.
Anlegemaßstäbe 145.
Anlieferungszustand 109.
Antrieb, hydraulisch 128.
Antrieb, mechanisch 131.
Arbeitsfestigkeit 102.
Arbeitsvermögen 57.
Aufdornprobe 113.
Ausbreitprobe 113.
Ausdehnung durch Wärme 23.
- Barbas Versuche 43.
Betondruckpresse 143.
Biegefestigkeit 72.
Biegegrenze 74.
Biegegröße 107.
Biegeproben 105.
Biegeversuch 72.
Biegezahl 115.
Biegungsgröße 75.
Biegungspfeil 75.
Blätteriges Gefüge 55.
Blaubruchprobe 111.
Bleibende Formänderung 17.
Brinell-Härteprüfung 118.
Bruchdehnung 27.
Brucherscheinungen (Druckversuch) 66.
Brucherscheinungen (Schlagversuch) 89.
Brucherscheinungen (Zugversuch) 53.
Bruchflächen 53.
- Chemische Eigenschaften 24.
- Dauerversuche 101.
Dehnung 27.
Dehnungszahl 28.
Dichtigkeitsgrad 23.
Druckfestigkeit 62.
Druckversuch 62.
- Eichung der Hilfsmittel 153.
Eigenschaften 11.
Eindringverfahren (Härteprüfung) 118.
Einfluß der Meßlänge 41.
Einfluß der Querschnittsform 42.
Einfluß der Stabform 43.
Einkerbbrücheprobe 94.
Einschnittige Scherbeanspruchung 80.
Einspannvorrichtung (Druckversuch) 67.
Einspannvorrichtungen (Zugversuch) 30.
Elastische Formänderung 15.
Elastizitätsgrenze 16.
Elastizitätsmodul 28.
Erichsens Blechprüfung 114.
Eulers Knickformeln 69.
- Fallwerke 90.
Faseriges Gefüge 55.
Federwege 133.
Feinkörniges Gefüge 55.
Feinmeßapparate 146.
- Feinschuppiges Gefüge 55.
Festigkeit 11.
Fließfiguren 51.
Fließgrenze 18.
Formänderungsvermögen 14.
Fühlhebelapparate 153.
- Gebrauchslänge 44.
Gefüge 55.
Gesetz der proportion. Widerstände 42.
Gleitmodul 78.
Grobkörniges Gefüge 55.
Grobmeßapparate 145.
- Härte 21.
Härteprüfer (Martens) 122.
Härteprüfung 117.
Hebelwagen 132.
Hin- und Herbiegeprobe 114.
Höhenverminderung (Druckversuch) 63.
Höhenverminderung (Schlagversuch) 86.
Hookes Gesetz 17.
- Kaltbiegeproben 109.
Kegeldruckprobe 122.
Kerbschlagprobe 94.
Kerbzähigkeit 98.
Kicks Gesetz 42.
Knickfestigkeit 68.
Knickversuch 68.
Kohäsionskraft 11.
Kontrollstäbe 156.

- Kontrollstabprüfer (Hoppe) 157.
 Körniges Gefüge 55.
 Krafterzeuger 127.
 Kraftmesser 132.
 Kugeldruckprobe (Brinell) 118.
 Kugelfallprobe 122.

 Längenänderung 33.
 Laufgewichtswage 133.
 Lochapparat 83.
 Lochprobe 113.
 Lochversuch 82.

 Martens-Maschine 139.
 Maschinengestell 126.
 Mechanische Eigenschaften 11.
 Meßdose 134.
 Meßlänge 34.
 Meßwerkzeuge 144.
 Mikrometerschraube 151.
 Mohr u. Federhaff, Maschine von 141.
 Mohssche Härteskala 117.

 Nachwirkungserscheinungen 20.
 Neigungswagen 133.
 Neutrale Faser (Achse) 73.
 Normalfallwerke 90.
 Normalflachstab 45.
 Normalrundstab 45.
 Normalstab 43.

 Pendelhammer 95.
 Physikalische Eigenschaften 11.
 Pohlmeier-Maschine 140.

 Proportionalen Widerstände, Gesetz der 42.
 Proportionalitätsgrenze 16.
 Proportionalstab 45.
 Prüfungsmaschinen 126.

 Querschnittsvergrößerung 63.
 Querschnittsverminderung 29.
 Quetschgrenze 64.

 Reißlänge 12.
 Ritzverfahren (Härteprüfung) 122.
 Rohrleitungen 130.
 Rollenapparate 153.
 Rotbruchprobe 111.

 Scherapparat 81.
 Scherfestigkeit 79.
 Scherversuch 79.
 Schlagarbeit 86.
 Schlagbiegeversuch 94.
 Schlaglochversuch 94.
 Schlagscherversuch 94.
 Schlagversuch 84.
 Schlagzerreiversuch 94.
 Schmiedeproben 113.
 Schubzahl 79.
 Schweißprobe 113.
 Schwingungsfestigkeit 101.
 Sehniges Gefüge 55.
 Shores Skleroskop 122.
 Spannung 26.
 Spezifisches Gewicht 23.
 Spezifische Schlagarbeit 86.

 Spiegelapparate (Bauschinger) 146.
 Spiegelapparate (Martens) 147.
 Sprödigkeit 21.
 Statische Festigkeit 13.
 Stauchfaktor 87.
 Stauchprobe 113.
 Stauchung 86.
 Stoßfestigkeit 84.
 Streckgrenze 18.
 Strichmae 145.

 Technologische Eigenschaften 22.
 Technologische Proben 104.
 Tellerapparate 153.
 Torsionsversuch 75.
 Trichterbildung 53.

 Verdrehung 75.
 Verdrehungsfestigkeit 75.
 Verdrehungsgrenze 77.
 Verdrehungsversuch 75.
 Verwindeprobe 115.
 Völligkeitsgrad 57.

 Wagen 132.
 Wasserdruckprobe 115.
 Werdermaschine 139.
 Wöhlers Dauerversuche 102.

 Zähigkeit 21.
 Zeigerapparat 152.
 Zugfestigkeit 25.
 Zugversuch 25.
 Zusammendrückung 62.
 Zweischnittige Scherbeanspruchung 80.