

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

I

L. inw.

26

schen

stoffe

nbaues

Von

Dr. A. Thum

I

Die Metalle als Konstruktionswerkstoffe,
ihre Festigkeitsaufgaben und Prüfungsarten.
Die Eisenlegierungen und ihre allgemeinen
Eigenschaften

Mit 54 Abbildungen



476

Sammlung Götschen

Unser heutiges Wissen
in kurzen, klaren, allgemeinverständlichen
Einzeldarstellungen

Walter de Gruyter & Co.

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

Berlin W. 10 und Leipzig

Zweck und Ziel der „Sammlung Götschen“
ist, in Einzeldarstellungen eine klare, leicht-
verständliche und übersichtliche Einführung
in sämtliche Gebiete der Wissenschaft und
Technik zu geben; in engem Rahmen, auf
streng wissenschaftlicher Grundlage und unter
Berücksichtigung des neuesten Standes der
Forschung bearbeitet, soll jedes Bändchen
zuverlässige Belehrung bieten. Jedes einzelne
Gebiet ist in sich geschlossen dargestellt, aber
dennoch stehen alle Bändchen in innerem Zu-
sammenhange miteinander, so daß das Ganze,
wenn es vollendet vorliegt, eine einheitliche,
systematische Darstellung unseres gesamten

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000298011

A u
der

l i s s e
d postfrei

2.500
5.100

3305056

T 26

Maschinenbautechnische Bibliothek

aus der Sammlung Götschen

- Praktisches Maschinenzeichnen mit Einführung in die Maschinenlehre** von Ing. R. Schiffner und Prof. Dipl.-Ing. W. Tochtermann.
- I. Das Maschinenzeichnen. Zeichnen nach Vorlage und Zeichnen nach Modell. Mit 68 Tafeln Nr. 589
- II. Die wichtigsten Maschinenteile in zeichnerischer und konstruktiver Hinsicht. Mit 61 Tafeln Nr. 590
- Die Maschinenelemente.** Kurzgefaßtes Lehrbuch mit Beispielen für das Selbststudium und den praktischen Gebrauch von Oberingenieur Friedrich Barth. Mit 86 Fig. Nr. 3
- Maschinenmeßkunde** von Dr. Ing. L. Zipperer. Mit 98 Abb. Nr. 880
- Dynamik** von Dr. W. Müller. Mit vielen Figuren Nr. 902, 903
- Metallurgie** von Dr. August Geitz. 2 Bände. Mit 21 Fig. Nr. 313, 314
- Technische Wärmelehre (Thermodynamik)** von K. Waltherr und M. Röttlinger, Dipl.-Ing. Mit 54 Figuren. Nr. 242
- Mechanische Technologie** von Geh. Hofrat Professor A. Lüdicke. 2 Bände Nr. 340, 341
- Die thermodynamischen Grundlagen der Wärme-Kraft- u. Kältemaschinen** v. Dipl.-Ing. M. Röttlinger. Mit 73 Figuren Nr. 2
- Die Kalkulation im Maschinenbau** von Ingenieur H. Bethmann. Mit 61 Figuren Nr. 486
- Die Werkstoffe des Maschinenbaues** von Dr. A. Thum. 2 Bände. Mit vielen Abbildungen Nr. 476, 936
- Die Dampfmaschinen.** Kurzgefaßtes Lehrbuch mit Beispielen für das Selbststudium und den praktischen Gebrauch von Oberingenieur Friedrich Barth.
- I. Wärmetheoretische und dampftechnische Grundlagen. Mit 64 Figuren Nr. 8
- II. Bau und Betrieb der Dampfmaschinen. Mit 109 Fig. Nr. 572
- Die Dampfkessel.** Kurzgefaßtes Lehrbuch mit Beispielen für das Selbststudium und den praktischen Gebrauch von Oberingenieur Friedrich Barth.
- I. Kesselsysteme und Feuerungen. Mit 43 Figuren Nr. 9
- II. Bau und Betrieb der Dampfkessel. Mit 57 Figuren. Nr. 521
- Die Gasmaschinen und Ölmaschinen.** Kurzgefaßte Darstellung der wichtigsten Gasmaschinen-Bauarten von Ing. A. Kirschke. 2 Bände. Mit vielen Figuren Nr. 316, 651
- Die Wasserturbinen** von Dipl.-Ing. P. Holl u. Baurat E. Treiber.
- I. Allgemeines. Die Freistrahlturbinen. Mit 113 Figuren. Nr. 541
- II. Die Überdruckturbinen. Die Wasserkraftanlagen. Mit 102 Figuren Nr. 542

- Die Dampfturbinen**, ihre Wirkungsweise und Konstruktion von Prof. Dipl.-Ing. Const. Zietemann. 3 Bände. Mit zahlreichen Figuren Nr. 274, 715, 716
- Die zweckmäßigste Betriebskraft** von Ob.-Ingenieur Friedrich Barth.
- I. Einleitung. Dampfkraftanlagen. Verschiedene Kraftmaschinen. Mit 27 Figuren Nr. 224
- II. Gas-, Wasser- und Windkraft-Anlagen. Mit 31 Figuren. Nr. 225
- III. Elektromotoren. Betriebskostentabellen. Graphische Darstellungen. Wahl der Betriebskraft. Mit 27 Figuren Nr. 474
- Eisenbahnfahrzeuge** von Oberingenieur H. Hinnenthal.
- I. Die Dampflokomotiven. Mit 89 Figuren und 2 Tafeln Nr. 107
- II. Die Eisenbahnwagen und Bremsen. Neu bearbeitet von Ad. Wolff. Mit 56 Figuren im Text und 3 Tafeln Nr. 108
- Luftschiffahrt** von Professor Dipl.-Ing. C. Eberhardt. Mit 38 Figuren Nr. 842
- Flugtechnik** von Prof. Dipl.-Ing. C. Eberhardt. Mit 62 Fig. Nr. 841
- Pumpen, Druckwasser- und Druckluft-Anlagen.** Ein kurzer Überblick von Dipl.-Ing. Rudolf Vogdt. Mit 87 Fig. Nr. 290
- Die landwirtschaftlichen Maschinen** von Dipl.-Ing. Karl Walther. 3 Bände. Mit vielen Figuren Nr. 407—409
- Die Werkzeugmaschinen für Holzbearbeitung** von Ingenieur Prof. Hermann Wilda. Mit 125 Figuren Nr. 582
- Die Werkzeugmaschinen für Metallbearbeitung** von Ingenieur Professor Hermann Wilda.
- I. Die Mechanismen der Werkzeugmaschinen. Die Drehbänke. Die Fräsmaschinen. Mit 339 Figuren. Nr. 561
- II. Die Bohr- und Schleifmaschinen. Die Herstellung von Zahnrädern auf Werkzeugmaschinen. Mit 128 Figuren Nr. 562
- III. Hobel-, Shaping- und Stoßmaschinen. Sägen und Scheren. Antrieb und Kraftbedarf. Mit 98 Figuren Nr. 821
- Gießereimaschinen** von Dipl.-Ing. Emil Treiber. Mit 51 Fig. Nr. 548
- Die Gleichstrommaschine** von Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. 2 Bände. Mit 129 Figuren Nr. 257, 881
- Aufgabensammlung über die Gleichstrommaschine** mit Lösungen v. Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. Mit 38 Fig. Nr. 912
- Elektrische Förderanlagen** von Dr.-Ing. A. Schwalger. Mit 30 Figuren Nr. 678
- Die Preßluftwerkzeuge** von Dipl.-Ingenieur P. Ilfts. Mit 82 Figuren Nr. 493
- Die Baumaschinen** von Ingenieur Joh. Körting. Mit 130 Figuren Nr. 702
- Englisch für Techniker.** Ein Lese- und Übungsbuch von Dir. Ing. Carl Volk. 2 Bände. Mit vielen Figuren Nr. 705, 706

Weitere Bände sind in Vorbereitung

Sammlung Götschen

Die Werkstoffe des Maschinenbaues

Von

Dr. A. Thum

Vorstand der Versuchsanstalt
der Brown, Boveri & Cie. A.-G., Mannheim

I

Die Metalle als Konstruktionswerkstoffe,
ihre Festigkeitsaufgaben und Prüfungsarten.
Die Eisenlegierungen und ihre allgemeinen
Eigenschaften

Mit 54 Abbildungen



Berlin und Leipzig

Walter de Gruyter & Co.

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

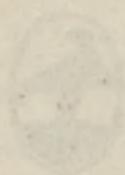
1926

W 1/3
249/9



~~226~~ 1-301303

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



~~3-169/2916~~
Druck von C. G. Röder G. m. b. H., Leipzig. 961225.

Akc. Nr. _____

~~5310~~/50

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Literaturübersicht s. Band II.

I. Einleitung.

- | | |
|--|---|
| 1. Die bisherige Entwicklung des Maschinenbaues | 5 |
| 2. Die Aufgaben des Maschinenbaues | 6 |
| 3. Die Hemmungen in der Entwicklung des Maschinenbaues | 7 |

II. Die Bedeutung der Werkstoffe für den Maschinenbau.

- | | |
|--|---|
| 1. Die Werkstoffkunde als notwendige Ergänzung der Konstruktion und Fertigung | 8 |
| 2. Die Notwendigkeit der besseren Ausnützung der bisherigen Werkstoffe und der Herstellung neuer verbesserter Werkstoffe zur Hebung der Wirtschaftlichkeit | 9 |

III. Die Metalle als Konstruktionswerkstoffe und ihre Prüfung auf Verwendbarkeit.

- | | |
|---|----|
| 1. Allgemeines über Metalle und Legierungen | 12 |
| 2. Die Beanspruchungsarten der Metallegierungen und die Aufgaben der Festigkeitslehre | 14 |
| 3. Die statischen Festigkeitsprüfungen. | |
| a) Der Zerreißversuch | 17 |
| b) Der Druckversuch | 25 |
| c) Die Verdrehungsprobe | 28 |
| d) Die Biegeprobe | 29 |
| 4. Die dynamischen Festigkeitsprüfungen. | |
| a) Allgemeines über dynamische Beanspruchung. Die Kerbwirkung | 30 |
| b) Die Schlagproben | 38 |
| c) Die Dauerschlagversuche (Ermüdungsversuche). . . | 47 |

5. Die Bestimmung der Härte und Bearbeitbarkeit der Metallegierungen	51
6. Die technologischen Festigkeitsversuche	55
a) Die Kaltproben	56
b) Die Warmproben	58
7. Die Hilfsmittel der praktischen Werkstoffkunde	59
a) Die chemische Analyse	60
b) Die Metallographie	62
c) Die Röntgen-Metallographie	74

IV. Die Legierungen des Eisens.

1. Die Legierungsfähigkeit des Eisens und die Benennung der wichtigsten Eisenarten	79
2. Das Gußeisen.	
a) Die Bedeutung des Gußeisens für den Maschinenbau	81
b) Die Herstellung des Gußeisens und seine physikalisch-technischen Eigenschaften	83
3. Das schmiedbare Eisen oder der Stahl.	
a) Die Bedeutung des schmiedbaren Eisens für den Maschinenbau.	88
b) Die Benennung des schmiedbaren Eisens	89
c) Die Herstellungsverfahren des Stahles.	90
d) Die Eigenschaften des Stahles.	
α) Die Schmiedbarkeit.	95
β) Die Schweißbarkeit.	96
γ) Die Festigkeitseigenschaften des Stahles und die Mittel, sie zu beeinflussen	97
1. Die chemische Zusammensetzung	98
2. Die mechanisch-metallurgische Verarbeitung:	
Die Warmverarbeitung (Das Schmieden)	102
Die Kaltverformung	109
3. Die Wärmebehandlung:	
Das Glühen	111
Das Härten	115
Das Vergüten	119
Das Einsatzhärten (Zementieren)	122

V. Zusammenfassung 126

Namen- und Sachverzeichnis	129
--------------------------------------	-----

I. Einleitung.

1. Die bisherige Entwicklung des Maschinenbaues.

Der Maschinenbau hat seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts in immer zunehmendem Grade an Ausdehnung gewonnen und steht heute auf einer Stufe, daß man das gegenwärtige Zeitalter schon oft das Maschinenzeitalter genannt hat. Die Bedingungen für die rasche Ausbreitung des Maschinenbaues wurden geschaffen durch die Erfindung der Dampfmaschine, die die Erfindung der Dampfschiffahrt und der Eisenbahnen mit sich brachte, wodurch das Verkehrswesen auf eine ganz neue Grundlage gestellt wurde und damit der Güteraustausch gegenüber früher vervielfacht wurde.

Sowohl die Kraftmaschinen als auch die Arbeitsmaschinen haben sich in den mannigfaltigsten Formen entwickelt. Aus den einfachen Vorrichtungen des Handwerkszeitalters sind heute große, verwickelte Maschinen geworden, die dem Menschen bereitwillig die Arbeit abnehmen. Die Entwicklung des Maschinenbaues vollzog sich sowohl in der Richtung des Großen, Gewaltigen — es werden heute Maschinen mit über 50000 PS gebaut — als auch nach der Seite des ganz Kleinen, Winzigen — es gibt Maschinen von $\frac{1}{100}$ PS und noch darunter.

2. Die Aufgaben des Maschinenbaues.

In allen Maschinen wird Energie, die in irgendeiner Form vorhanden ist, auf mechanischem Wege in eine andere Energieform umgewandelt. Dabei kann die Energie ursprünglich als Energie der Lage (potentielle Energie), als Wucht bewegter Massen (kinetische Energie), als Strömungsenergie bewegter Flüssigkeiten oder Gase, als Druckenergie gespannter Gase, als Wärmeenergie des Wasserdampfes oder erhitzter Gase oder als elektrische Energie vorhanden sein.

Die Hauptaufgabe des Maschinenbaues besteht nun darin, diese Energieumwandlungen so durchzuführen, daß die Maschinen ihren Zweck, menschliche Bedürfnisse zu befriedigen und dabei menschliche Arbeit zu sparen, möglichst vollkommen erfüllen. Dies wird dann erreicht, wenn es gelingt, die Maschinen möglichst wirtschaftlich, d. h. mit einem Minimum an Kosten herzustellen, ferner wenn die Maschinen im Betrieb sparsam sind, d. h. wenn die Energieumwandlung mit hohem Wirkungsgrad erfolgt und die Unterhaltungskosten gering sind.

Bei den Energieumwandlungen treten in den Maschinen Kräfte auf, die Beanspruchungen in den Werkstoffen hervorrufen, aus denen sie hergestellt sind.

Diese Kräfte und Beanspruchungen zu studieren und kennenzulernen, ist die Voraussetzung für jeden Erfolg im Maschinenbau; denn von ihrer Kenntnis hängt die konstruktive Ausgestaltung, der zweckmäßige Aufbau und vor allem der Sicherungsgrad der Maschinen ab. Die in den Maschinen auftretenden Beanspruchungen müssen wir auch deshalb kennen, um die richtigen Konstruktionswerkstoffe auszuwählen, um bei der Herstellung mit einem Mindestmaß von Werkstoff auszukommen und dadurch die Maschinen möglichst marktfähig zu machen.

5
X X X X X X X X X X

3. Die Hemmungen in der Entwicklung des Maschinenbaues.

Die geschilderten Aufgaben des Maschinenbaues suchte man bisher dadurch zu bewältigen, daß man die rechnerisch konstruktiven Methoden immer besser ausbildete. Seit man einsah, daß man mit der reinen Empirik nicht vorankam, bildete man auf den Schulen die jungen technischen Kräfte hauptsächlich in der Berechnung und Konstruktion der Maschinen aus. Zu diesem Zwecke machte man sie mit der Anwendung der Lehren der Statik, Dynamik, Festigkeitslehre, Wärmemechanik und Hydrodynamik vertraut. Diese Methode führte in der Tat zu glänzenden Ergebnissen und Fortschritten. Aber hie und da versagte sie plötzlich und ohne erklärliche Gründe; denn obwohl man glaubte, richtig gerechnet und konstruiert zu haben, erfüllten die Maschinen nicht richtig ihren Zweck, ja es traten unversehens schwere Maschinenbrüche auf. Am deutlichsten zeigte sich dieser Übelstand, je mehr man dazu überging, ganz große Maschinen zu bauen und ganz große Energien in den Maschinen umzuwandeln. Man wußte nicht, woher dieses plötzliche Versagen kam. War ein unvermuteter Bruch aufgetreten, so konstruierte man stärker. Aber oft war auch damit kein Erfolg mehr zu erzielen. Man verließ dann gewöhnlich die Konstruktion oder umging sie. Diese unvorhergesehenen Schwierigkeiten traten in allen größeren Unternehmungen auf und führten zu manchen Reibungen innerhalb der verantwortlichen Stellen. Die Fabrikleitungen, die in erster Linie auf den Erfolg ihrer Unternehmungen bedacht sein mußten, waren nur zu leicht geneigt, derartige Fälle auf das Schuldkonto des betreffenden Konstrukteurs zu setzen.

Der wahre Grund für diese häufigen Mißerfolge und Fehlschläge lag aber nicht in der persönlichen Untüchtigkeit

des betreffenden Konstrukteurs, sondern in der einseitigen Überschätzung der rechnerisch konstruktiven Seite des Maschinenbaues. Man hatte nicht genügend berücksichtigt, daß die Lehren der Mechanik, Festigkeitslehre, Thermodynamik und die nötige Konstruktionspraxis allein nicht ausreichen, um alle Probleme des Maschinenbaues zu lösen.

II. Die Bedeutung der Werkstoffe für den Maschinenbau.

1. Die Werkstoffkunde als notwendige Ergänzung der Konstruktion und Fertigung.

Alle physikalischen Vorgänge sind an die Materie gebunden. Sie ist die Trägerin und Vermittlerin aller Kräfte, Energien und Bewegungen. Wenn der Werkstoff, mit dem wir unsere Konstruktionen ausführen, nicht richtig gewählt ist, nützen alle unsere Berechnungen der physikalischen Erscheinung nichts. Wollen wir aus der Anwendung der Naturkräfte den größtmöglichen Nutzen ziehen, sollen unsere Konstruktionen von Erfolg begleitet sein, so müssen wir auch von den Werkstoffen, als den Trägern der Kräfte, eingehende Kenntnisse besitzen. Die Erkenntnis der Bedeutung der Werkstoffe hat in den technischen Kreisen noch nicht die Würdigung gefunden, die sie verdient. Die heutigen Ingenieure sind jedenfalls in dieser Hinsicht noch nicht genügend auf die sie erwartenden Aufgaben vorbereitet. Betrachten wir z. B. die Festigkeitslehre. Wir bekommen hier die klassische Elastizitätslehre, jenes Meisterwerk menschlicher Geistesarbeit vorgetragen. Wir erfahren auch eine Reihe von Festigkeitszahlen. Aber wenn wir nach den Lehren der Festigkeits-

lehre rechnen und konstruieren, so erleben wir in vielen Fällen schwere Enttäuschungen. Woher kommt dies? Der Grund, warum die Festigkeitslehre häufig versagt, liegt darin, daß sie die Probleme zu sehr idealisiert, daß sie mit vollständig gleichmäßigem Material rechnet, daß ihre Festigkeitszahlen rein statisch gewonnen sind, und daß sie uns von dem Verhalten der Werkstoffe bei dynamischer Belastung quantitativ so gut wie gar nichts mitteilt. Wir haben es aber bei unseren Maschinen nicht mit idealen Werkstoffen zu tun, sondern müssen bedenken, daß auch diese von Menschenhand geschaffen sind, daß sie also die verlangten Eigenschaften nur in einem mehr oder weniger vollkommenen Grade besitzen. Jede einfache Stahlstange, wie man sie etwa zum Anfertigen von Schrauben benützt, erscheint auf den ersten Blick als ein höchst einfaches Ding, das gar nichts Verwickeltes an sich hat. Aber in Wirklichkeit hat sie schon eine große Entwicklungsgeschichte hinter sich, deren Spuren sie noch in sich trägt. Da sind viele veränderliche Momente möglich, die chemische Zusammensetzung (z. B. der Gehalt an Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor, Silizium und Mangan), die Art der Erzeugung im Stahlofen, das Vergießen des Stahles, das Schmieden, Glühen, das Auswalzen im heißen Zustande, das Kaltziehen usw. In alle diese Dinge muß sich der Ingenieur vertieft haben, will er erfolgreich konstruieren.

2. Die Notwendigkeit der besseren Ausnützung der bisherigen Werkstoffe und der Schaffung neuer, verbesserter Werkstoffe zur Hebung der Wirtschaftlichkeit.

Die heutige Lage des Maschinenbaues zwingt mit gebieterischer Notwendigkeit, überall äußerst sparsam zu wirtschaften. Wir müssen sowohl die einheimischen, als

besonders die teueren fremden Werkstoffe auf das äußerste ausnützen. Dies hat einerseits äußerst knappe, sparsame Konstruktionen zur Folge, andererseits führt es zu immer höheren Geschwindigkeiten und damit größeren Beanspruchungen in den Werkstoffen.

Während wir früher, als wir nur kleine Maschinen bauten, als wir in unseren Maschinen nur kleine Kräfte, Drücke, Geschwindigkeiten, Energiemengen und Temperaturgrade zu bewältigen hatten, die Werkstoffe fast unbesehen hinnehmen konnten, wie wir sie aus der Zeit des Handwerks zufällig vorfanden, kommen wir jetzt, wo wir zu immer höheren Leistungen und damit Beanspruchungen und Geschwindigkeiten übergehen müssen, mit den bisher gebräuchlichen Werkstoffen häufig nicht mehr aus. Wir sind gezwungen, neue Werkstoffe mit bedeutend besseren Eigenschaften aufzusuchen und herzustellen. Das Streben, immer vollkommeneren Werkstoffe zu finden, zwingt uns, bessere Methoden der Werkstoffherzeugung zu studieren, den ganzen Erdball förmlich nach neuen Stoffen abzusuchen. Wir müssen die fernsten Länder nach den neuen Stoffen durchforschen; denn die alten Kulturländer sind gerade an den Stoffen, welche die neue Technik benötigt, arm oder nahezu schon erschöpft. Es sei nur an das Platin, Wolfram, Vanadium, Zinn, Nickel, den Kautschuck, Asbest, Glimmer und die kostbaren Lacke erinnert.

Wir müssen aus unseren Maschinen mehr denn je den höchsten Wirkungsgrad herausholen. Aber noch mehr, wir müssen unsere ganze Energiewirtschaft auf eine neue, höhere Stufe heben. Wir dürfen mit unseren Energiequellen nicht mehr wie früher Raubbau treiben. Wir können es uns auf die Dauer nicht mehr gestatten, einen großen Teil unserer Verkehrsmittel nur dazu zu benutzen, um Kohlen zu transportieren. Die Kohle muß an dem Ort, wo sie gewonnen wird, in elektrische

Energie umgewandelt und mittels hochgespanntem Strom auf weite Entfernungen übertragen werden. Um hierbei größte Wirtschaftlichkeit zu erzielen, brauchen wir große Turbineneinheiten von höchstem Wirkungsgrad.

Bei diesem Streben nach hoher Wirtschaftlichkeit stoßen wir aber auf fast unüberwindliche Schwierigkeiten. Diese sind aber im allgemeinen nicht physikalischer Natur, sondern es ist die Materialschranke, die uns hindert, unser Ziel zu erreichen. Wir wissen z. B., daß wir die Hauptaufgabe der Energiewirtschaft, die wirtschaftliche Ausbeutung unserer Kohlenschätze lösen können, wenn es uns gelingt, den Arbeitsvorgang zwischen möglichst großen Temperaturgrenzen zu vollziehen. Um den Wirkungsgrad unserer heutigen Dampfturbine zu verdoppeln, eine Lösung, die unsere Wärmewirtschaft mit einem Schlage gewaltig vorwärts brächte, müßten wir Dampf von über 100 Atm. bei 800°C verwenden. Aber der Anwendung dieser hohen Drücke und Temperaturen stellt sich die Materialschranke in den Weg. Es gelingt uns bis heute noch nicht, Werkstoffe herzustellen, die bei diesen hohen Temperaturen eine genügende Festigkeit besitzen, um hohen Drücken, Fliehkräften und Wärmespannungen Widerstand zu leisten. Das viel bearbeitete Gasturbinenproblem ist in letzter Linie ein Werkstoffproblem. Ebenso verhält es sich bei all den Aufgaben, wo wir die Energie auf besonders wirtschaftliche Weise ausnützen wollen. Unser Bemühen scheidet dabei immer wieder an den ungenügenden Materialeigenschaften, denn bei diesen Aufgaben brauchen wir entweder ganz hohe Drücke oder höchste Luftleeren, ganz hohe Temperaturen oder äußerst niedrige Temperaturen, ganz hohe elektrische Spannungen usw. Hierfür sind aber die heutigen Werkstoffe immer noch nicht geeignet.

Wir sehen also, daß wir in der modernen Maschinentechnik bei unserem Suchen nach neuen wirtschaftlichen

Möglichkeiten immer wieder auf die Werkstoffschranke stoßen. Wir dürfen uns daher nicht nur darauf beschränken, die allgemeinen physikalischen Gesetze der Arbeitsvorgänge zu studieren, sondern wir müssen uns auch eingehende Kenntnis von den Werkstoffen verschaffen.

III. Die Metalle als Konstruktionswerkstoffe und ihre Prüfung auf Verwendbarkeit.

1. Allgemeines über Metalle und Legierungen.

Schon bei oberflächlicher Betrachtung findet man, daß die Maschinen in der Hauptsache aus Metallen bzw. deren Legierungen bestehen. Diese bilden das Gerippe der Maschinen und sind dem Knochengerüste im menschlichen Körper zu vergleichen. In ihrem Innern vollziehen sich die physikalischen Vorgänge und werden die Energien umgewandelt. Energieumwandlungen sind aber mit Kräften und Bewegungen verknüpft. Die Metalle haben daher die Kräfte und Geschwindigkeiten in den Maschinen zu vermitteln, sie unterliegen also mechanischen Beanspruchungen. Wir verwenden die Metalle und Legierungen hauptsächlich, ja fast ausschließlich wegen ihrer vorzüglichen Festigkeitseigenschaften, weil sie besser als alle anderen Stoffe mechanische Beanspruchungen aushalten können. Daneben sind es noch andere Eigenschaften, die uns die Metalle bevorzugen lassen, z. B. ihre Unveränderlichkeit mit der Zeit, ihre verhältnismäßige Widerstandsfähigkeit gegenüber Wärme und Kälte usw.

Reine Metalle werden in der Technik, insbesondere im Maschinenbau nur selten verwendet, weil ihre Festigkeit

für die Zwecke des Konstrukteurs in der Regel nicht ausreicht. Man sucht daher, durch Zusammenschmelzen von zwei oder mehreren Metallen neue metallische Körper mit Eigenschaften zu erhalten, die die Zwecke der Konstruktion besser erfüllen. Solche Körper nennt man Legierungen (vom italienischen Wort lega = Vereinigung). Legierungen sind ihrem Wesen nach sogenannte feste Lösungen. Dieser Begriff wurde zuerst von van't Hoff begründet. Man nennt sie feste Lösungen deshalb, weil sie die gleichen physikalischen Eigenschaften haben, wie die uns geläufigen flüssigen Lösungen von festen Stoffen in Flüssigkeiten oder von Flüssigkeiten ineinander. Sie unterscheiden sich von den flüssigen Lösungen nur darin, daß sie bei gewöhnlicher Temperatur meistens bereits erstarrt sind. Die einzelnen Bestandteile einer solchen Lösung können in beliebigen Mengenverhältnissen vorhanden sein. Die Zusammensetzung kann gleichmäßig oder ungleichmäßig sein. Innerhalb der festen Lösung findet ebenso wie innerhalb einer flüssigen Lösung ein Ausgleich und somit eine Wanderung der einzelnen Bestandteile statt, und zwar, wenn die Temperatur hoch genug ist, mit ziemlicher Geschwindigkeit solange, bis ein gewisser Gleichgewichtszustand erreicht ist. Wenn man z. B. ein weiches kohlenstoffarmes Flußeisenstück in flüssiges Roheisen steckt, so beginnt der Kohlenstoff des Roheisens in das Eisenstück hineinzuwandern. Sobald der Kohlenstoff in die Oberfläche des Eisenstückes eingedrungen ist, ist er fest geworden und wandert nun als fester Körper in das Innere des Eisenstückes. Nehmen wir nach einiger Zeit das Eisenstück aus der Schmelze heraus, so hat es ganz andere Eigenschaften, es ist zu Stahl geworden, d. h. sein Kohlenstoffgehalt hat sich bedeutend vermehrt, seine Festigkeit und Härte, die ursprünglich ganz gering waren, sind bedeutend gestiegen.

Eine feste Lösung kann ebenso wie eine flüssige Lösung an dem gelösten Körper ungesättigt oder übersättigt sein. Ist sie übersättigt, so kristallisiert innerhalb des festen Körpers die betreffende Kristallart, an der sie übersättigt war, aus und bildet eine den ganzen Körper durchsetzende kristallinische Einlagerung, die sogenannten Mischkristalle.

2. Die Beanspruchungsarten der Metallegierungen und die Aufgaben der Festigkeitslehre.

Bei der Verwendung der Metallegierungen im Maschinenbau kommt es in erster Linie auf die Festigkeit an. Unter Festigkeit eines Körpers verstehen wir den Widerstand gegen die Formänderung und gegen die Trennung seiner kleinsten Teilchen. Die Abmessungen der Konstruktionsteile müssen so gewählt werden, daß kein Bruch eintritt. Hierzu muß man vor allem wissen, bei welcher Beanspruchung der Bruch der einzelnen Werkstoffe erfolgt. Es muß aber nicht nur der Bruch vermieden werden, sondern die Formänderung muß unter einem gewissen geringfügigen Maße bleiben. Es ist die Aufgabe der technischen Festigkeits- oder Elastizitätslehre, die Beanspruchungen in den Maschinen festzustellen und Methoden für ihre Berechnungen ausfindig zu machen. Zur Lösung dieser Aufgabe muß die Elastizität und Festigkeit des Werkstoffes durch Versuche erforscht sein. Es muß durch Erfahrung und Experimente bekannt sein, welche Beanspruchung und Formänderung unter den vielen Umständen des technischen Betriebes zulässig sind. Die in den Maschinen auftretenden Beanspruchungen können zweierlei Art sein, statische oder dynamische. Bei der statischen Beanspruchung ist die Kraft gleichbleibend oder nimmt nur ganz langsam zu oder ab, sie ist also praktisch ruhend. Bei der dynamischen Beanspruchung ist die auf

den Werkstoff einwirkende Kraft schnell veränderlich oder gar mit Stößen verbunden. Diese beiden Arten der Beanspruchung können unter verschiedenen Formen auftreten, je nachdem die Kräfte, die an den Maschinenteilen angreifen, den Werkstoff zu zerreißen, zerdrücken, knicken, biegen, abscheren oder zu verdrehen suchen. Man spricht daher von Zerreiß-, Druck-, Knick-, Biege-, Scher- und Verdrehungsfestigkeit. Die technische Festigkeitslehre sucht an einfachen mechanischen Gebilden die Wirkung dieser verschiedenen Beanspruchungen zu studieren. Man geht von den Verhältnissen an geraden Stäben aus und wendet die dort gewonnenen Lehren auf gekrümmte Stäbe, Platten, Ringe und Röhren an. Diese normalen Gebilde kommen fast bei allen Maschinenteilen in nahezu unendlicher Mannigfaltigkeit vor. Für verwickelte Fälle lassen sich häufig keine strengen Ansätze zur Bestimmung der Spannungsverteilung finden. Man ist dann auf angenäherte Rechnungen angewiesen, ja man muß sich häufig mit einer bloßen Abschätzung der Spannungsverhältnisse begnügen. Es gehört zu den schönsten Aufgaben der Konstruktionslehre, die Konstruktionen so einzurichten, daß sich die Spannungsverhältnisse einigermaßen überblicken lassen. Der Konstrukteur muß imstande sein, ein möglichst klares Bild der Beanspruchungen seiner Entwürfe geben zu können. Die technische Festigkeitslehre beschränkt sich auf umkehrbare Zustandsänderungen fester Körper im Gültigkeitsbereiche des Hooke'schen Proportionalitätsgesetzes. Sie nimmt bei ihren Betrachtungen zunächst auf die Besonderheiten des Werkstoffes gar keine Rücksicht, sondern setzt voraus, daß der Werkstoff gleichmäßig sei und nach allen Richtungen hin gleiche Festigkeitseigenschaften habe. In Wirklichkeit hat aber beinahe jeder Werkstoff in dieser Beziehung besondere Eigenschaften. Eine Stahlwelle, die doch als Muster von Gleich-

mäßigkeit erscheint, hat verschiedene Festigkeitseigenschaften in der Längs-, Tangential- und Radialrichtung. Dies hat seine verschiedenen Ursachen, die wir weiter unten kennenlernen werden. Die Festigkeitslehre, die mit isotropen, rein elastischen Körpern rechnet, genügt also nicht, um uns über das Verhalten mechanisch beanspruchter Maschinenteile überall Aufschluß zu geben. Wir müssen vor allem auch das Formänderungsvermögen der Metalle oberhalb der Elastizitätsgrenze kennenlernen. Bleibende Deformationen sind aber im Maschinenbau häufiger als man gewöhnlich annimmt. Zunächst kommen bei der Herstellung der Werkstoffe oft schon bleibende Formänderungen vor; es sei nur an das Kaltbearbeiten und dergleichen erinnert. Ferner beruht die Verarbeitung von Legierungen zu Maschinenteilen häufig auf bleibenden Deformationen. Aber auch da, wo die Werkstoffe rein elastisch beansprucht zu sein scheinen, treten häufig bleibende Formänderungen auf, weil es vollkommen elastische Legierungen überhaupt nicht gibt. Die Legierungen sind nur in erster Annäherung elastisch, viele überhaupt nicht. Wir müssen daher die Lehren der technischen Elastizitätslehre durch den Teil der Werkstoffkunde ergänzen, den wir nach dem Vorgang von P. Ludwik „Technologische Mechanik“ nennen wollen. Die technologische Mechanik ist eine ganz junge Wissenschaft und noch in voller Entwicklung begriffen. Sie sucht in erster Linie das Wesen der bleibenden Formänderung zu ergründen (innere Reibung, Fließen fester Körper), ferner die technologischen Grundeigenschaften (Härte, Zähigkeit und Schmeidigkeit, Sprödigkeit und Bildsamkeit), des weiteren die bei bleibenden Formänderungen, insbesondere beim Biegen, Stanzen, Walzen, Hämmern auftretenden Beanspruchungen mit besonderer Berücksichtigung der Formänderungswiderstände,

3. Die statischen Festigkeitsprüfungen.

a) Der Zerreißversuch.

Wenn wir bei einem Maschinenteil nach den Lehren der Festigkeit eine bestimmte Zugbeanspruchung ausgerechnet haben und hierfür einen bestimmten Werkstoff verwenden wollen, so müssen wir uns zuerst überzeugen, ob der Werkstoff die Beanspruchung auch mit Sicherheit aushält. Zu diesem Zweck nehmen wir den Zerreißversuch vor. Dieser ist in der Werkstoffprüfung der älteste und bis auf den heutigen Tag wichtigste Festigkeitsversuch. Durch ihn werden folgende Eigenschaften bestimmt, die für die Verwendung der großen Mehrzahl der aus Metallegierungen bestehenden Werkstoffe maßgebend sind: Zerreißfestigkeit, Dehnung, Einschnürung (Kontraktion), ferner Proportionalitätsgrenze, Elastizitätsgrenze und Streckgrenze. Den Zerreißversuch führen wir in der Weise aus, daß wir aus dem Werkstoff, aus dem der betreffende Maschinenteil angefertigt wird, einen Teil ausschneiden und daraus einen Stab von vorschriftsmäßigen, nach internationalem Übereinkommen geregelten Abmessungen anfertigen.

Wir sind berechtigt, kleine Stäbe von 5—20 mm Durchmesser zu verwenden, weil die Erfahrung gezeigt hat, daß die Zugfestigkeit eines Metalls praktisch gleich ist, ob man eine Stange von 5 oder 50 mm Durchmesser anwendet. Einen solchen Stab spannen wir in die Zerreißmaschine und setzen ihn einer allmählich steigenden Zugbelastung aus. Als Zerreistbe kommen sowohl Rund- als auch Flachstbe zur Verwendung, die letzteren besonders bei Blechen, Flachmaterialien, also bei Walzmaterial, das eine bestimmte Dicke nicht überschreitet,

Die Abmessungen der Probestäbe werden so gewählt, daß die Gleichung erfüllt ist:

$$\text{Meßlänge} = 11,3 \cdot \sqrt{\text{Querschnitt.}}$$

Bei Rundstäben, die am häufigsten vorkommen, bedeutet diese Gleichung einfach, daß die Meßlänge gleich dem 10fachen Stabdurchmesser ist. Wenn genügend Werkstoff vorhanden ist, wird die Meßlänge gewöhnlich zu 200 mm angenommen und der Querschnitt nach obiger Gleichung bestimmt, bei Rundstäben ergibt sich dann ein Durchmesser von 20 mm. Man nennt diesen Stab Normalstab im Gegensatz zum Proportionalstab, wo nur allgemein die obige Beziehung gilt, also bei 10 mm Stabdurchmesser sich 100 mm Meßlänge ergibt. Neuerdings, wo die praktische Materialprüfung bei jedem wichtigeren Maschinenteil fast in jeder größeren Maschinenfabrik durchgeführt wird, geht man aus Sparsamkeitsgründen vielfach auf den Kurzstab über, bei Rundstäben also auf 5fache Meßlänge. In der Zahlentafel 1, die der Abb. 1 beigelegt ist, sind die Abmessungen des Normalstabes und der gebräuchlichsten Proportionalstäbe für 5fache Meßlänge angegeben.

Belasten wir bei unserem Zerreißversuch die Maschine langsam, so beobachten wir, daß anfangs die Längenänderungen des Stabes im geraden Verhältnis mit den Belastungen zunehmen. Wir drücken diesen Vorgang durch das bekannte Hookesche Elastizitätsgesetz aus. Dieses lautet:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \sigma = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{F \cdot E}.$$

Hierin bedeuten ε = das Verhältnis der Längenzunahme Δl zur ursprünglichen Länge l_0 ,

α = die Dehnungszahl in cm^2/kg ,

$E = \frac{1}{\alpha}$ = Elastizitätsmodul in kg/cm^2 .

Der Elastizitätsmodul E beträgt für Stahl 2150000 kg/cm^2 .
Für Kupfer 1150000 kg/cm^2 .

P = angreifende Kraft in kg , F = Stabquerschnitt in cm^2 , $\sigma = \frac{P}{F}$ die Spannung oder Beanspruchung, bezogen auf die Flächeneinheit.

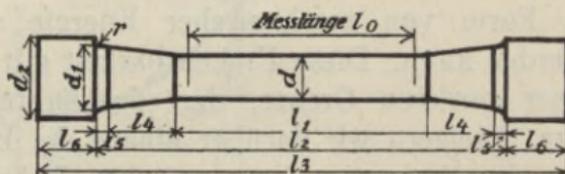


Abb. 1.

Zahlentafel 1.

Normal- und Proportionalstäbe für ZerreiBproben.
5 fache MeBlänge.

d	20	15	10	8	6	4
d_1	27	20	13	10	8	5
d_2	35	27	18	14	12	9
l_0	100	75	50	40	30	20
l_1	110	83	55	45	33	22
l_2	180	135	90	70	55	35
l_3	230	175	116	90	71	55
l_4	30	21	13	8,5	8,5	4,3
l_5	5	5	4,5	4	2,5	2,2
l_6	25	20	13	10	8	5
r	3	3	2	2	2	1

Gehen wir mit der Belastung wiederum zurück, so geht im gleichen Verhältnis die Längenänderung zu-

rück. Ist die Belastung $= 0$ geworden, so hat der Stab praktisch seine ursprüngliche Länge wieder angenommen. Wiederholen wir den Versuch, so zeigt sich das gleiche Verhalten. Wir nennen die Eigenschaft eines Werkstoffes, nach Entlastung wieder die ursprüngliche Länge anzunehmen, seine Elastizität. Ganz allgemein verstehen wir unter Elastizität die Fähigkeit eines Stoffes, Formänderungsarbeit in umkehrbarer Weise aufzuspeichern; wir beobachten nämlich bei unserem Stab, daß die Formänderungsarbeit, die von der äußeren Kraft geleistet wird, beim allmählichen Abtragen der Belastung wieder in Form von mechanischer Energie zurückgewonnen werden kann. Diese Umkehrbarkeit gilt aber nur bis zu einer gewissen Grenze, der sogenannten Elastizitätsgrenze. Steigern wir darüber hinaus die Belastung, so ist zwar die Proportionalität zwischen Dehnung und Belastung noch vorhanden, aber bei Entlastung verkürzt sich der Stab nicht mehr auf seine ursprüngliche Länge, es bleibt eine gewisse Restdehnung bestehen. Erhöhen wir abermals die Belastung, so hört die Proportionalität auf, die Dehnung nimmt merklich zu, sie wird vor allem bleibend, wir erreichen die sogenannte Fließ- oder Streckgrenze. Das Material beginnt zu fließen. Die Erreichung der Fließgrenze erkennt man in vielen Fällen schon mit dem bloßen Auge an dem Auftreten der sogenannten Fließfiguren auf der Oberfläche des Stabes. Außerdem nimmt nach Eintreten der Fließgrenze die Belastung an der Zerreißmaschine häufig sogar ab. Steigern wir die Belastung weiter, so nimmt die Dehnung immer mehr zu. Der Stab beginnt sich zu erwärmen. Wir erreichen die Bruchlast. Von jetzt ab nimmt die Belastung an der Zerreißmaschine ab, der Stab beginnt, sich an einer Stelle einzuschnüren und reißt schließlich auseinander. Abb. 2 zeigt den Zerreißvorgang. Die Beanspruchungen des Stabes sind in

Abhängigkeit von seiner Dehnung abgetragen. Punkt *E* stellt die Grenze der vollkommenen Elastizität dar. Bis Punkt *P* ist das Hookesche Geradliniengesetz erfüllt. Es sei gleich bemerkt, daß in der Technik gewöhnlich die Bestimmung dieser beiden Punkte nicht vorgenommen wird, weil sie schwierig und zeitraubend ist und sehr feine Meßwerkzeuge erfordert. Punkt *S* stellt die Streck- oder

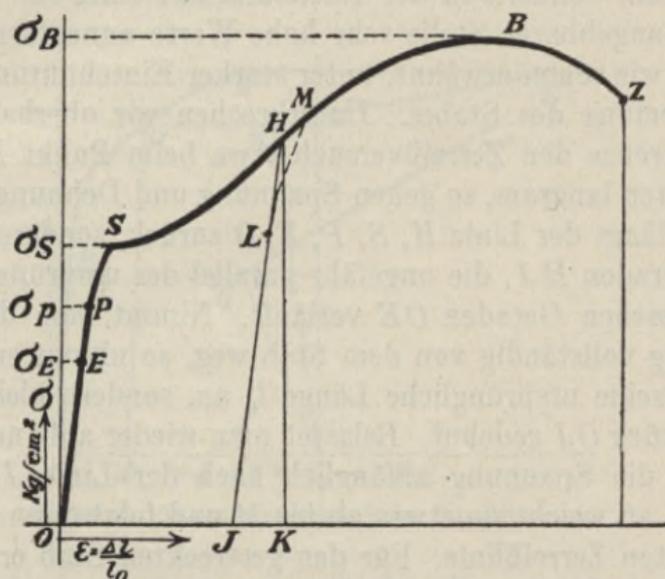


Abb. 2. Zerreißversuch. Spannungs-Dehnungs-Schaubild.

Fließgrenze dar, den Beginn der großen bleibenden Dehnung. Punkt *B* zeigt die höchste Beanspruchung, die der Stab vertragen kann. Man nennt sie Bruch-, Zug- oder Zerreißfestigkeit. Bei Punkt *Z* reißt der Stab auseinander. Was den Zerreißversuch oberhalb der Elastizitätsgrenze von dem unterhalb derselben unterscheidet, ist, daß von hier ab bleibende Dehnungen auftreten. Wir dürfen also unsere Maschinen höchstens bis zur Elastizitätsgrenze belasten, um keine bleibenden Dehnungen und damit Formänderungen zu erhalten. Aus Abb. 2 ersehen wir den sehr

verwickelten Verlauf der Kraftkurve oberhalb des Gültigkeitsbereiches des Hookeschen Elastizitätsgesetzes.

Wir folgern daraus, daß sich während des Fließens im Innern des Werkstoffes tiefgreifende Umwandlungen vollziehen. Wir erkennen diese schon daran, daß die Verlängerungen sich im Gegensatz zu der elastischen Formänderung nicht mehr gleichmäßig über den ganzen Stab verteilen, sondern in der Nachbarschaft einer im voraus nicht angebbaren Stelle sehr hohe Werte annehmen, und zwar, wie schon erwähnt, unter starker Einschnürung und Erwärmung des Stabes. Unterbrechen wir oberhalb der Fließgrenze den Zerreißversuch etwa beim Punkt H und entlasten langsam, so gehen Spannung und Dehnung nicht mehr längs der Linie H, S, P, E, O zurück, sondern längs der geraden HJ , die ungefähr parallel der ursprünglichen Hookeschen Geraden OE verläuft. Nimmt man die Belastung vollständig von dem Stab weg, so nimmt er nicht mehr seine ursprüngliche Länge l_0 an, sondern bleibt um das Stück OJ gedehnt. Belastet man wieder aufs neue, so steigt die Spannung anfänglich nach der Linie JH an, von L an weicht sie etwas ab bis M und folgt dann weiter der alten Zerreilinie. Für den gestreckten Stab erhalten wir also eine neue Hookesche Gerade; die neue Streckgrenze ist weiter nach oben gerückt. Die Zerreißfestigkeit ist geblieben, die verhältnismäßige Dehnung hat sich aber verringert.

Die grundsätzliche Verschiedenheit der Längenänderung eines Stabes unterhalb und oberhalb der Elastizitätsgrenze äußert sich auch in der Verschiedenheit der Stabtemperatur. In Abb. 3 ist der Temperaturverlauf beim Zerreißversuch dargestellt. Belastet man nämlich einen Stab, der die Temperatur der Umgebung T_0 haben möge, unterhalb der Elastizitätsgrenze, so dehnt er sich gemäß dem Hookeschen Gesetz aus, seine Temperatur nimmt aber

nach den theoretischen Überlegungen von Lord Kelvin und den Versuchen von E. Rasch (Berichte der Berliner Akademie 1908, S. 210) ein klein wenig ab, nämlich auf T_1 , was uns auf den ersten Blick verwunderlich erscheint. Nehmen wir die Last weg, so erwärmt sich der Stab wieder auf seine ursprüngliche Temperatur T_0 . Wir haben also eine adiabatische Zustandsänderung vor uns. Gehen wir aber mit der Belastung über die Elastizitäts- und Streck-

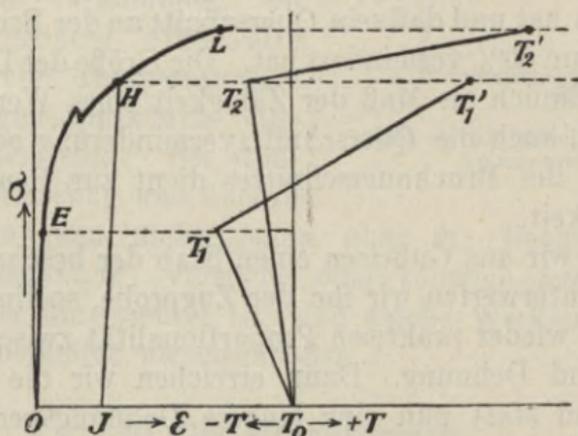


Abb. 3. Temperaturverlauf beim Zerreißvorgang.

grenze hinaus, etwa bis zum Punkte H , so kühlt der Stab sich anfänglich ab, erwärmt sich aber oberhalb der Elastizitätsgrenze über seine Ausgangstemperatur T_0 hinaus auf T_1 . Entlasten wir den Stab auf Null Punkt J , so nimmt er bald wieder seine ursprüngliche Temperatur T_0 an. Belasten wir wieder neu, so kühlt er sich wieder etwas ab, aber nicht mehr so weit wie ursprünglich, sondern nur auf T_2 , weil das Material nicht mehr die vollständige Elastizität besitzt wie zuerst. Belasten wir weiter, etwa bis L , so erwärmt er sich von T_2 auf T_2' . Wir sehen also, daß Zugbeanspruchung unterhalb der Elastizitätsgrenze mit adiabatischer Abkühlung, oberhalb der Elastizitäts-

grenze dagegen nicht mit Abkühlung, sondern mit Erwärmung vor sich geht.

Der Verlauf der Spannungsdehnungskurve ist für verschiedene Werkstoffe verschieden. Ähnlich wie in Abb. 2 angegeben, geht der Zerreißversuch bei den ausgesprochenen dehnbaren Werkstoffen, wie Flußstahl, Stahlguß, Kupfer, Messing usw. vor sich. Vergleichen wir die Länge des Stabes nach dem Bruch mit seiner ursprünglichen Länge, so finden wir, daß diese beispielsweise um 25% zugenommen hat und daß sein Querschnitt an der Bruchstelle sich z. B. um 60% vermindert hat. Die Größe der Dehnung wird gewöhnlich als Maß der Zähigkeit eines Werkstoffes betrachtet, auch die Querschnittsverminderung oder Einschnürung des Bruchquerschnittes dient zur Beurteilung der Zähigkeit.

Formen wir aus Gußeisen einen Stab der beschriebenen Art und unterwerfen wir ihn der Zugprobe, so finden wir anfänglich wieder praktisch Proportionalität zwischen Belastung und Dehnung. Dann erreichen wir die Streckgrenze, und statt nun eine längere Dehnungsperiode zu erhalten, reißt der Stab plötzlich ab. Er erwärmt sich nicht, schnürt sich nicht ein und hat nur eine sehr kleine Bruchdehnung. Die gleiche Eigenschaft, d. h. eine geringe Dehnung finden wir bei Zink und anderen Metallen, ebenso auch bei den oben angefuhrten sogenannten dehnbaren Metallegierungen, wenn sie nicht sachgemäß hergestellt sind. Wir bezeichnen solche Materialien im Gegensatz zu den früher beschriebenen als spröde, und zwar deshalb, weil sie kein Verformungsvermögen besitzen, sondern bei Belastung gleich nach Überschreitung der Streckgrenze abbrechen. In Abb. 4 ist der Zerreißversuch an einem Zylindergustab dargestellt. Das Material ist Spezialgueisen und hat für Gußeisen eine sehr gute Zerreißfestigkeit. Trotzdem kann es wegen seiner geringen

Dehnung für stoßweise Belastung nicht verwendet werden. Ein Spannungsdehnungsverlauf eines Werkstoffes, wie in Abb. 4 angegeben, ist für jeden gewissenhaften Konstrukteur ein Zeichen, daß dieser Werkstoff mit großer Vorsicht zu gebrauchen ist. Er darf nur da verwendet werden, wo ruhende Belastungen vorkommen, wo Stöße, größere Fliehkräfte und rasche Temperaturveränderungen praktisch ausgeschlossen sind. Bei stoßweiser Belastung und überall dort, wo man nicht genau über die Beanspruchung durch Rechnung, Versuche oder sonstige ausreichende Erfahrung unterrichtet ist, sind solche Werkstoffe unter allen Umständen auszuschließen.

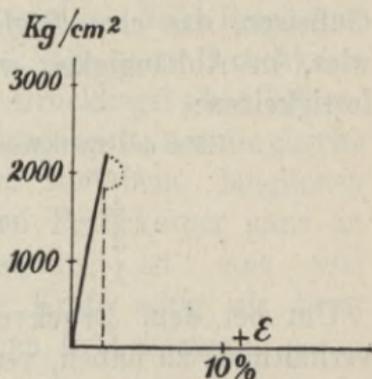


Abb. 4. Zerreißschaubild eines Gußeisenstabes.

b) Der Druckversuch.

Der statische Druckversuch, die Umkehrung des Zugversuches, der im Bauwesen bei der Prüfung von Steinen, Beton usw. eine große Rolle spielt, wird im Maschinenbau, wo hauptsächlich Metalle verwendet werden, nur selten ausgeführt. Dies rührt daher, daß fast alle Legierungen statische Druckbeanspruchungen sehr leicht ertragen können, ohne daß Brüche auftreten. Gewöhnlich wird nur bei Gußeisen und Lagermetallen der Druckversuch vorgenommen.

Die Druckfestigkeit ist abhängig von der Form des Probekörpers. Sie ist für einen Probekörper mit einem kreisförmigen Querschnitt größer als für einen solchen mit einem quadratischen Querschnitt. Außerdem ver-

ändert sich die Druckfestigkeit mit der Höhe des Versuchskörpers. Sie wächst mit abnehmender Höhe der Probe. Bach fand bei einem 2 cm dicken Zylinder aus Gußeisen, das eine Zugfestigkeit von $18,6 \text{ kg/mm}^2$ aufwies, in Abhängigkeit von der Höhe folgende Druckfestigkeiten:

Höhe des Zylinders <i>h</i> cm	Druckfestigkeit in kg/mm^2
4	72
2	75
1	86

Um bei dem Druckversuch immer ähnliche Bezugsverhältnisse zu haben, verwendet man gewöhnlich Würfel oder Zylinder, deren Höhe gleich dem Durchmesser ist.

Man kann sich die merkwürdige Erscheinung, daß sich bei höheren Probekörpern eine geringere Druckfestigkeit ergibt, durch die Bildung von sogenannten Rutsch- oder besser Druckkegeln erklären. Da beim Druckversuch die Auflagefläche naturgemäß härter sein muß als der Probekörper, so kann man sich denjenigen Teil des Probekörpers, der mit den Auflageflächen in Berührung steht, und den sich daran anschließenden kegelartig sich verjüngenden Teil unter stärkeren Einfluß der Auflageflächen befindlich denken. Mit zunehmendem Druck bohren sich diese Druckkegel in das übrige Material des Probekörpers hinein und suchen es auseinander zu sprengen. Haben wir nun einen länglichen Probekörper (siehe Abb. 5), so beobachten wir folgendes: die außerhalb des Druckkegels sich befindenden Teile des Probekörpers bilden Ringe und werden durch die Sprengwirkung der Druckkegel auf Zug beansprucht. Das Material baucht sich also in der Mitte tonnenförmig auf, bis sein Dehnungsvermögen erschöpft ist. Bei sprödem Material, das nur ein begrenztes Dehnungsvermögen besitzt, wird jedoch ziemlich bald der Probekörper durch die Druckkegel auseinander gesprengt.

Anders dagegen verhalten sich die kurzen Probekörper beim Druckversuch (siehe Abb. 6). Hier berühren sich die Druckkegel von Anfang an nahezu oder ganz. Sie können also nicht das übrige Material wie beim länglichen Probekörper auseinander sprengen. Die ganze Druckkraft wird daher dazu verbraucht, die Druckkegel abzuflachen. Wir benötigen eine viel größere Druckkraft, um die gleiche Zusammendrückung zu erzielen wie beim länglichen Probekörper. Um schließlich den Probekörper ganz zu zertrümmern, ist eine viel größere Kraft nötig als beim länglichen Probekörper.

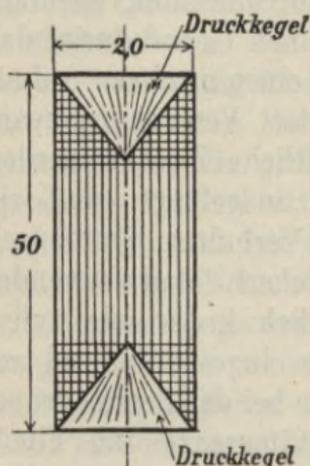


Abb. 5. Druckprobe.
Langer Probekörper.

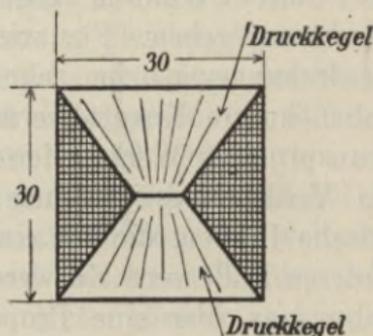


Abb. 6. Druckprobe.
Kurzer Probekörper.

Der Druckversuch ist trotz der großen Einfachheit in der Ausführung vom wissenschaftlichen Standpunkt aus noch am wenigsten geklärt. Soviel ist aber sicher, daß beim Druckversuch das Material nicht nur auf Druck, sondern auch auf Zug und Schiebung beansprucht wird. Wenn diese Verhältnisse einmal hinreichend untersucht sind, besteht sogar die Möglichkeit, daß man mittels eines einfachen Druckversuches auch die Bruchfestigkeit und Dehnung bestimmen kann. Dies wäre von großem Vorteil, weil der Druckversuch sehr einfach ist und wenig Werk-

stoff benötigt. Es wäre dann nicht nur möglich, aus dem kleinsten Werkstoffstückchen noch brauchbare Probekörper herzustellen, sondern man würde in Zukunft mit kleineren billigeren Festigkeitsmaschinen auskommen. Neben der Verringerung an Material- und Anschaffungskosten würde außerdem eine erhebliche Ersparnis an Löhnen für das Herrichten der Proben erzielt werden.

c) Die Verdrehungsprobe.

Die Verdrehungsprobe wird in der Technik ebenfalls nur selten angewendet. Dies hat seinen Grund darin, daß die Ergebnisse des Zerreiversuches einen gewissen Anhalt über das Verhalten gegenüber der Verdrehungsbeanspruchung geben. Für wissenschaftliche Zwecke werden Verdrehungsversuche sehr häufig ausgeführt, und sie haben unsere Kenntnisse über das Verhalten mechanisch beanspruchter Werkstoffe sehr bereichert. Man verwendet bei Verdrehungsversuchen gewöhnlich kreisrunde zylindrische Proben, die am einen Ende eingespannt und am anderen Ende verdreht werden. Wie bei der Zerreißprobe, kann man hier eine Proportionalitätsgrenze und Fließgrenze feststellen, nur sind diese Grenzen nicht so deutlich wie bei der Zerreißprobe. Dies kommt daher, daß beim Verdrehen die Torsionsbeanspruchung von der Achse des Stabes bis zum Mantel von Null bis zu einem Höchstwert ansteigt. Wenn nun außen an der Oberfläche die Fließgrenze erreicht wird, so ist innen im Kern die Beanspruchung noch unterhalb der Elastizitätsgrenze. Nach Überschreitung der Fließgrenze an der Oberfläche hört die ursprüngliche lineare Spannungssteigerung von innen nach außen auf. Die inneren Teile beteiligen sich allmählich stärker an der Verdrehungsbeanspruchung. Ein weiterer Unterschied gegenüber der Zerreißprobe ist auch der ununterbrochene Belastungsanstieg bis zum Bruch. Das Ver-

drehungsschaubild ist daher eher mit dem der effektiven Zug- und Druckbeanspruchung vergleichbar, als mit dem gewöhnlichen Zerreißschaubild.

d) Die Biegeprobe.

Der Biegeversuch wird gewöhnlich so durchgeführt, daß die stabförmige Probe an den Enden auf zwei Rollen gelagert und in der Mitte belastet wird. Das Biegemoment erreicht also seinen größten Wert nur im belasteten Querschnitt und nimmt geradlinig nach den beiden Auflageenden zu ab. Die größte Biegungsspannung tritt nicht gleichmäßig im ganzen Querschnitt auf, sondern nur in den äußersten Fasern; während bei den Zerreiß- und Druckproben die größte Spannung gleichmäßig auf den gesamten Querschnitt und die gesamte Länge des Stabes verteilt ist und bei der Verdrehungsprobe die äußerste Zylindermantelschicht ringsum gleichmäßig von der größten Schubspannung beansprucht wird, werden bei der Biegeprobe nur die von der neutralen Zone am weitesten entfernten äußeren Fasern auf Zerreißen beansprucht. Sind also in einem Probestabe Materialfehler vorhanden, so besteht die größte Wahrscheinlichkeit der Aufdeckung bei der Zugprobe; denn hier tritt die maximale Beanspruchung gleichmäßig in der ganzen Stablänge und im ganzen Querschnitt auf. Bei der Verdrehungsprobe werden Materialfehler längs des Stabes aber nur in den äußeren Mantelschichten an der Oberfläche entdeckt, nicht aber im Innern des Probestabes. Am ungünstigsten verhält sich in dieser Beziehung die Biegeprobe. Hier tritt die maximale Beanspruchung nur in der Mitte des Stabes und da nur an den untersten äußeren Fasern auf. Materialfehler werden also nur mit geringer Wahrscheinlichkeit entdeckt. Dagegen bietet die Biegeprobe den Vorteil, daß man schon mit ganz kleinen Kräften große Biege-

spannungen erzeugen kann. Die dehnbaren Metallegierungen können durch die gewöhnliche Biegeprobe nicht zum Bruch gebracht werden,

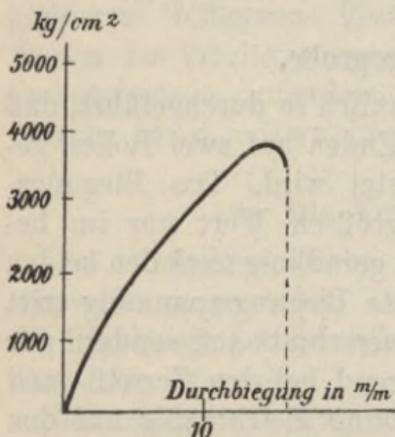


Abb. 7. Biegeschaubild eines Gußeisenstabes.

sondern sie lassen sich zusammenschieben ohne zu brechen. In der Regel wird die Biegeprobe in der praktischen Werkstoffprüfung nur bei sprödem Material angewendet und besonders bei Gußeisen. Die Vorschriften für die Lieferung von Gußeisen verlangen Probestäbe von 30 mm Durchmesser bei 600 mm Stützweite. Man mißt neben der Belastung beim Bruch auch noch die Größe der Durch-

biegung beim Bruch. Diese ist ein Maßstab für die Zähigkeit des Gußeisens. In Abb. 7 ist solch ein Biegeschaubild eines Zylindergußeisenstabes dargestellt.

4. Die dynamischen Festigkeitsprüfungen.

a) Allgemeines über die dynamische Beanspruchung. Die Kerbwirkung.

Die meisten Konstruktionsteile des Maschinenbaues werden nicht durch ruhende gleichbleibende Belastung beansprucht, sondern durch eine solche, deren Größe fortwährend und dabei während sehr kurzer Zeit sich verändert. In vielen Fällen wechselt die Beanspruchung sogar innerhalb einer Sekunde vielmals zwischen der größten Zug- und Druckbeanspruchung. Dies ist z. B. der Fall bei einer Turbinen- und Pumpenwelle oder bei

sonst einer rasch laufenden Maschine. Läuft eine Turbine mit 3000 Umdr./Min., so werden die äußeren Fasern der Welle infolge der Durchbiegung in der Sekunde 50mal auf Zug- bzw. Druck beansprucht. Etwas Ähnliches tritt bei langen Wellenleitungen, wie z. B. bei Schiffswellen auf, die von Dampfmaschinen oder Dieselmotoren, also von Maschinen mit wechselndem Drehmoment angetrieben werden. Wir haben es hier mit Gebilden zu tun, bei denen Verdrehungsschwingungen entstehen können. In einem solchen Falle werden die äußeren Fasern der Welle mehrmals in der Sekunde, das eine Mal nach rechts, das andere Mal nach links verdreht. Man erkannte schon ziemlich frühzeitig, daß derartige Belastungsfälle die Werkstoffe viel mehr beanspruchen als die ruhende Belastung; denn bei solchen wechselnden Belastungen treten viel häufiger Brüche auf als bei ruhender Belastung, es sei nur an die vielen Brüche von Fahrzeugwellen, Kolbenstangen, Kurbelstangen und Kurbelzapfen erinnert. Die ersten Versuche über den Einfluß der wiederholten Belastung hat Wöhler angestellt. Bauschinger hat diese Versuche später in vervollkommneter Weise ausgeführt. Er fand, daß die „Schwingungsfestigkeit“, also jene größte Beanspruchung, die bei Wechsel zwischen Zug und Druck gerade noch beliebig oft (d. h. mindestens mehrere Millionen Mal) ertragen werden kann, ungefähr mit der Elastizitätsgrenze übereinstimmt. Stribeck gibt als obere Grenze, bei der ein Werkstoff praktisch unbegrenzt lebensfähig ist, folgende Beanspruchung an:

$$\sigma_d = 0,57 \frac{\sigma_S + \sigma_B}{2}.$$

Hierbei bedeuten:

σ_S = Streckgrenze, σ_B = Bruchfestigkeit.

Man legt in neuerer Zeit den Festigkeitsrechnungen nicht mehr die Zerreißfestigkeit zugrunde, sondern viel-

mehr die Streckgrenze, weil diese in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Elastizitätsgrenze steht. Man läßt für Konstruktionen, die gleichsinnig wirkenden Belastungsschwankungen ausgesetzt sind, als Höchstbeanspruchung gewöhnlich die Hälfte der Streckgrenze des Materials zu. Man ist dann sicher, die Elastizitätsgrenze nicht zu überschreiten. Für Maschinenteile, die Belastungen mit Vorzeichenwechsel, also bei Biegungsbeanspruchungen Schwankungen zwischen Zug und Druck ausgesetzt sind, wählt man einen größeren Sicherheitsgrad. In diesem Falle soll die Summe der Absolutbeträge der größten und kleinsten Spannungen höchstens 50% der Streckgrenze betragen.

Der gefährliche Einfluß der wechselnden Belastung wird durch zwei Umstände noch besonders erhöht. Zunächst sind diese Spannungswechsel um so bedenklicher, je stoßweiser sie vor sich gehen und ferner, wenn sogenannte Kerbwirkung vorhanden ist. Kerbwirkung tritt auf, wenn die Konstruktionsteile durchbohrt sind, wenn starke Querschnittveränderungen, scharfe Übergänge, Ecken, Kanten, Keilnuten vorkommen. Die Beanspruchung, die kennzeichnend für die Kerbwirkung ist, nämlich ein schroffes örtliches Anschwellen der Spannung, kommt viel häufiger vor, als man gewöhnlich annimmt. Sie tritt nicht nur bei plötzlichen Querschnittsänderungen auf, wozu z. B. auch die Verdickung von Achsen und Wellen durch die Naben aufgesetzter Räder gehört, sondern besonders auch bei schroffen Richtungswechseln des Energiestromes, z. B. bei gekröpften Wellen usw. Die neuere Konstruktionspraxis ist schon längst dazu übergegangen, solche scharfe Ecken und Kerben nach Möglichkeit zu vermeiden, weil man erkannt hat, wie gefährlich diese unter Umständen werden können. Aber überall läßt sich diese Vorsicht nicht durchführen, ohne den Konstruktionen

Gewalt anzutun. Wir müssen manchmal das Material durchbohren, Keilnuten fräsen und scharf absetzen. Wir müssen uns daher auch klar zu werden versuchen, welche Folgen dies für unsere Konstruktion haben kann. Wir wissen aus Erfahrung, daß die Schmiede schon von alters her eine Stahlstange, von der sie ein Stück abtrennen wollen, zuerst mit einem spitzen Kerb versehen und dann mit dem Hammer dagegenschlagen mit dem Erfolg, daß in der Regel schon beim ersten Schlag die Stange entzweibricht. Wollten wir ein ungekerbtes Stahlstück des gleichen Querschnitts, ja sogar ein viel schwächeres mit Schlägen abzutrennen versuchen, so würden wir bei dehnbarem Material keinen Erfolg damit haben. Wir würden keinen Bruch erzielen, sondern höchstens das Stück verbiegen. Daraus folgt, daß durch die Kerbung eine große Anstrengung des Materials hervorgerufen wird. Diese Anstrengung erreicht oft schon die Bruchgrenze des Materials, während beim ungekerbten Stab diese noch lange nicht erreicht ist. Um das Wesen der Kerbwirkung klarer darzulegen, wollen wir von der Einwirkung einer Kerbe auf ein statisches Spannungsfeld ausgehen. Wir betrachten zunächst einen zylindrischen Stab aus sprödem Werkstoff, etwa Gußeisen, den wir in der Mitte, wie in Abb. 8 angegeben, mit einer Kerbe versehen. Das Gußeisen möge 15 kg/mm^2 Bruchfestigkeit haben, wie wir durch Versuche an zylindrischen, ungekerbten Stäben festgestellt haben. Belasten wir nun den gekerbten Stab, so bricht er selbstverständlich in der Kerbe durch; wir finden aber, daß der Stab schon bei einer etwas geringeren Festigkeit als 15 kg/mm^2 bricht. Man nahm ursprünglich an, daß dies jedenfalls von einer zufälligen Ungleichmäßigkeit des Materials, etwa von einer Schlacke, herrühren müsse. Als man jedoch die Sache näher untersuchte, ergab sich, daß dies auch bei ganz gesundem Material eintritt. Man schloß daher,

daß die Kerbe die gleichmäßige Spannungsverteilung über den ganzen Querschnitt, die bei dem ungekerbten, zylindrischen Stabe vorhanden ist, stört, daß also örtliche Spannungserhöhungen auftreten, die weit über den Mittelwert hinausgehen. Dies ist in der Tat auch der Fall, wie theoretische Untersuchungen und später auch praktische Feinmessungen ergaben. In Abb. 8 ist der Spannungs-

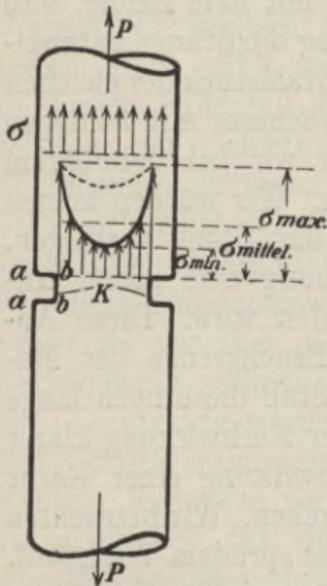


Abb. 8. Spannungsverteilung in einem gekerbten Zugstab.

verlauf an der Kerbe zeichnerisch eingetragen. Beeinträchtigt eine Kerbe die Festigkeit eines spröden Materials schon bei statischer Beanspruchung, so ist dies noch viel mehr der Fall bei schwingender oder gar stoßweiser Belastung. Wir können mit relativ schwachen Kräften den Stab zum Bruch bringen.

Wie verhält sich nun ein dehnbarer Werkstoff gegenüber der Kerbwirkung? Fertigen wir den gleichen Stab etwa aus weichem Flußstahl von 40 kg/mm^2 Bruchfestigkeit und 30% Dehnung und belasten ihn wieder langsam, so finden wir, daß der Stab in der

Kerbe bricht, weil hier sein Querschnitt am schwächsten ist, aber wir stellen die merkwürdige Erscheinung fest, daß die Bruchfestigkeit nicht mehr 40 kg/mm^2 beträgt, sondern auf über 50 kg/mm^2 angestiegen ist. Es tritt also der umgekehrte Fall ein wie bei sprödem Material. Der zähe Flußstahl scheint fester geworden zu sein. Wir haben eine ähnliche Spannungsverteilung wie beim spröden Material. Im Kerbgrund ist die Spannung viel größer als in der Mitte. Belasten wir den Stab, bis wir im Kerbgrunde die Fließgrenze

erreicht haben, so beginnt hier das Material langsam zu fließen. Wir haben aber schon weiter oben gefunden, daß gerecktes, über die Fließgrenze beanspruchtes Material verfestigt wird. Die äußeren Teile am Kerbgrund sind also verfestigt worden und halten nunmehr die weitere Beanspruchung leicht aus, ohne sich besonders zu dehnen. Dadurch werden die inneren Teile des Stabes mehr zur Belastungsaufnahme herangezogen und beginnen ebenfalls zu fließen. Dieser Vorgang schreitet allmählich bis zur Mitte des Stabes vor und wir erhalten am Schlusse eine nahezu gleichmäßige Spannungsverteilung (in Abb. 8 punktiert eingezeichnet). Dadurch kommt es, daß das Material durch die Einkerbung eine höhere Festigkeit erhalten hat. Wir dürfen uns aber nicht verleiten lassen, bei dehnbarem Werkstoff Kerbwirkung anzustreben; denn bei schwingender und noch mehr bei stoßweiser Belastung wirken auch hier die Kerben sehr schädlich, weil das Material nicht so schnell der Verformung folgen kann. Wir machen oft die unangenehme Erfahrung, daß Werkstoffe mit hoher Dehnung gegenüber stoßweiser Beanspruchung, namentlich bei vorhandenen Kerben, sich wie sprödes Material verhalten. Wir können von der Tatsache, daß dehnbare Materialien bei Kerbwirkung verfestigt werden, im Maschinenbau fast nie Gebrauch machen, da schwingende Beanspruchung oder Stöße wider Erwarten fast bei allen Maschinen vorkommen können. Kerbwirkung kann aber bei einem Maschinenteil auch vorhanden sein, ohne daß wir es wissen, ohne daß wir etwa ein Loch gebohrt oder eine Keilnute gefräst haben. Dies ist dann der Fall, wenn das Material nicht gleichmäßig ist, wenn kleine Lunker, Seigerungsstellen oder Schlackeneinschlüsse vorhanden sind. Diese wirken immer wie eine Kerbe, weil sie an der Festigkeitsübertragung sich nicht beteiligen können. Wir erkennen daraus,

wie wichtig es ist, darauf zu sehen, nur lunkerfreies Material ohne fremde Einschlüsse zu verarbeiten. Der Sicherheit halber müssen wir bei unseren normalen Konstruktionen damit rechnen, daß doch eine schlechte Stelle im Werkstoff vorhanden sein kann. Bei den Konstruktionen mit höchster Beanspruchung dagegen muß durch sorgfältige Auswahl des Werkstoffes, Lieferwerkes und durch strengste Prüfung des Werkstoffes und fertigen Maschinenteiles erreicht werden, daß schlechtes ungleichmäßiges Material nicht verwendet wird. Wir wissen heute mit ziemlicher Sicherheit, daß Kerben bei dehnbaren Werkstoffen und schwingender oder stoßweiser Belastung so lange nicht gefährlich sind, als im Kerbgrund die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird. In diesem Falle kann also ein Maschinenteil beliebig viele Belastungswechsel ertragen. Bei sprödem Material jedoch sind Kerben bei wechselnder Belastung immer gefährlich, weil spröde Werkstoffe keine ausgesprochene Elastizität haben und sich schon bei kleinen Beanspruchungen unelastisch verhalten. Die Schwierigkeit bei Maschinenteilen mit Kerben besteht darin, daß man die Beanspruchung im Kerbgrunde nicht ohne weiteres berechnen kann. Man muß sich hierfür mit bloßen, gefühlsmäßigen Abschätzungen begnügen. Die Spannungsverteilung bei Kerben zu berechnen, ist bisher schon mehrfach versucht worden, aber ohne praktischen Erfolg, weil man noch keinen einwandfreien Ansatz gefunden hat und die mathematischen Schwierigkeiten zum Teil sehr groß sind. Weiter haben die praktischen Meßversuche von Preuß und Léon geführt. Preuß hat bei eingekerbten und durchlochten Zugstäben den Einfluß der verschiedenen Kerben untersucht (VDJ. 1912 und 1913). Unter Zugrundelegung der Preußschen Messungen kann man ein graphisches Rechnungsverfahren ausarbeiten, welches gestattet, die Spannung bei gekerbten Zugstäben

für alle möglichen Fälle zu bestimmen. Man zeichnet hierbei Linien gleicher Formänderung auf. An den Stellen, wo sich diese Linien am meisten nähern, treten die höchsten Beanspruchungen auf, es sind dies natürlich die Kerbstellen. Die Spannung ist indirekt proportional der Entfernung dieser Linien. Durch die Einkerbung wird das Material an der gleichmäßigen Ausdehnung gehindert. An den Ecken $a-a$ der Abb. 8 kann sich das Material nicht dehnen, die ganze Dehnung vollzieht sich an der Kerbe $b-b$; die Strecke $b-b$ wird aber durch die versteifende Wirkung von $a-a$ an der freien Ausdehnung gehindert, dadurch entsteht eine zusätzliche Spannungserhöhung. Je tiefer und je schmaler die Kerbe ist, desto größer die Abweichung der größten Spannung im Kerbgrunde von dem Spannungsmittelwert. Durch Verlängerung der Kerbe, also Vergrößerung der Strecke $b-b$, wird bei gleicher Kerbtiefe die Wirkung der Kerbe verringert. Die Kerblänge Null, also der ganz scharfe Einschnitt, kommt in Wirklichkeit wohl nicht vor. Für ihn müßte die zusätzliche Kerbspannung sehr stark anwachsen. Am meisten nähert sich diesem Grenzfall der Spitzkerb. Bei ihm ergeben sich bedeutende Spannungserhöhungen.

Am häufigsten kommt die Kerbwirkung bei Maschinenteilen vor, die auf Biegung beansprucht sind. Hier kann die Kerbung deshalb so verhängnisvoll werden, weil in den äußersten Fasern, die an sich auch ohne das Vorhandensein einer Kerbe am höchsten beansprucht sind, durch das örtliche Anschwellen der Spannung an der Kerbe die Beanspruchung noch gesteigert wird. Dies ist der Fall bei allen abgesetzten oder mit Keilnuten versehenen Wellen. Da bei Wellen häufig noch veränderliche Verdrehungsbeanspruchungen vorkommen, so gehören diese Maschinenteile zu den höchst beanspruchten und es kommen Wellen-

brüche ziemlich häufig vor, wenn die Kerbwirkung nicht richtig berücksichtigt wird.

Während bei der statischen Beanspruchung der Bruch eines Werkstoffes durch die absolute Größe der Beanspruchung hervorgerufen wird, kommt es bei der dynamischen Beanspruchung hauptsächlich auf die Veränderlichkeit der Spannung an. Dabei kann das Material entweder durch die Geschwindigkeit und Größe der Kraftwirkung, also durch Stöße zum Bruch gebracht werden, oder es kann bei kleineren Geschwindigkeiten und Kräften, aber durch fortwährende Wiederholung der Beanspruchung der Bruch herbeigeführt werden. Entsprechend diesen Beanspruchungsarten werden zwei verschiedene Fälle von dynamischen Prüfmethoden unterschieden: die Schlagproben und Dauerprüfungen.

b) Die Schlagproben.

Das Wesentliche bei der Schlagprobe ist, daß die Kraft stoßweise angreift und daß jeder Stoß das Material über die Elastizitätsgrenze beansprucht. Es genügen also wenige oder gar nur ein Schlag, um den Bruch des Werkstoffes herbeizuführen. Derartige Beanspruchungen kommen im normalen Betriebe nicht vor, höchstens bei Betriebsunfällen; denn sie führen gewöhnlich zur Zerstörung oder wenigstens zum Unbrauchbarwerden der betreffenden Maschinenteile. Obwohl also eigentlich schlagartige Beanspruchungen, die über die Elastizitäts- bzw. Fließgrenze hinausgehen, im Betriebe praktisch ausgeschlossen sind, so werden sie doch im Laboratorium häufig ausgeführt, und zwar besonders bei Werkstoffen, die einer hohen Beanspruchung ausgesetzt sind. Man hat nämlich die Erfahrung gemacht, daß die Schlagprobe ein viel besseres Maß für die Zähigkeit des Werkstoffes bildet als die Bruchdehnung. Es ist schon schon häufig vorgekommen, daß

Werkstoffe, die eine hohe Dehnung aufwiesen, selbst bei Belastungen versagt haben, die nur geringen und langsamen Änderungen unterworfen waren. Man hat dann in der Regel gefunden, daß solche Werkstoffe gegenüber Schlägen sehr empfindlich waren. Es ist eine oft beobachtete Tatsache, daß ein Stahl so spröde ist, daß ein schwacher Schlag mit dem Hammer ausreicht, um einen größeren Querschnitt zu durchbrechen, obwohl er bei der statischen Probe eine hohe Dehnung und Einschnürung aufweist und sich überhaupt verhält wie gutes, zähes Material. Bei falscher chemischer Zusammensetzung oder unsachgemäßer Wärmebehandlung verhält sich Stahl ähnlich wie jene Werkstoffe, die bei langsamer Belastung ziemlich große Spannungen aufnehmen können und sich vor dem Bruch stark dehnen, während sie beim leichtesten Schlag, oder wenn sie bloß zu Boden fallen, sofort ohne jede Dehnung zerbrechen. Solche Stoffe sind Glas, Pech, Siegellack usw. Diese Schlagempfindlichkeit eines Werkstoffes wird noch erhöht, wenn die Beanspruchung nicht nur zeitlich eng begrenzt ist, also stoßweise erfolgt, sondern auch räumlich auf einen kleinen Bereich beschränkt wird, was am besten durch Anbringung einer Kerbe am Probestück erreicht werden kann. Man nennt diese Probe die Kerbschlagprobe. Sie wird in der Regel als Biegeprobe ausgeführt, wobei die Kerbe am höchst beanspruchten Teile, nämlich auf der Zugseite, angebracht wird. Zur Ausführung der Kerbschlagbiegeprobe dienen heutzutage allgemein die Pendelschlagwerke nach Charpy. Die Bestimmung der Kerbzähigkeit geschieht in der Weise, daß man in die Schlagbahn eines Pendelhammers von bestimmtem Gewicht, der aus einer bestimmten Höhe herabfällt, den gekerbten Probestab bringt und mit einem Schlag durchschlägt. Der Hammer verbraucht in der Regel nicht seine ganze lebendige Energie zum Durchschlagen der Probe,

sondern schwingt nach der andern Seite noch bis zu einer gewissen Höhe aus. Aus der Steighöhe nach dem Durchschlag kann auf die geleistete Schlagarbeit geschlossen werden. Man drückt die Kerbzähigkeit allgemein als geleistete Schlagarbeit, bezogen auf den durchschlagenen Querschnitt, also in mkg/cm^2 aus. Nach den Normalien des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik kommen 3 Pendelschlagwerke zur Verwendung:

Schlagwerk	Arbeitsvermögen	Hammergewicht	Fallhöhe d. Pendels	Hammergeschwindigkeit beim Aufschlag
1	250 mkg	85 kg	2,94 m	7,6 m/sek.
2	75 „	33 „	2,27 „	6,7 „
3	10 „	8,2 „	1,22 „	4,9 „

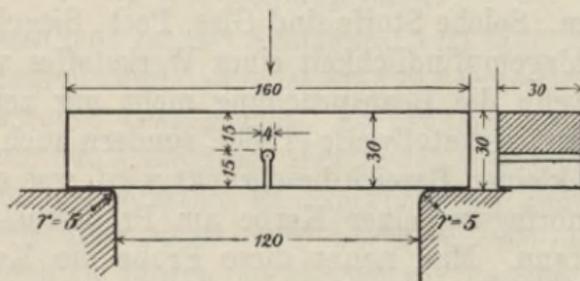


Abb. 9. Normal-Kerbschlagprobe des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik.

Für die Schlagwerke 1 und 2 kommt in der Regel die in Abb. 9 angegebene Probe zur Verwendung. Für das kleine 10 mkg-Schlagwerk wird eine kleinere Probe genommen, und zwar ein 10 mm^2 -Stab (siehe Abb. 10).

Wie schon erwähnt, eignet sich die Kerbschlagprobe dazu, Materialeigenschaften erkennen zu lassen, die beim Zerreißversuch nicht zum Vorschein kommen. Sie ist

daher als wertvolle Ergänzung der Zerreißprobe zu betrachten; während diese hauptsächlich von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes abhängig ist, gibt uns die Kerbschlagprobe einen Anhalt über die Vorbehandlung des Materials, besonders über die Art der Wärmebehandlung. Zum Beweis, daß eine gute Dehnung noch kein zähes Material bedingt, sei aus Heyn, Materialienkunde für den Maschinenbau, S. 394, folgende Beobachtung angeführt: Ein Kesselblech war so spröde, daß davon mit dem

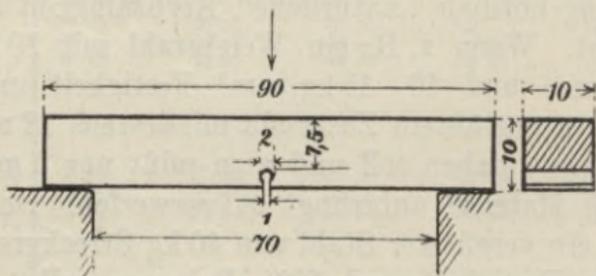


Abb. 10. Kleine Kerbschlagprobe
(Ausführungsform Brown-Boveri & Cie.).

Handhammer bequem Teile abgeschlagen werden konnten. Die chemische Analyse zeigte nichts Abnormales. Die Zerreißprobe ergab folgende Werte:

	Fließgrenze kg/mm ²	Bruch- festigkeit kg/mm ²	Dehnung °/o	Ein- schnürung °/o
Rand . . .	23,1	33,5	22,1	57
Kern . . .	19,5	32,5	23,1	51

Diese Werte entsprechen einem normalen weichen Flußeisen und verraten in keiner Weise Sprödigkeit, im Gegenteil, man würde eher das Umgekehrte vermuten. Erst die Kerbschlagprobe erbrachte den Beweis von der Unzulänglichkeit des untersuchten Bleches.

Dieses Beispiel zeigt, daß man sich nicht allein auf die Dehnungsmessung verlassen kann. Die Messung der Kerbzähigkeit ist deshalb bei allen Maschinenteilen notwendig, bei denen durch Bruch ein großer Schaden angerichtet werden kann, wie z. B. bei rasch rotierenden Maschinen, die hohen Fliehkräften ausgesetzt sind. Es sei bemerkt, daß es nicht auf die absolute Höhe der Kerbzähigkeit ankommt, wenn entschieden werden soll, ob ein Material gesund und für einen bestimmten Zweck brauchbar ist, sondern darauf, ob ein Stahl die für eine bestimmte Wärmebehandlung normale „natürliche“ Kerbzähigkeit aufweist oder nicht. Wenn z. B. ein Weichstahl mit 20 kg/mm² Streckgrenze und 40—45 kg/mm² Festigkeit und 24% Dehnung in geglühtem Zustande mindestens 12 mkg/cm² Kerbzähigkeit haben soll und man mißt nur 5 mkg/cm², so ist das Material unbedingt zu verwerfen. Demgegenüber hat ein vergüteter Stahl von 40 kg Streckgrenze und 65—75 kg Festigkeit und 15% Dehnung selbst in vergütetem Zustand nur 5 mkg/cm² Kerbzähigkeit. Dieser Stahl ist aber trotz seiner geringen Kerbzähigkeit dem ersteren Stahl an Qualität überlegen, selbst wenn dieser 12 mkg/cm² aufweist, weil er eine viel größere Streckgrenze und Festigkeit hat und damit eine viel höhere, selbst stoßweise Beanspruchung aushalten kann. Wenn dieser zweite Stahl aber nur 1—2 mkg/cm² Kerbzähigkeit besitzt, so ist er ebenfalls zu verwerfen, weil er seine „natürliche“ Kerbzähigkeit nicht erreicht.

In der nachfolgenden Zusammenstellung (Zahlen-
tafel 2) ist eine kleine Auslese von eigenen Messungen aufgeführt, bei denen jedenfalls die Bruchdehnung sehr gut, aber die Kerbzähigkeit ganz gering war. Da es sich durchweg um Werkstoffe für hochbeanspruchte Maschinenteile handelte, durch deren Bruch großer Schaden verursacht werden konnte, durften sie nicht verwendet werden. Neben

Werkstoff: Dehnung gut, Korbzähigkeit schlecht.

Gegenstand	Beanspruchungsart	Streckgr. kg/mm ²	Bruchf. kg/mm ²	Dehng. % 10 fach	Einschn. %	Korbzähigkeit in mkg/cm ² vor- gemessen geschriebe
Schmiedestück	Zug- beanspruchg. durch Fliehkraft	27,9	53,7	24,4	43,7	1,9
		27,5	53,5	25,4	45,5	2,5 1,1
Schmiedestück	Biegung und Verdrehung	24,6	53	20	23,9	0,74
		27,2	55,5	22,8	37,3	0,61 1,55 1,66
Stahlgußteil	Zug- beanspruchg. durch Fliehkraft	24,4	50,4	17,7	44,3	1,43
		25,7	53,6	16	40,3	1,67 0,99 3,55
Hochwertiges Schmiedestück	Zug- beanspruchg. durch Fliehkraft	40,8	76	13,7	31,6	0,98
		42,3	76,7	16,2	33	1,01 1,09 1,11
Stahlgußteil	Biegungs- beanspruchg.	20,3	42	22	33,1	1,27
		20,2	41,4	22,5	33,4	1,24 0,89 1,52
Schwedischer Weichstahl	Zug- beanspruchg.	22,2	36,8	28,5	64,1	1,23 1,005

im Betrieb
gebrochen≧ 6
≧ 6
≧ 6
≧ 6
≧ 10
≧ 10 im Betrieb
gebrochen

der gemessenen Kerbzähigkeit ist in der Zusammenstellung noch die Kerbzähigkeit angegeben, die bei gutem Material erreicht wird. Die Proben wurden mit dem 10 mkg-Pendelschlagwerk gemessen und hatten die Abmessungen von Abb. 10.

Es kann aber auch umgekehrt der Fall eintreten, daß Werkstoffe nur geringe Dehnung haben und doch eine gute Kerbzähigkeit zeigen (siehe Zahlentafel 3). Dies kommt

Zahlentafel 3.

Werkstoff { Dehnung: schlecht.
Kerbzähigkeit: gut.

Gegenstand	Streckgr. kg/mm ²	Bruchf. kg/mm ²	Dehnung %	Einschnü- rung %	Kerb- zähigkeit mkg/cm ²
Flacheisen 10 × 25	57,2	57,8	7,1	43,9	8,75 8,03
Gezogenes Material	59,7	62,1	8,9	51,3	11,7 10,13
Schmiedestück	33,7 34	58,1 60	8,5 7	11,8 9,95	4,93 5,59
Schmiedestück aus legiertem Stahl	40,1 40,5	57,1 58,4	9,5 12,5	20,6 27,7	13,08 16
Schmiedestück	33 36,2	54,6 55	10 7,1	17 10,4	4,68 5,93
Messing 6 × 16	56,6	61,7	8,5	24,2	3,34 4,01

bei Schmiedestücken, besonders aber bei gezogenem Material häufig vor. Gewöhnlich ist dann die Streckgrenze sehr hoch, fast so hoch wie die Bruchfestigkeit. Das Material kann dann in vielen Fällen trotz der geringen Dehnung verwendet werden. Eine Ausnahme ist nur dort zu machen, wo durch die Kerbschlagprobe innere Spannungen oder Längsrisse, entstanden durch Materialüberstreckung, aufgedeckt

werden. Die Kerbschlagprobe hat in der Praxis noch nicht die allgemeine Verbreitung gefunden, die sie verdient; dies rührt daher, weil ihr Wesen noch nicht genügend erforscht ist, weil ihre Ergebnisse zu sehr von der Querschnittsform und Größe, der Beschaffenheit des Kerbes und der Schlaggeschwindigkeit abhängig sind. Die Kritiker der Kerbschlagprobe warfen ihr bisher meistens vor, daß ihre Ergebnisse zu stark streuen. Dies trifft allerdings für spröden Werkstoff zu. Daran ist aber nicht die Methode der Prüfung, sondern der Werkstoff selbst schuld. Bei erstklassigem Material von gleichmäßiger Zusammensetzung und richtiger Wärmebehandlung stimmen die Werte der Kerbschlagprobe fast genau miteinander überein. Aus vielen Hunderten von Messungen, die dieses bestätigen, seien nur einige Beispiele angeführt (siehe Zahlentafel 4). Es sind immer 2 Zerreißversuche und 4 Kerbschlagproben ausgeführt worden. Die Zerreißproben wurden an diametral gegenüberliegenden Stellen der betreffenden Maschinenteile z. B. Turbinenscheiben entnommen, die Kerbschlagproben an vier um 90° voneinander entfernten Stellen.

Ein weiterer Einwand gegen die Kerbschlagprobe ist, daß das Ähnlichkeitsgesetz für sie nicht gelte, daß es also nicht möglich sei von einem bestimmten Stabquerschnitt und einer bestimmten Kerbform auf einen anderen Stab mit anderer Kerbe umzurechnen. Dieser Einwand mochte für den Unerfahrenen gelten, aber seit einiger Zeit ist man mit Erfolg damit beschäftigt, auch in die Frage der Gesetzmäßigkeit der Kerbschlagprobe Licht zu bringen. Es sei nur an die Abhandlungen von Moser über die Gesetzmäßigkeit der Kerbschlagprobe erinnert (Kruppsche Monatshefte, Dezember 1921 und April 1924); des weiteren sei auf die von Maurer und Mailänder über die Frage der Blausprödigkeit (Stahl und Eisen 1925, Heft 12) ver

Zahlentafel 4.

Homogener Stahl mit übereinstimmenden Festigkeits-
und namentlich Kerbzähigkeitswerten.

Gegenstand	Streckgr. kg/mm ²	Bruchf. kg/mm ²	Dehnung % 10fach	Ein- schnürung %	Kerbzähigkeit mkg/cm ²
Schmiedestück	40,8	67,3	18,9	63,5	8,01; 9,32
	40,4	69,3	17,6	61,3	8,97; 9,65
Stahlgußteil	22,9	40,9	29,8	63,9	10,6; 11,6
	22,0	41,0	28,6	63,8	12,8; 11,5
Stahlgußteil	25,3	45,8	26,4	51,4	9,44; 9,7
	26,9	45,4	27,2	57,7	10,1; 9,9
Schmiedestück	37,3	62	18,7	50,1	6,33; 7,17
	35,6	58,3	19,4	49,8	6,5; 6,8
Schmiedestück	33,5	47,9	25,9	68,1	10,0; 10,2
	33,3	47,4	27,8	68,4	9,8; 10,1
Schmiedestück	37,0	63,2	17,9	45,2	6,8; 7,3
	38,2	63,5	21,1	63	7,4; 6,6
Schmiedestück	40,6	68,9	17,4	53,6	8,46; 8,2
	41,7	69,3	18,4	49,8	8,08; 8,5
Schmiedestück	49,9	74,3	17,8	49,2	6,86; 6,3
	50,6	73,8	18,3	44,5	6,14; 6,6

öffentlichten Abhandlungen, ferner auf die Veröffentlichung von Körber (Mitteilungen des Eisenforschungsinstitutes 1921) verwiesen. Somit besteht begründete Aussicht, daß die Kerbschlagmethode bei den hochbeanspruchten wichtigen Werkstoffen die ihr gebührende Stellung erlangt.

c) Die Dauerschlagversuche (Ermüdungsversuche).

Im Maschinenbau ist es eine allgemein bekannte Erfahrung, daß Maschinenteile, die sich monate-, ja jahrelang durchaus bewährt haben, plötzlich im normalen Betriebe brechen, ohne daß eine Belastung eingetreten wäre. Der Bruch erfolgt ohne besondere Formänderung, ohne vorausgegangene Dehnung oder Einschnürung an der Bruchstelle, so daß oft der Eindruck entsteht, man hätte es mit einem spröden Werkstoff zu tun. Man glaubte ursprünglich, daß diese Erscheinung nur bei sprödem Material auftreten könnte, aber man fand, daß dies ebensogut bei dehnbarem, gutem Werkstoff mit hoher Kerbschlagfestigkeit eintreten kann. Später nahm man an, daß die Werkstoffe altern oder ermüden, d. h. mit der Zeit ihre ursprünglichen Eigenschaften verlieren. Dies ist aber in der Regel nicht der Fall, wenn auch über die Frage des Alterns der Werkstoffe noch nicht das letzte Wort gesprochen ist. Man hat nämlich durch eine große Anzahl von Messungen gefunden, daß durch Dauerbeanspruchungen Veränderungen im Gefüge der Werkstoffe und damit Veränderungen ihrer Festigkeitseigenschaften nicht eintreten. Die Dauerbrüche werden in der Regel durch unvollkommene Elastizität hervorgerufen. Wird nämlich ein Werkstoff dauernd veränderlichen Beanspruchungen unterworfen, die über seine Elastizitätsgrenze hinausgehen, so tritt mit der Zeit ein Bruch ein. Je höher die Dauerbeanspruchung über der Elastizitätsgrenze liegt, um so schneller erfolgt der Bruch. Dauerbrüche an Maschinenteilen treten im allgemeinen nur an den Kerben auf, weil, wie schon erwähnt, die Berechnung der Beanspruchung in den Kerben äußerst unsicher ist. Am häufigsten sind die Dauerbrüche bei Materialfehlern im Innern der Werkstoffe. Diese wirken ebenfalls wie Kerben. Der Vorgang ist gewöhnlich so, daß sich mit der

Zeit durch die dauernd wechselnde Belastung an der Kerb-
stelle ein feiner unsichtbarer Riß bildet, der sich mit der
Zeit vertieft. Solche Risse verursachen in den Werkstoffen
eine gewisse Beweglichkeit, wodurch die Bruchflächen all-
mählich glatt gerieben werden. Sind die Anrisse genügend
weit fortgeschritten, so erfolgt plötzlich der Bruch. Die
Bruchfläche zeigt gewöhnlich zwei voneinander voll-
kommen verschiedenen Teile. Der eine ist feinkörnig,
samartig, oft von Linien durchzogen. Er stellt den Teil

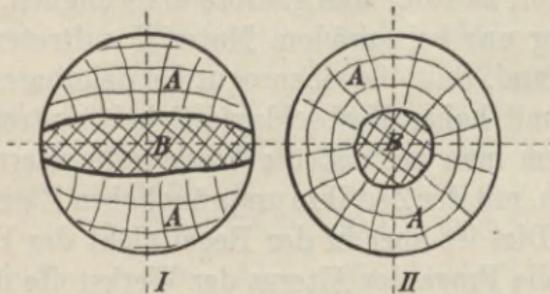


Abb. 11. Schematische Darstellung einer Dauerbruchfläche.

I = Hin- und Herbiegung.

II = Rotierende Biegung (oder schwingende Torsion).

A = Feinkörniger, von Bruchlinien durchfurchter
Dauerbruch.

B = Grobkörniger Überbeanspruchungsbruch.

dar, wo die Anrisse zuerst auftreten. Im Gegensatz dazu
beobachten wir einen grobkörnigen, kristallinisch glänzen-
den Bruch bei dem Teil, der am Schluß plötzlich durch-
bricht. Die schematische Darstellung einer Dauerbruch-
fläche ist in Abb. 11 dargestellt. Die Dauerschlagversuche
haben sich seit 1900 immer mehr in der Technik einge-
bürgert, nachdem eine Reihe von brauchbaren Maschinen
hierfür geschaffen worden sind. Unter diesen hat das
Kruppsche Dauerschlagwerk die weiteste Verbreitung ge-
funden. Bei dieser Maschine wird eine zylindrische Probe,
die in der Mitte mit einem Kerb versehen ist, von einem
auf die Kerbe auftreffenden Bär auf Biegung beansprucht.

Der Bär hat ein Gewicht von 4,2 kg und eine Fallhöhe von 30 mm, es steht also pro Schlag eine Arbeitsmenge von 0,125 mkg zur Verfügung. Die Anzahl der Schläge

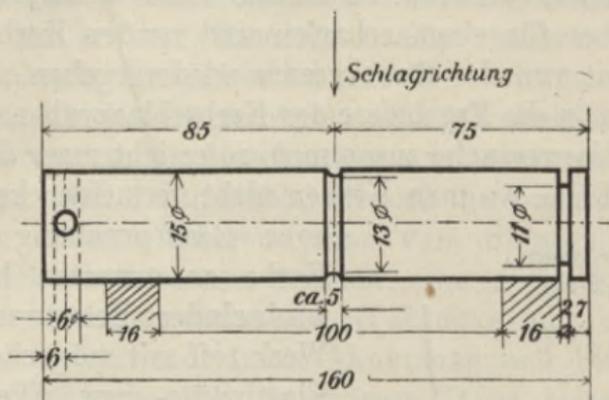


Abb. 12. Dauerschlagprobe mit Rundkerb.

beträgt in der Minute ca. 80. Nach jedem Schlage wird die Probe selbsttätig um einen bestimmten Betrag gedreht,

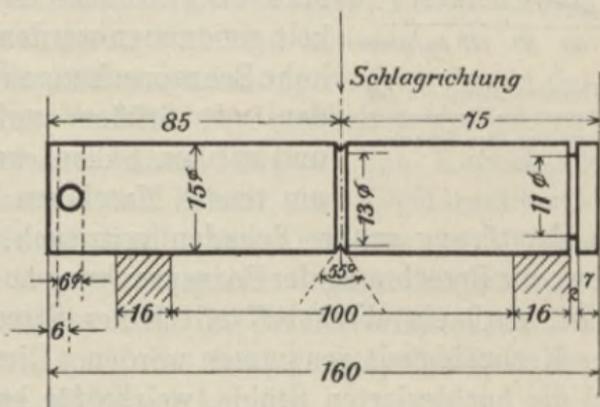


Abb. 13. Dauerschlagprobe mit Scharfkerb.

und zwar entweder um 180° oder um ein 25stel des Umfanges. In Abb. 12 und 13 ist der Kruppsche Dauerschlagstab für Rund- und Scharfkerb dargestellt. Aus den Ver-

suchen ergibt sich, daß die Schärfe des Kerbes die Schlagzahl bedeutend herabsetzt, es ergibt sich auch die Lehre, daß im Maschinenbau scharfe Kerben möglichst zu vermeiden sind. In Abb. 14 ist die Dauerschlagzahl eines Stahlstabes für einen scharfen und runden Kerb in Abhängigkeit von der Streckgrenze wiedergegeben.

Faßt man die Ergebnisse der Kerbschlagproben und der Dauerschlagversuche zusammen, so ersieht man, daß man für alle Fälle, wo man Kerben nicht vermeiden kann und

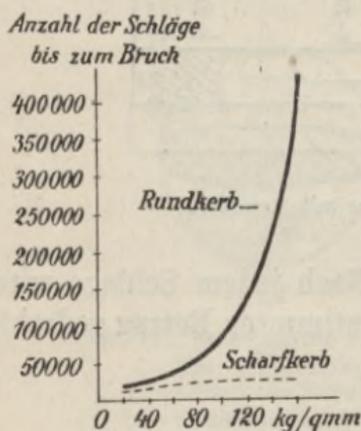


Abb. 14. Dauerschlagzahlen bei Stahl bei dauernder Drehung in Abhängigkeit von der Streckgrenze.

hohe Beanspruchung in der Kerbe zu erwarten hat, bei wechselnder Belastung einen Werkstoff mit möglichst hoher Elastizitäts- bzw. Fließgrenze zu wählen hat. Kommen Stöße vor oder ist der Maschinenteil hohen Fliehkräften ausgesetzt, so muß ein möglichst zähes Material mit hoher Kerbzähigkeit genommen werden. Wenn hohe Beanspruchungen verbunden mit Stößen vorkommen und in allen Fällen, wo es sich um teure Maschinen handelt,

wo durch Zerstörung großer Schaden verursacht werden kann und wo die Berechnung der Beanspruchung noch etwas unsicher ist, muß ein Werkstoff mit hoher Streckgrenze und hoher Kerbzähigkeit genommen werden. Dies sind in der Regel die hochlegierten Stähle, welche für hochbeanspruchte Maschinenteile immer mehr zur Verwendung kommen:

5. Die Bestimmung der Härte und Bearbeitbarkeit der Metallegierungen.

Unter Härte eines Werkstoffes versteht man den Widerstand, den er dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt. Die Härte ist eine der wichtigsten Eigenschaften der Metallegierungen. Sie ist deshalb von so großer Bedeutung im Maschinenbau, weil sie in den meisten Fällen ein Maß dafür bildet, wie sich die Legierungen bearbeiten lassen. Während man vom Standpunkte der billigen Bearbeitung aus wünscht, eine möglichst geringe Härte zu haben, erweist es sich oft als notwendig, ein hartes Material zu verwenden, um Abnützung und Flächeneindrückung zu vermeiden. In anderen Fällen, beispielsweise bei Lagermetall, muß darauf geachtet werden, daß eine bestimmte Härte erreicht wird, damit die Lagerschalen durch das häufige Anlaufen und Abstellen der Maschinen nicht zu rasch abgenützt werden. Andererseits darf aber die Härte nicht zu groß werden, weil sich sonst die Lager nicht rasch genug einlaufen können.

Für die Härtebestimmung sind im Laufe der Zeit eine Reihe von Verfahren ausgearbeitet worden, so das Ritzhärteverfahren nach Martens, das Kugeldruckverfahren nach Martens und Brinell, das Kegeldruckverfahren nach Ludwik, das Fallhammerverfahren nach Shore und in neuerer Zeit verschiedene Schlaghärteprüfungen. In die Praxis haben sich nur das Brinellverfahren, das Fallhammerverfahren und die Schlaghärteprüfungen in größerem Maßstabe einführen können.

Das Kugeldruckverfahren nach Brinell beruht darauf, daß eine gehärtete Stahlkugel in das zu untersuchende Material eingedrückt wird (siehe Abb. 15). Aus der Größe des Eindruckdurchmessers d kann auf die Härte des Materials geschlossen werden, und zwar wird als Härte H_B

das Verhältnis der Eindruckkraft zur Eindruckkalottenoberfläche bezeichnet.

Es gilt hierfür also folgende Formel:

$$H_B = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot t} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kg/mm}^2.$$

Hierin bedeuten H_B die Brinellhärte in kg/mm^2 , P die Belastung der Kugel in kg , F die Oberfläche der Eindruckkalotte in mm^2 , D der Kugeldurchmesser in mm , d der

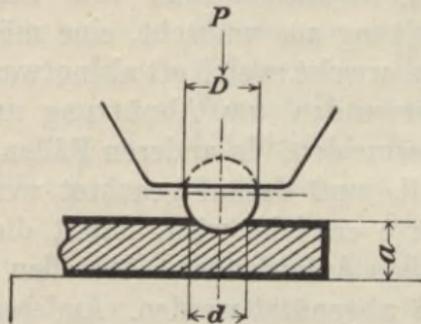


Abb. 15. Kugeldruckversuch nach Brinell.

Durchmesser der Eindruckfläche in mm , t die Eindrucktiefe in mm .

Für die praktische Ausführung der Brinellprobe ist zu bemerken:

1. Der Versuch ist an einer blanken ebenen Fläche auszuführen.

2. Der Abstand der Eindruckmitte vom Rande des Probestückes oder von einer anderen Eindruckstelle ist so zu wählen, daß keine das Ergebnis beeinflussenden Nebenerscheinungen (Aufbeulen des Randes, Ausbauchen) auftreten.

3. Die Belastung ist stoßfrei während 15 Sekunden gleichmäßig zu steigern und in der Regel 30 Sekunden auf dem Endwert zu belassen.

4. Je nach der Dicke a der Probe sind folgende Kugeln und Belastungen anzuwenden:

Dicke der Probe a mm	Kugel- durch- messer D mm	Belastung P kg		
		$30 \cdot D^2$	$10 \cdot D^2$	$2,5 \cdot D^2$
		für Gußeisen und Stahl kg	für hartes Kupfer, Messing, Bronze u. a. kg	für weichere Metalle kg
Über 6	10	3000	1000	250
Von 6 bis 3	5	750	250	62,5
Unter 3	2,5	187,5	62,5	15,6

Die Brinellprobe wird bei dehnbaren Metallegierungen mit gutem Erfolge dazu benutzt, um auf die Zugfestigkeit zu schließen. Diese ist in kg/mm^2 ungefähr ein Drittel der Brinellhärtezah. Bei ungehärteten Kohlenstoffstählen ist die Umrechnungszahl = 0,36. Hat man beispielsweise bei einem Wellenstahl die Brinellhärte $H_B = 150$ gemessen, so beträgt die Zerreißfestigkeit des Stahles $54 \text{ kg}/\text{mm}^2$. Bei Chromnickelstahl ist die Umrechnungszahl 0,34, bei Kupfer ergibt sich ca. 0,33, bei Bronze ca. 0,34. Das Kugeldruckverfahren nach Brinell hat wegen seiner Einfachheit eine sehr ausgedehnte Verbreitung in der Technik gefunden. Es ist neuerdings sogar in die deutschen Industrienormen aufgenommen worden.

Neben der Brinellprobe kommt noch das Fallhämmerverfahren von Shore häufig zur Anwendung. Bei dem Shoreschen Härtemesser (Skleroskop) fällt ein Stahlhämmerchen mit Diamantspitze von 2,2 gr in einer Glasröhre aus einer Höhe von 250 mm auf die sauber geschmirgelte Probe herab. Die Rückprallhöhe des Hämmerchens dient als Maß für die Härte. Das Shoresche Verfahren hat sich deshalb so rasch in die Praxis eingeführt,

weil es sich schnell ausführen läßt und weil die Maschinenteile, die auf Härte untersucht werden sollen, kaum verletzt werden. Die Probe kann am fertigen Stück vorgenommen werden, weil die Eindrücke fast nicht wahrnehmbar sind. Das Rücksprungverfahren zeigt natürlich nicht die wahre Härte an. Es sind daher die Härtewerte zweier verschiedener Werkstoffe, mit dem Skleroskop gemessen nicht vergleichbar, z. B. liefert Gummi eine größere Rücksprunghöhe als harter Stahl. Aber innerhalb des gleichen Werkstoffes sind die Werte sehr wohl miteinander vergleichbar. Wenn man z. B. bei Guß eine Härte von 30 mißt, so weiß man, daß man ein sehr weiches, gut bearbeitbares Gußeisen vor sich hat. Findet man aber die Zahl 45, so ist man sicher, daß man einen äußerst schwer bearbeitbaren Guß vor sich hat.

In jüngster Zeit sind vielfach noch die Schlaghärteprüfer in Gebrauch gekommen. Diese sind viel billiger als die Brinellpressen. Bei ihnen wird durch den Schlag einer gespannten Feder eine kleine Kugel in den Werkstoff getrieben und die Eindringtiefe gemessen. Sie sind sehr einfach zu handhaben und können an jedes Werkstück herangebracht werden. Ihre Prüfergebnisse sind zwar nicht so genau wie die der Brinellpresse, aber wenn sie mit der Brinellpresse geeicht und öfters verglichen werden, können sie manchen guten Dienst leisten.

Die angegebenen Härteprüfmethoden messen alle die Oberflächenhärte, also den Eindringungswiderstand eines anderen Körpers in die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstückes. Sie sind daher in erster Annäherung auch ein Maß für die Bearbeitbarkeit eines Werkstoffes. Wenn wir aber zwei Werkstoffe, beispielsweise zwei Stähle von gleicher Brinellhärte bearbeiten, so finden wir oft erhebliche Unterschiede in der Bearbeitbarkeit, und zwar zeigt sich, daß der Stahl mit höherer Dehnung, oder noch genauer

ausgedrückt mit höherer Kerbzähigkeit, größeren Bearbeitungswiderstand aufweist als der mit geringerer Dehnung. Die Bearbeitbarkeit, also das Drehen, Fräsen, Hobeln und Bohren, ist nicht nur von der Härte, sondern auch von der Kerbzähigkeit abhängig. Zum Beispiel läßt sich der hochzähe unmagnetische Mangannickelstahl, wie er für Turbo-Rotorwicklungskappen verwendet wird, bei einer Brinellhärte von 220 und einer Kerbzähigkeit von über 20 mkg/cm^2 viel schwerer bearbeiten als der gleich harte Kohlenstoffstahl, der nur eine Kerbzähigkeit von 5 hat. Zur Messung der Bearbeitbarkeit ist von Professor Keßner das sogenannte Härtebohrverfahren ausgebildet worden, welches die Eindringtiefe eines Bohrers bei einem bestimmten Druck nach einer gewissen Umdrehungszahl mißt und damit einen gewissen Anhalt über die Bearbeitbarkeit gibt.

6. Die technologischen Festigkeitsversuche.

Technologische Proben sind solche, bei denen das Material einer bestimmten Formänderung unterworfen wird, wobei aber keine besonderen Kraft- und Arbeitsmessungen vorgenommen werden, sondern nur das äußere Verhalten beobachtet wird und daraus Schlüsse gezogen werden. Sie bilden eine Ergänzung der bisher behandelten Werkstoffprüfungen und werden namentlich dann angewendet, wenn es sich nur um einen ungefähren Anhalt über die Eignung des betreffenden Werkstoffes handelt oder dort, wo sich die üblichen Methoden nicht gut durchführen lassen. In der Hauptsache sucht man durch die technologischen Proben Eigenschaften wie Schmiedbarkeit, Schweißbarkeit, Stauchbarkeit, Bieg- und Ziehbarkeit festzustellen. Die technologischen Prüfverfahren sind so eingerichtet, daß die bei der Verarbeitung von technischen

Werkstoffen auftretenden Beanspruchungen nach Möglichkeit vorkommen. Man unterscheidet Kalt- und Warmproben.

a) Die Kaltproben.

Unter den Kaltproben ist in erster Linie die Kaltbiegeprobe zu nennen. Die streifenförmigen Proben werden über einen Dorn von bestimmtem Halbmesser gebogen, dessen Durchmesser gleich oder ein Vielfaches der Probepdicke ist (siehe Abb. 16). Man biegt, bis Risse an der Probe auftreten und mißt den Bruchbiegeradius r für die neutrale Faser.

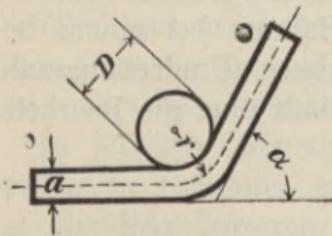


Abb. 16. Kaltversuch (Biegeprobe).

Als Maß für die Bewertung der Zähigkeit eines Werkstoffes hat Tetmajer den Begriff der Biegegröße eingeführt. Die

Biegegröße $Bg = \frac{50 \cdot a}{r}$. Hierin

bedeutet a die Probepdicke, r den Bruchbiegeradius der neutralen Faser. Beim Falten (Biegen) um

einen Dorn von vorgeschriebenem Durchmesser D ergeben sich angenähert folgende Biegegrößen:

D	0	$0,5 a$	$1,0 a$	$1,5 a$	$2,0 a$	$2,5 a$	$3,0 a$
Bg	100	67	50	40	33	28	25

Ein sehr zähes Eisenblech, das sich um 180° herumbiegen läßt, hat demnach die Biegezahl 100. Als Mindestzahl für Eisenblech verlangt man $Bg = 33$, bei Messing erhält man als Biegegröße ebenfalls 33 und mehr.

Neben der Kaltbiegeprobe kommt noch besonders die Hin- und Herbiegeprobe bei Drähten und Blechen vor. Bei dieser Probe wird der Draht zwischen Klemmbacken gespannt und nach beiden Seiten um 90° um einen Halbmesser gebogen, der gewöhnlich 2mal der Drahtdicke ist.

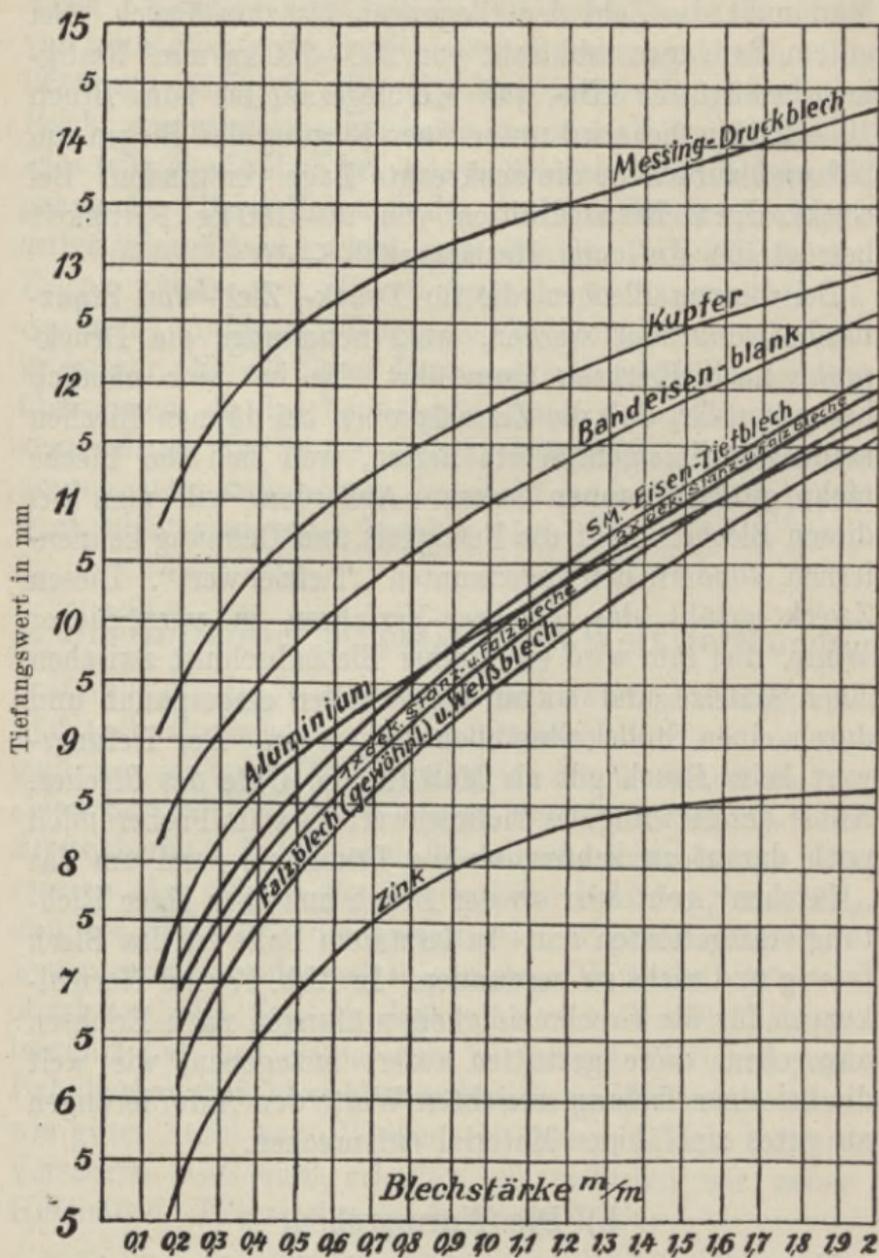


Abb. 17. Normalkurven für die Geschmeidigkeitsprüfung von Blechen nach Erichsen.

Man mißt die Zahl der Biegungen bis zum Bruch. Bei gutem Bandagenstahldraht von 200—250 kg/mm² Festigkeit beträgt die Hin- und Herbiegezahl bis zum Bruch 10—12. Hierbei wird unter einer Biegung das Biegen um 90° und zurück in die senkrechte Lage verstanden. Bei erstklassigen Bronzedrähten von 90—100 kg Festigkeit beträgt die Hin- und Herbiegezahl 8—10.

Bei dünnen Blechen, die für Druck-, Zieh- und Stanzbleche verwendet werden, wird neuerdings die Druckprobe nach Erichsen ausgeführt. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß die Zerreißproben bei dünnen Blechen keine zuverlässigen Werte liefern, weil sich die Bleche nicht gut einspannen lassen. Außerdem will man bei diesen Blechen nicht die Festigkeit und Dehnung kennenlernen, sondern den sogenannten „Tiefziehwert“. Diesen Zweck erfüllt das Erichsen-Verfahren in vorzüglicher Weise. Bei ihm wird ein kleiner Blechabschnitt zwischen einer Matrize und einem Faltenhalter eingespannt und durch einen Stößel allmählich tiefgezogen. Der Tiefungswert beim Bruch gilt als Maß für die Güte des Bleches. Außer der Messung des Tiefungswertes ist am Proberondell noch darauf zu achten, ob die Bruchlinie rund um das „Hütchen“ geht oder ob der Bruch nur nach einer Richtung stattgefunden hat. In letzterem Falle ist das Blech faserig und nicht zu verwenden. In Abb. 17 sind Normalkurven für die Geschmeidigkeitsprüfungen nach Erichsen angegeben, diese gestatten sofort anzugeben, wie weit die bei einer Tiefung erreichten Werte den Anforderungen an gutes ziehfähiges Material entsprechen.

b) Die Warmproben.

Unter diesen ist in erster Linie die Warmbiegeprobe zu nennen. Diese wird bei Stahl bei Dunkelrotglut von ca. 600° C vorgenommen. Bei dieser Temperatur ist das

Eisen besonders empfindlich und neigt, wenn es nicht von vorzüglicher Beschaffenheit ist, gern zum Bruch. Die Prüfung wird wie die Kaltbiegeprobe vorgenommen. Bricht das rotwarme Eisen, so nennt man es rotbrüchig, Dies tritt gewöhnlich bei hohem Schwefel- und Phosphorgehalt ein. Beim Bruch in der Rothitze durch schichtenartige Einschlüsse spricht man von Faulbrüchigkeit des Eisens. Außer der Warmbiegeprobe kommen noch die Ausbreit-, Aufdorn-, Warmstauch-, Polter- und Bördelprobe vor. Bei all diesen Prüfungsverfahren will man sich überzeugen, ob das betreffende Material bei der Warmverarbeitung für einen Gebrauchsgegenstand, wenn es ausgebreitet, aufgedornt, gestaucht oder warm gepreßt wird, nicht rissig oder Brüchig wird.

7. Die Hilfsmittel der praktischen Werkstoffkunde.

Durch die im vorstehenden behandelten Festigkeits- und technologischen Prüfungsverfahren sind wir im allgemeinen imstande, festzustellen, ob ein Werkstoff die für einen bestimmten Zweck nötige Festigkeit, Schlag- und Stoßsicherheit, Dehnbarkeit, Bearbeitbarkeit besitzt. Wir müssen aber häufig die schmerzliche Erfahrung machen, daß ein Werkstoff die gewünschten Eigenschaften entweder gar nicht oder nur in geringem Maße hat. Wir beobachten z. B., daß ein Stahl, der sich in vielen Fällen bewährt hat, auf einmal eine zu geringe Festigkeit und Dehnbarkeit hat, obwohl er äußerlich das gleiche Aussehen wie guter Stahl hat. Wollen wir über den Grund dieses Versagens Aufschluß erhalten, so bedürfen wir neuer Hilfsmittel. Ein solches ist in erster Linie:

a) Die chemische Analyse.

Die chemische Analyse gibt uns einen ersten Anhaltspunkt über die inneren Gründe eines bestimmten Verhaltens eines Werkstoffes bei mechanischen Beanspruchungen. Sie lehrt uns z. B., aus welchen Legierungsbestandteilen der betreffende Stahl zusammengesetzt ist, ob er die richtige Menge Kohlenstoff enthält, ob die schädlichen Bestandteile, wie Schwefel und Phosphor, eingeschlossene Gase, wie Wasserstoff und Stickstoff, nicht in zu großer Menge vorhanden sind.

Man kennt heutzutage im großen und ganzen bei den Metallegierungen den Einfluß der verschiedenen Elemente auf die Festigkeitseigenschaften. Die chemische Analyse muß daher der ständige Begleiter sowohl bei der Erzeugung, Weiterverarbeitung, Wärmebehandlung und Prüfung der Legierungen sein. Man greift in allen möglichen Lagen zur chemischen Analyse. Kommt irgendwo ein Bruch eines wertvollen Maschinenteiles vor, so überzeugt man sich in erster Linie, ob die chemische Zusammensetzung stimmt. Erst wenn man sich von der richtigen chemischen Zusammensetzung überzeugt hat, geht man auf andere Untersuchungen und Methoden über. Infolge der Wichtigkeit der chemischen Prüfung besitzt heutzutage fast jedes Hütten- und Metallwerk ein eigenes chemisches Laboratorium, in dem die chemische Zusammensetzung der benutzten Rohstoffe, sowie der Fertig-, Zwischen- und Nebenerzeugnisse nachgeprüft wird. Die Ergebnisse dieser laufenden Untersuchungen bieten den Metallwerken eine Gewähr für den sachgemäßen Verlauf der Schmelzverfahren und für die richtige Beschaffenheit der Erzeugnisse. Die Notwendigkeit der Durchführung dieser Prüfungen hat im Laufe der Zeit zur Bildung eines besonderen Zweiges der Chemie, nämlich der Eisen- und Metallhüttenchemie ge-

führt. Die chemische Analyse der Eisen- und Metallegierungen ist in den letzten Jahrzehnten zu einem hohen Grade der Vollkommenheit durchgebildet worden. Sowohl die qualitative wie die quantitative Untersuchung ist immer mehr verfeinert worden, so daß man imstande ist, selbst für rein technische Untersuchungen mit einer Genauigkeit zu arbeiten, die man sonst in der Technik nirgends erreicht.

Da man beim Schmelzverfahren fortwährend über die chemische Zusammensetzung unterrichtet sein muß, um den Verlauf der Schmelzungen besser regeln und beeinflussen zu können, so hat es sich als notwendig erwiesen, besondere Schnellverfahren zu entwickeln, die die Durchführung einer Analyse in ganz kurzer Zeit mit genügender Genauigkeit gestatten. Somit ist die chemische Analyse zu einem unentbehrlichen, wichtigen Werkzeug in der Hand des Eisen- und Metallhüttenmannes geworden. Durch den Ausbau der chemischen Laboratorien ist die Leistungsfähigkeit der Eisen- und Metallhüttenwerke bedeutend erhöht worden. Man hat sich dadurch von den unsicheren Ergebnissen der früher im Gebrauch befindlichen Handproben freimachen können, und konnte dadurch namentlich die Güte der Werkstoffe erhöhen und eine größere Gleichmäßigkeit ihrer Festigkeitseigenschaften erzielen. Aber auch jede bedeutendere Maschinenfabrik, die große Maschinen herstellt, ist heutzutage darauf angewiesen, sich ein chemisches Untersuchungslaboratorium einzurichten, um die wichtigeren Werkstoffe auf ihre Zusammensetzung zu untersuchen und sich vor Fehllieferungen möglichst zu schützen. Die chemische Analyse dient hier als Mittel, zum Erfolg einer guten Konstruktion durch Auswahl des richtigen Werkstoffes beizutragen.

In der praktischen Werkstoffuntersuchung tritt häufig der Fall ein, daß z. B. ein Stahl wohl die richtige Festig-

keit und Dehnung besitzt, daß er aber gegen Stöße, namentlich bei Anwesenheit von Kerben sehr empfindlich ist. Um den Grund dieses Verhaltens aufzuklären, genügt häufig auch die chemische Analyse nicht; denn die einzelnen chemischen Bestandteile können zwar in richtiger Gesamtmenge vorhanden sein, aber sie liegen vielleicht nicht in der richtigen Art beieinander; es können Schlacken vorhanden sein, die Kristalle, die kleinsten Bausteine der Metalle, können nicht die richtige Form haben, sie können bei der Herstellung falsch behandelt worden sein.

b) Die Metallographie.

Auf all die genannten Fragen sucht uns die Metallographie, der neueste Zweig auf dem Gebiete der Metallforschung, eine Antwort zu geben. Sie ist die Lehre vom Aufbau der Metalle und Legierungen. Sie gibt uns einen Einblick in das Innere der Metalle und befaßt sich mit der Erforschung der physikalischen, chemischen und technischen Eigenschaften der Metalle¹⁾. Die Metalle bestehen aus lauter kleinen Kristallen, die durch Kohäsionskräfte zusammengehalten werden. Diese Auffassung hat sich in der technischen Praxis noch nicht allgemein eingeführt. Man bezeichnet nämlich dort als kristallin in der Regel ein grobkörniges Gefüge, wie es bei überhitzten Metallen gewöhnlich vorkommt. Im Gegensatz hierzu nennt man einen feinen sammetartigen Bruch amorph. In Wirklichkeit gibt es aber keine amorphen Metalle. Die so bezeichneten Metalle zeichnen sich durch ein besonders feines kristallinisches Gefüge aus, das nur mit dem Mikroskop sichtbar ist. Wenn man in der Praxis von einem kristallinen Metall spricht, so meint man gewöhnlich nur ein be-

¹⁾ Die Metallographie ist in den Göschelbänden 432/433 von Heyn und Bauer behandelt, auf die hier besonders hingewiesen sei.

sonders grobkristallines Gefüge. In der Metallographie betrachtet man ein Metall nicht als etwas Ganzes, Gleichartiges, wie es etwa der Konstrukteur macht, wenn er zur Vornahme einer Festigkeitsrechnung das Trägheitsmoment eines Querschnittes bestimmt, sondern man sieht das Metall als ein Haufwerk an, das aus lauter winzig kleinen Kristallen besteht. Die Metallographie stellt sich die Aufgabe, den Einfluß der chemischen Zusammensetzung, der Erzeugung, Wärmebehandlung, Bearbeitung, kurz den Einfluß aller metallurgischen und mechanischen Vorgänge auf die einzelnen Kristalle zu studieren.

In der Metallographie spielt die mikroskopische Untersuchung eine große Rolle. Man fertigt zu diesem Zwecke von dem zu untersuchenden Metall einen Schliff an, ätzt diesen mit einer dem besonderen Falle angepaßten verdünnten Säure und untersucht das Gefüge im auffallenden Lichte unter dem Mikroskop. Bei der Untersuchung des Kleingefüges durch das Mikroskop geht man in der Weise vor, daß man zuerst mit der Beobachtung durch das bloße Auge beginnt, dann wendet man eine schwache Vergrößerung an und geht erst dann auf stärkere Vergrößerung über, wenn man sich über das Wesen des Gefüges klar geworden ist. Es genügen in der Regel lineare Vergrößerungen bis zum 200fachen. Wesentlich darüber hinauszugehen, ist nur in seltenen Fällen von Nutzen, und zwar deshalb, weil man bei zu starker Vergrößerung leicht durch eine örtliche Besonderheit des Schliffes getäuscht werden kann und die hauptsächlichen Eigenschaften übersieht.

Da die Vorbehandlung, die eine Metallegierung erfahren hat, in den meisten Fällen im Gefüge bleibende Merkmale hinterlassen hat, so stellt uns das mikroskopische Bild gewissermaßen eine Urkunde über die Entstehungsgeschichte der Legierung dar. Wir können aus der Größe

und Beschaffenheit der Kristalle auf die Art ihrer Entstehung schließen, wir können feststellen, ob die Legierung noch das ursprüngliche Gußgefüge hat oder ob es durch Glühungen oder Warmverarbeitungen (Schmieden, Pressen, Walzen) verändert wurde, wir können aus dem Gefügebild entnehmen, bei welchen Temperaturen das Material gegläht wurde. Wir können einen Schluß auf die Glühdauer ziehen, wir können ersehen, ob das Material abgeschreckt oder angelassen wurde, ob und in welcher Richtung es kalt gereckt, in welcher Richtung es ausgewalzt und ausgeschmiedet wurde. Außerdem können wir aus dem Gefügebild, z. B. beim Stahl, die ungefähre Größe des Kohlenstoffgehaltes ersehen. Wir können Ungleichmäßigkeiten in der chemischen Zusammensetzung erkennen, ferner feine Schlackeneinschlüsse, Seigerungszone, Poren, feine Risse, örtliche Kohlenstoffanreicherung, Entkohlung usw.

Neben der mikroskopischen Gefügeuntersuchung kommt die sogenannte makroskopische oder Großgefügeuntersuchung viel zur Anwendung. Hier beobachtet man nach entsprechender Behandlung die zu untersuchende Fläche mit dem bloßen Auge oder mit einer schwach vergrößernden Lupe. Diese Untersuchungsmethode wird sehr häufig zur Entdeckung von groben Materialfehlern angewendet. Solche sind in erster Linie die Lunker. Diese entstehen beim Übergang des Metalls vom flüssigen in den festen Zustand, und zwar dadurch, daß das gegossene Metall infolge der Volumenverminderung beim Erstarren die ursprüngliche Form nicht mehr ganz ausfüllt, so daß ein Hohlraum entsteht. Dieser bildet sich im oberen Teile fast jeden Gußstückes, und man wendet verschiedene Mittel an, ihn möglichst klein und unschädlich zu machen. Das bewährteste ist, daß man am oberen Ende des Gußstückes, also an der Stelle, wo das Material eingegossen wird und demgemäß am längsten flüssig bleibt, einen sogenannten

Trichter anbringt. Dieser muß eine so reichliche Menge flüssigen Metalls enthalten, daß aus ihm so lange flüssiges Material in das übrige Gußstück nachfließen kann, bis alle Hohlräume ausgefüllt sind. Der übriggebliebene Trichter oder verlorene Kopf wird hiernach entfernt. Kleinere Lunker dringen nicht weit in den Gußblock hinein, sie werden durch das Schmieden oft mehr oder weniger zugeschweißt. Sie können aber, wenn sie nicht rechtzeitig entdeckt werden, verhängnisvoll werden. In Abb. 18 ist ein Lunker in einem Gußblock schematisch dargestellt.

Des weiteren wird die Großgefügeuntersuchung auch zur Aufsuchung von sogenannten Seigerungen benützt. Man versteht darunter bei Legierungen eine Entmischung vor und während des Erstarrungsvorganges derart, daß in einer ursprünglich gleichmäßigen Legierung nach der Erstarrung Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung vorhanden sind. Die Entmischung geht z. B. bei Stahl so vor sich, daß an den kalten Wänden der Kokille sich zuerst



Abb. 18. Schematische Darstellung eines Lunkers.

Kristalle bilden, die reicher an Eisen sind als der durchschnittlichen Zusammensetzung des Stahles entspricht, während die übrige Flüssigkeit sich an den fremden Körpern mehr anreichert. Es sind dies hauptsächlich Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel, die sich an den Stellen mehr anhäufen, wo das Material am längsten flüssig bleibt, nämlich in der Mitte des Blockes und im oberen Teile des Blockes. In den Abb. 19, 20, 21 sind Blockseigerungen nach Wendt (Kruppsche Monatshefte 1922) dargestellt. Es ist die Aufgabe des Metallurgen, darauf zu sehen, daß die Seigerungen möglichst gering bleiben. Die Feststellung von Seigerungen geschieht durch

verschiedene Ätzverfahren. Die Kohlenstoff-Phosphor-seigerung bei Stahl, die zu Sprödigkeit Anlaß gibt, läßt sich durch die Kupferammoniumchloridätzung nachweisen. Die Schwefelseigerung, die ebenso gefährlich werden kann, entdeckt man durch die Baumannsche Schwefelabdruckprobe.

Die Großgefügeuntersuchung wird ferner zur Prüfung von Schweißungen und Lötungen verwendet. Da Schwei-

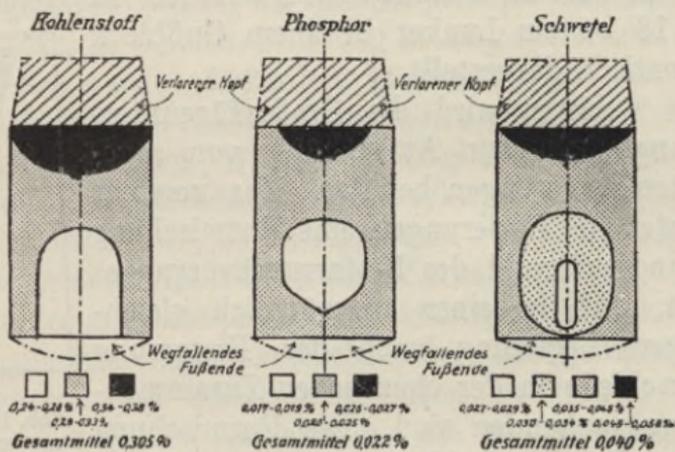


Abb. 19.

Abb. 20.

Abb. 21.

Blockseigerungen in ruhigem Stahl.

Bungen bei den verschiedensten Materialien vorkommen, so muß man auch ein Mittel haben, festzustellen, ob in einem gegebenen Falle durch die Schweißungen auch der Zweck erreicht wurde, ob die Schweißung auch vollkommen und nicht nur an der Oberfläche gelungen ist. In der Großgefügeuntersuchung (Ätzung durch Kupferammoniumchlorid) hat man ein vorzügliches Mittel gefunden, den Verlauf und die Güte von Schweißstellen zu untersuchen. Man kann feststellen, ob ein Werkstoff sich zum Schweißen eignet, ob ein Schweißmittel oder eine Schweißmethode sich in einem gegebenen Falle bewährt.

Die Großgefügeuntersuchung wird häufig auch zur Feststellung von Formänderungen angewendet. Will man z. B. die Wirkung von Stanzungen kennenlernen, will man wissen, ob durch das Stanzen keine zu große Kristallverzerrungen verursacht werden, so daß das Material brüchig wird, oder ob die Vernietung von Blechen gelungen ist, ob die Niete nicht zu stark beansprucht werden, so daß sie rissig werden, so untersucht man das Großgefüge der Stanzung und Vernietung.

Die Gefügeuntersuchung der Metalle wurde von dem Engländer Sorby um 1860 herum begründet. Seine Arbeiten blieben aber zunächst unbeachtet. Erst Martens lenkte seit den 70iger Jahren die Aufmerksamkeit auf den großen Nutzen der metallographischen Untersuchung. Ihre weitere Ausbildung erfolgte durch Osmond und Roberts-Austen. In neuerer Zeit haben sich um die Entwicklung der Metallographie Roozeboom und Charpy, dann Arnold, Howe und viele andere verdient gemacht, ganz besonders aber in jüngster Zeit Tammann, Heyn, Gürtler, Goerens, Bauer und Baumann. Die Metallographie ist heute zu einer der angesehensten Wissenschaften geworden. Sie erfreut sich namentlich auch in der praktischen Werkstoffprüfung einer immer zunehmenden Wertschätzung. Es gibt heute wohl keine größere technische Lehranstalt, wo nicht Metallographie als eigenes Lehrfach behandelt wird, es gibt wohl kein größeres Eisen- und Metallwerk und keine größere Maschinenfabrik, wo nicht ein metallographisches Laboratorium vorhanden ist. In der Maschinentechnik kommen immer wieder Brüche vor, man ist nie vor Überraschungen trotz sorgfältigster Berechnungen geschützt. In solchen Fällen ist die Metallographie schon oft die Retterin geworden. Wenn man durch die Gefügeuntersuchung auch nicht jedesmal unmittelbar die Ursachen feststellen konnte, so hat sie oft die Anregung

dazu gegeben, die Festigkeitsuntersuchung in eine andere Richtung zu lenken, eine andere Wärmebehandlung vorzunehmen, die Konstruktion abzuändern usw. In den Abb. 22—40 ist eine Reihe von Gefügebildern dargestellt.

Abb. 22 stellt einen kohlenstoffarmen, weichen Stahl von etwa 37 kg/mm^2 Festigkeit dar. Die hellen Kristalle sind reine Eisenkristalle, sogenannter Ferrit, der dunklere Gefügebestandteil wird Perlit genannt, weil er bei stärkerer



Abb. 22. Kohlenstoffarmer, weicher Stahl. Ferrit (hell) u. Perlit (dunkel). Vergr. = 265 fach.

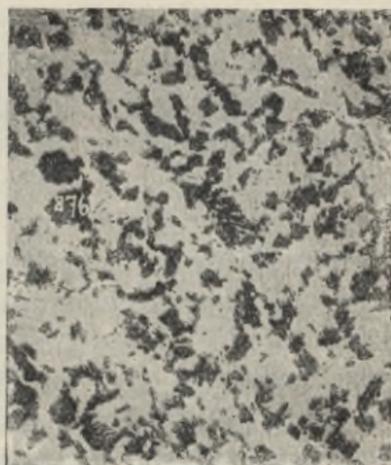


Abb. 23. Geglühter mittelharter Stahl. Vergr. = 265 fach.

Vergrößerung perlmutterartiges Aussehen hat. Er ist der Träger des Kohlenstoffes, und zwar enthält er diesen in einem Mengenverhältnis von $6,7\%$.

Abb. 23 zeigt einen geglühten Stahl mittlerer Festigkeit (55 kg/mm^2) von hoher Dehnung und hoher Kerbzähigkeit. Die hellen Kristalle sind wieder reines Eisen (Ferrit), die dunkleren sind Perlit.

In Abb. 24 ist der gleiche Stahl wie in Abb. 23 wiedergegeben, aber im einsatzgehärteten Zustand. Das nadelartige Gefüge der Einsatzschicht wird Martensit genannt.

Abb. 25 zeigt wiederum den gleichen Stahl wie Abb. 23, aber im überhitzten Zustand. Der Stahl wurde längere Zeit bei 1100°C geglüht, er hat ein außerordentlich grobes Gefüge und ist sehr spröde.

Abb. 26 zeigt einen etwas grobkörnigen Stahlguß. Die hellen Gefügebestandteile sind Ferrit, die dunkleren streifiger Perlit.



Abb. 24. Derselbe Stahl wie Abb. 23, aber im Einsatz gehärtet. Martensit aus der Einsatzschicht.
Vergr. = 265 fach.



Abb. 25. Derselbe Stahl wie Abb. 23, aber durch zu langes Glühen bei 1100°C überhitzt, spröde, großes Korn.
Vergr. = 265 fach.

Abb. 27 stellt einen ungeglühten Stahlguß dar. Die Ferrit- und Perlitkristalle bilden hier Dreiecke. Man nennt diese Struktur Widmannstaettensche Figuren. Ein derartiges Gefüge weist auf ein sehr sprödes Material hin. Der Stahlguß ist in diesem Zustande nicht zu verwenden, er muß vorher sorgfältig geglüht werden.

Abb. 28 zeigt ebenfalls die Gußstruktur von Stahlguß. Diese Gefügeart nennt man Dendriten oder Bäumchenkristalle. Ein derartiger Stahlguß hat schlechte Festig-



Abb. 26. Grobkörniger geschmiedeter Stahl, bestehend aus Ferrit (hell) und streifigem Perlit (dunkel).



Abb. 27. Unausgeglühter spröder Stahlguß. Widmannstättensche Figuren. Vergr. = 265 fach.



Abb. 28. Stahlguß mit Dendriten (Bäumchenkristalle). Vergr. = 15 fach.



Abb. 29. Spröder Wellenstahl mit Schlackeneinschlüssen. Vergr. = 265 fach.

keitseigenschaften, meist tritt diese Struktur im ungeglühten Zustand bei größerem Phosphorgehalt auf.

Auf Abb. 29 ist ein Wellenstahl dargestellt, der sehr geringe Kerbzähigkeit aufwies. Bei näherer Untersuchung zeigten sich viele längliche Schlackeneinschlüsse.

Abb. 30 zeigt das kennzeichnende Gefüge von Walzstahl. Die Ferrit- und Perlitkörner werden durch den Walzvorgang zeilenförmig angeordnet, daher der Name Zeilenstruktur.

Abb. 31 zeigt den Stahl in seiner weichsten Form, der sonst streifige Perlit ist zu kleinen Körnern zusammen-



Abb. 30. Walzstahl mit Zeilenstruktur. Vergr. = 74 fach.



Abb. 31. Stahl weichgeglüht. Gefüge körniger Perlit. Vergr. = 265 fach.

geschrumpft, daher der Name körniger Perlit. Diese Struktur erhält der Stahl, wenn er in der Nähe des unteren Umwandlungspunktes bei ca. 700°C geüht wird.

Abb. 32 zeigt das sehr grobkörnige Gefüge von kohlenstofffreiem Elektrolyteisen, die hellen und dunklen Kristalle sind Ferritkristalle.

Abb. 33 zeigt das gleiche Elektrolyteisen wie Abb. 32. Die groben Körner wurden durch Walzen zertrümmert, dadurch erlangt das Material eine viel größere Zähigkeit.



Abb. 32. Grobkörniges, kohlenstoff-
freies Elektrolyteisen.
Vergr. = 11fach.



Abb. 33. Dasselbe Elektrolyteisen
wie in Abb. 32, aber durch Walzen
feinkörniger gemacht.
Vergr. = 265 fach.



Abb. 34. Feinkörniger, hochwertiger
Vanadinstahl.
Vergr. = 265 fach.



Abb. 35. Grauguß geringer Festig-
keit. Große Graphitadern.
Vergr. = 265 fach.

Abb. 34 stellt einen Vanadiumstahl dar. Die Hochwertigkeit des Materials äußert sich schon in einem außerordentlich feinen Korn.

Abb. 35 ist das Gefüge eines Gußeisens geringer Festigkeit (ca. 10 kg/mm²). Das perlitische Gefüge wird durch große lange Graphitadern durchzogen, was die Ursache der geringen Festigkeit ist.

Abb. 36 zeigt ein vorzügliches, nahezu rein perlitisches Zylindergußeisen. Die Graphitadern sind nur ganz schwach ausgebildet. Daher die hohe Festigkeit (22 kg/mm²).



Abb. 36. Zylinderguß hoher Festigkeit. Perlitisches Gefüge, schwache Graphitadern. Vergr. = 265 fach.



Abb. 37. Kornvergrößerung und Entkohlung durch örtliche Überhitzung an einer Stahlgleichrichterelektrode. Vergr. = 74 fach.

Abb. 37 stellt das Gefüge einer Gleichrichteranode aus Stahl dar. Die helleren Teile zeigen ein sehr grobes rein ferritisches Korn, welches durch örtlich starke Überhitzung entstand; außerdem ist an diesen Stellen der Kohlenstoff von innen nach außen gewandert. Die weiter innen liegenden nicht überhitzten Teile haben ein feines Korn und den höheren ursprünglichen Kohlenstoffgehalt.

Abb. 38 stellt das Gefüge von Monellmetall dar (Nickel 60% und Kupfer 40%). Das Bild ist aus einer gestauchten



Abb. 38. Monellmetal. Stauchfasern.
Vergr. = 74 fach.



Abb. 39. Nickelstahl. Risse durch
innere Spannungen.
Vergr. = 265 fach.



Abb. 40. Lagerweißmetal. Antimon-
kristall (grob), Bleizinnkristall (fein).
Vergr. = 212 fach.

Turbinenschaufel entnommen. Man sieht deutlich die Stauchadern.

Abb. 39 stellt Nickelstahl dar, in dem durch innere Spannungen Risse entstanden sind.

Abb. 40 zeigt das Gefüge von Lagerweißmetal. Man erkennt deutlich die groben Antimonkristalle, die in die feinen Bleizinnkristalle eingebettet sind und dem Weißmetal seine Härte verleihen.

c) Die Röntgen-Metallographie.

In allerneuester Zeit ist es gelungen, die Röntgenstrahlen zur praktischen Werkstoffuntersuchung heranzuziehen.

Am bekanntesten ist das Verfahren, das Werkstück zu durchleuchten bzw. zu photographieren zu dem Zwecke, Luftblasen, Schlacken, Einschlüsse, schlechte Bindungen und Ungleichmäßigkeiten aller Art im Innern von Metallstücken nachzuweisen. Daß dies möglich ist, rührt daher, daß die einzelnen Stoffe eine verschiedene Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen besitzen, die in erster Linie um so geringer ist, je dichter der Stoff ist. Aber nicht nur auf die Dichte, sondern auch auf das Atomgewicht kommt es bei der Absorption der Röntgenstrahlen an, und zwar wächst diese mit dem Atomgewicht außerordentlich stark an. Sie ist ungefähr proportional der dritten Potenz der Ordnungszahl der Elemente, d. h. der Zahl, welche die Stellung derselben in der Reihe der nach dem Atomgewicht geordneten Elemente angibt. Bei den leichteren Elementen ist die Ordnungszahl etwa gleich dem halben Atomgewicht, bei den schwereren etwas kleiner (Sauerstoff: Atomgewicht = 16, Ordnungszahl = 8; Eisen: Atomgewicht = 56, Ordnungszahl = 24; Wolfram: Atomgewicht = 184, Ordnungszahl = 74). Die Absorption der Röntgenstrahlen ist eine rein atomare Eigenschaft, unabhängig von den Aufbauverhältnissen der Atombindungen, die sich bei der Absorption der gewöhnlichen Lichtstrahlen stark bemerkbar machen. Sie ist die gleiche, einerlei ob das Element als solches vorliegt, z. B. metallisches Eisen, oder ob es in Form einer Verbindung, z. B. Eisensulfat, vorhanden ist.

Bei Fehlerstellen in leichteren Metallen mit niedriger Ordnungszahl, besonders bei Luft Einschlüssen, liegen somit die Bedingungen für die Röntgendurchleuchtung sehr günstig, da Luft (Stickstoff und Sauerstoff) sehr durchlässig sind.

Anders ist es bei den schweren Metallen mit hoher Ordnungszahl. Da diese eine sehr starke Absorption auf-

weisen, so haben sich die großen Hoffnungen, die man anfänglich an das Durchleuchtungsverfahren knüpfte, nicht ganz erfüllt. Um nämlich eine Fehlstelle abbilden zu können, muß man das Metallstück wenigstens an seinen durchlässigsten Stellen, d. h. an seinen Fehlerstellen durchleuchten. Nun ist aber selbst bei harter, d. h. durchdringender Strahlung schon hinter einer Schicht von einigen Millimetern Dicke nur bei den leichten Metallen und Legierungen (Aluminium und Elektronmetall) noch eine einigermaßen beträchtliche Intensität vorhanden, z. B. bei Aluminium nach 10 mm noch etwa 20%. Bei den schweren Metallen ist der Intensitätsabfall durch Absorption noch stärker. Man hat zwar die Schwierigkeiten der starken Absorption der Metalle dadurch zum Teil behoben, daß man durch Anwendung höherer Spannung immer härtere, durchdringungsfähigere Strahlen erzeugte. Aber ein Nachteil ist bisher noch geblieben; die Fehlerstellen müssen um so größer sein, je härter die Strahlung ist, um das Minimum an Differenzierung zu erreichen, bei dem noch eine unterschiedliche Schwärzung der Platte erzielt werden kann. Der weitere Fortschritt hängt gegenwärtig von einer Verbesserung der photographischen Platten ab. Die Grenzen der Anwendbarkeit der Röntgenstrahlen zur Aufsuchung von Materialfehlern sind demnach durch die Dicke der Metallstücke bestimmt (man wird gegenwärtig nicht über 6 cm dicke Stahlstücke hinausgehen können), ferner dadurch, daß man selbst bei dünnen Metallstücken Haarrisse, ganz feine Blasen nicht nachweisen kann.

Aber in einer anderen Richtung scheinen die Röntgenstrahlen berufen zu sein, der Metallforschung große Dienste zu leisten. Durch die bekannte Lauesche Entdeckung der Abbeugung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch kristalline Stoffe ist die alte Vorstellung der Kristallo-

graphie vom regelmäßigen Aufbau der Kristalle aus ihren kleinsten Teilen, den Atomen, von einer brauchbaren Arbeitshypothese zur vollen physikalischen Gewißheit erhoben worden. Man hat damit die Möglichkeit erlangt, Aufschluß über die Metallstruktur, den Gefügebau und die Kristallitlagerung zu erhalten. Durch die röntgenographische Methode sind wir imstande, zuverlässige Angaben über den Aufbau der Metallkristalle aus den Atomen zu machen und den Atomabstand genau anzugeben. Man findet, daß die Atome nach einfachen geometrischen Gesetzen räumlich verteilt sind: Durch die Mittelpunkte der Atome können parallele Ebenensysteme gelegt werden, die sich gegenseitig unter einem bestimmtem Winkel schneiden und die das als Raumgitter bezeichnete, für den Aufbau eines Metalls kennzeichnende Gebilde darstellen. Bei den meisten in der Technik vorkommenden Metallen ist das Raumgitter aus der Würfel- oder dem auf ein gleichseitiges Dreieck aufgebauten Prisma ableitbar. Die einzelnen Elementarzellen reihen sich stetig aneinander an und füllen gleichmäßig und lückenlos den Raum aus. Gewöhnlich weist ein Metall, je nach der Vorbehandlung, verschiedene Atomanordnungen auf; dies scheint geradezu das Kennzeichen der verschiedenen Arten ein und desselben Stoffes zu sein. Zum Beispiel hat das α -Eisen, also der gewöhnliche ausgeglühte Stahl, ein kubisch-raumzentriertes Gitter mit einer Seitenlänge des Elementarwürfels von $2,86 \cdot 10^{-8}$ cm (siehe Abb. 41). Die Atome sitzen in den Würfecken und im Schwerpunkt des Würfels. Demgegenüber hat das γ -Eisen, also die Modifikation des austenitischen unmagnetischen Stahles, ein kubisch-flächenzentriertes Raumgitter (siehe Abb. 42). Die Atome sitzen in den Würfecken und in jedem Würfel-flächenmittelpunkt. Die Atomanordnung ist also dichter als bei raumzentriertem Eisen.

Die Röntgenmetallographie befindet sich zur Zeit noch in den ersten Anfängen. Ihre Hauptaufgabe besteht gegenwärtig darin, durch planmäßige Untersuchungen die typischen Strukturbilder für die einzelnen Metalle und Legierungen unter den verschiedensten Bedingungen ausfindig zu machen. Da die Röntgenstrahlen die Materie durchdringen, da sie uns einen Einblick in das Innere der Materie und den Atomaufbau gewähren, so besteht begründete Aussicht, daß sie uns in den Stand setzen, neue

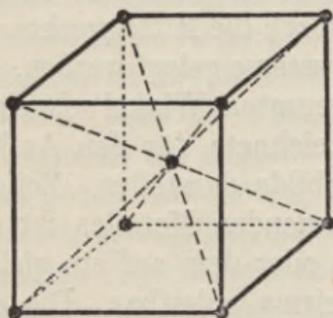


Abb. 41. Atomanordnung bei gewöhnlichem, ausgeglühtem Stahl (α -Eisen).

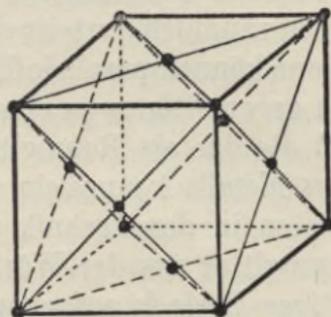


Abb. 42. Atomanordnung bei austenitischem, unmagnetischem Stahl (γ -Eisen).

klare Vorstellungen über die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, insbesondere über das Wesen der Festigkeitseigenschaften zu erlangen. Und wenn wir auch über die letzten Fragen vielleicht immer im unklaren bleiben, so berechtigen uns doch die Ergebnisse der Röntgenstrahluntersuchungen zu der Hoffnung, daß schon in nächster Zeit viele der uns heute quälenden Materialfragen gelöst werden.

IV. Die Legierungen des Eisens.

1. Die Legierungsfähigkeit des Eisens und die Benennung der wichtigsten Eisenarten.

Der wichtigste Werkstoff des Maschinenbaues ist das Eisen. Es übertrifft an Bedeutung alle anderen Werkstoffe, ja man kann sagen, daß der Maschinenbau ohne diesen wertvollen Werkstoff gar nicht denkbar wäre. Die Maschinen bestehen zum größten Teil aus Eisen. In der Technik versteht man unter Eisen nicht das Element Eisen, sondern stets eine Legierung des Eisens mit anderen Elementen; denn das chemisch reine Eisen ist sehr schwer herzustellen und daher sehr teuer. Andererseits ist es aber sehr weich und daher für die meisten technischen Zwecke nicht brauchbar. Das Eisen verdankt seine beherrschende Stellung im Maschinenbau, ja in der ganzen Technik, seiner wunderbaren Legierungsfähigkeit mit anderen Elementen, die es ermöglicht, ihm große Weichheit und große Härte, geringe und große Festigkeit, geringe und große Zähigkeit zu verleihen. Die im technischen Eisen vorkommenden Legierungselemente gelangen teils unbeabsichtigt in das Eisen, weil sie entweder schon in den Eisenerzen enthalten sind oder bei der Eisengewinnung hinzukommen, zum Teil aber werden sie zur Erlangung bestimmter Eigenschaften absichtlich zugesetzt. Zur ersten Gruppe dieser Legierungsbestandteile gehören Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Arsen, Kupfer, Silizium und Mangan, zur letzteren Nickel, Chrom, Wolfram, Molybdän, Kobalt und Aluminium usw. Obwohl Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel wohl in jedem technischen Eisen, wenn auch in geringer Menge vorkommen, weil dies durch die Herstellungsart bedingt ist, so kann aber auch bewußt ein bestimmter Gehalt an diesen

Elementen zur Erzielung gewisser Eigenschaften dem Eisen zugefügt werden. Dies gilt ganz besonders vom Kohlenstoff, der der wichtigste Legierungsbestandteil des Eisens ist. Sein Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des Eisens ist so groß, daß die durch ihn verursachten Unterschiede seit alters die Grundlage bilden für die Einteilung des Eisens in mehrere Arten. Zwar ist die Legierungsfähigkeit von Kohlenstoff und Eisen ziemlich beschränkt, in der Regel übersteigt der Gehalt des technischen Eisens an Kohlenstoff nicht mehr wie $4\frac{1}{2}\%$, aber dieser kleine Betrag reicht vollauf hin, um dem Eisen so verschiedenartige Eigenschaften zu verleihen, daß z. B. ein Eisen von $0,1\%$ Kohlenstoff und ein solches von $4\frac{1}{2}\%$ Kohlenstoff in Aussehen und mechanischen Eigenschaften derartige Unterschiede aufweisen, wie wenn sie zwei ganz verschiedene Metalle wären. Während das erstere weich und zähe ist, sich im heißen Zustande schmieden läßt und im kalten Zustande verarbeiten und zu feinsten Drähten ziehen läßt, ist das letztere hart und spröde und läßt sich nicht schmieden und auch nicht ziehen.

Bei Berücksichtigung der Menge des in dem Eisen enthaltenen Kohlenstoffes läßt sich folgende Einteilung machen:

1. Roheisen mit einem Kohlenstoffgehalt von mehr als $1,7\%$. Es läßt sich leicht gießen, dagegen weder schmieden, walzen, hämmern und verträgt keinerlei Art mechanische Formgebung durch Kalt- und Warmreckung.

2. Schmiedbares Eisen mit weniger als $1,7\%$ Kohlenstoff. Es läßt sich infolge seiner Biagsamkeit durch Walzen, Pressen, Schmieden im heißen Zustande in beliebige Formen bringen.

Die angegebene Grenze zwischen Roheisen und schmiedbarem Eisen ist indessen nicht als scharf aufzufassen, da der Übergang von dem schmiedbaren Zustande in den nicht

schmiedbaren mit steigendem Kohlenstoffgehalt oder infolge Anwesenheit von anderen Elementen allmählich verläuft.

Das im heutigen Wirtschaftsleben verwendete Eisen wird im Hochofen als Roheisen aus den Eisenerzen gewonnen. Der größere Teil des aus dem Hochofen kommenden Roheisens (ca. 80%) dient zur Erzeugung von schmiedbarem Eisen oder Stahl. Der kleinere Teil (ca. 20%) dient zur Herstellung von Gußwaren. Auf Tafel 5 ist eine Übersicht über die Benennung der Eisenarten nach ihrer Herstellungsart gegeben.

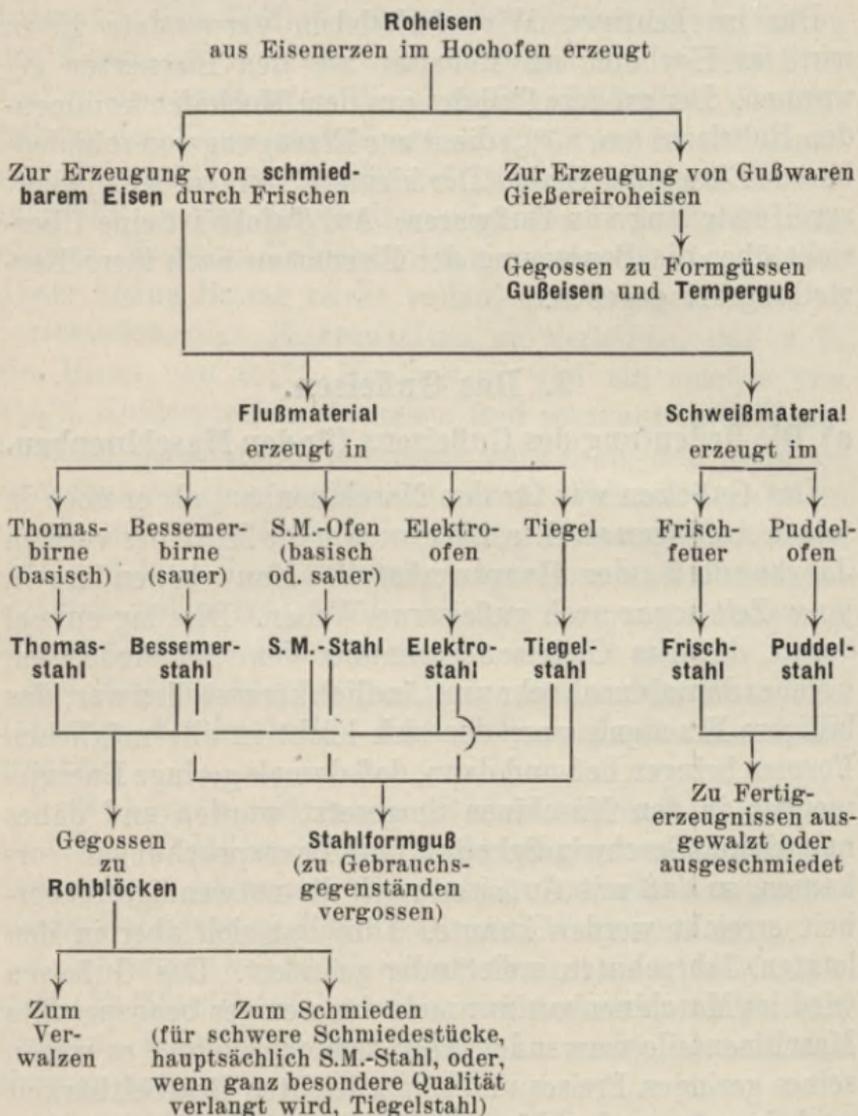
2. Das Gußeisen.

a) Die Bedeutung des Gußeisens für den Maschinenbau.

Das Gußeisen war für den Maschinenbau, als er noch in seinen Anfängen steckte, bis etwa um die Mitte des vorigen Jahrhunderts, der Hauptwerkstoff. Man verwendete in jener Zeit sogar noch gußeiserne Wellen. Dies lag einmal daran, daß das Gußeisen gegenüber dem Schmiedeeisen, welches damals noch sehr umständlich herzustellen war, das billigere Erzeugnis war, das sich leicht in alle möglichen Formen bringen ließ und dann, daß damals geringe Energiemengen in den Maschinen umgesetzt wurden und daher nur kleine Geschwindigkeiten und Beanspruchungen vorkamen, so daß mit Gußeisen noch die notwendige Sicherheit erreicht werden konnte. Dies hat sich aber in den letzten Jahrzehnten vollständig geändert. Das Gußeisen wird im Maschinenbau nur mehr für weniger beanspruchte Maschinenteile verwendet, aber dennoch kommt es wegen seines geringen Preises und seiner leichten Bearbeitbarkeit noch in sehr großen Mengen für die verschiedensten Verwendungszwecke vor. Die Tonnenzahl des im Maschinenbau verwendeten Gußeisens ist noch im langsamen Steigen

Tafel 5.

Benennung des Eisens nach seiner Herstellungsart
(n. Heyn, Eisenkohlenstofflegierungen)



Zementstahl: Durch Erhitzen von kohlenstoffarmem Stahl in Berührung mit kohlenstoffhaltigen Stoffen.

Sonderstähle: Flußmaterialien mit besonderen Zusätzen, z. B.: Ni, Cr, Wo, Mo, Van, Ti oder größeren Mengen von Si, Mn,

begriffen infolge der Erzeugungszunahme und der immer weiteren Ausdehnung des Maschinenbaus. Von den 20% der deutschen Roheisenerzeugung, die auf Gießereiroheisen entfallen, kommen reichlich 10% auf den Maschinenbau. Im Jahre 1909 wurde in Deutschland ungefähr 1 Million Tonnen Maschinenguß hergestellt.

Dem Verwendungszweck nach läßt sich das Gußeisen in eine Reihe von Klassen einteilen. Der Normenausschuß deutscher Industrie hat zwanzig solcher Klassen aufgestellt. Man ersieht hieraus die vielseitige Verwendung des Gußeisens in der Technik und Wirtschaft. Es seien davon nur genannt der Kunstguß, der Büsten und Statuen umfaßt, der Feinguß, der Verzierungen für Säulen, Türen, Möbel betrifft, der Bauguß, der sich mit der Herstellung von Platten, Säulen, Röhren befaßt usw. Für den Maschinenbau kommen hauptsächlich die Klassen 8, 9 und 10 in Betracht. Diese befassen sich mit dem gewöhnlichen Maschinenguß, ferner mit dem Maschinenguß von bestimmten Vorschriften.

b) Die Herstellung des Gußeisens und seine physikalisch-technischen Eigenschaften.

Das aus dem Hochofen kommende Eisen ist im allgemeinen nicht geeignet, unmittelbar in fertige Form gegossen zu werden, da es nicht die Zusammensetzung hat, die für die verschiedenen Zwecke notwendig ist. In Deutschland beträgt die Menge der unmittelbar aus dem Hochofen gegossenen Waren nur ca. 5%. Der Hochofenguß kommt nur für einfache Gußstücke in Frage, an die keine besonderen Forderungen gestellt werden. Für die Zwecke des Maschinenbaues, wo neben hoher Festigkeit leichte Bearbeitung und porenfreie Beschaffenheit der bearbeiteten Flächen verlangt wird, genügt der Hochofenguß nicht.

Man versteht heutzutage unter Gußeisen in der Regel ein Eisen zweiter Schmelzung, das durch ein- oder mehrmaliges Umschmelzen aus Roheisen allein oder mit Bruch-eisen, Stahlabfällen und anderen Schmelzzusätzen gewonnen wird. Es wird in Formen gegossen, ohne einer weiteren Nachbehandlung zwecks Schmiedbarmachung unterzogen zu werden. Es gehört zu den spröden Werkstoffen und bricht ohne vorherige Dehnung und hat nur eine sehr geringe Kerbzähigkeit. Wenn man es einem Zugversuch unterwirft, findet man, daß es keine Elastizitätsgrenze besitzt, es folgt nicht dem Hookeschen Elastizitätsgesetz. Sein Elastizitätsmodul schwankt mit zunehmender Belastung zwischen 1 000 000 und 400 000 kg/cm². Es ist leichter als das reine Eisen, sein Einheitsgewicht beträgt nur 7,25. Es geht beim Erhitzen auf 1200° C plötzlich vom festen in den flüssigen Zustand über. Es läßt sich verhältnismäßig leicht selbst in die verwickeltsten Formen vergießen. Sein Schwindmaß beträgt rund 1%, für ganz große Stücke von über 800 mm Länge und Breite beträgt es nur 0,8%. Sein Kohlenstoffgehalt schwankt zwischen 2—4%.

Je nach der Menge des als Graphit ausgeschiedenen Kohlenstoffes unterscheidet man:

a) Graues Gußeisen (Grauguß) mit starker Graphitabscheidung. Dieses hat geringe Härte und läßt sich leicht verarbeiten.

b) Halbgraues Gußeisen mit geringer Graphitbildung. Es ist hart und läßt sich nur schwer bearbeiten.

c) Weißes Gußeisen ohne Graphitabscheidung. Es läßt sich nicht bearbeiten.

d) Hart- oder Schalenguß mit weißer, abgeschreckter Außenzone und grauem, weichem Kern.

Zur Herstellung des Gußeisens dienen folgende vier Umschmelzverfahren:

1. Das Tiegelschmelzverfahren. Bei ihm kommt der Schmelzinhalt mit dem Brennstoff nicht in Berührung, was für die Güte des Erzeugnisses sehr günstig ist. Das Verfahren ist aber sehr unwirtschaftlich und kommt daher nur wenig mehr zur Verwendung.

2. Der Flammofen. Hier können rohe Brennstoffe verwendet werden, auch können sehr große Stücke, wie Bruchstücke von Walzen ohne Zerkleinerung eingesetzt werden, auch läßt sich der Silizium- und Mangangehalt leicht regeln. Leider ist aber ebenso wie beim Tiegelofen die Brennstoffausnützung sehr schlecht, so daß das Verfahren ebenfalls ziemlich unwirtschaftlich ist.

3. Das Hauptumschmelzverfahren ist das mit dem sog. Kupolofen. Dieser ist wegen der guten Brennstoffausnützung, der einfachen Handhabung des Betriebes, der geringen Anlage- und Unterhaltungskosten den anderen Öfen überlegen und wird daher in der Regel verwendet. Die Brennstoffausnützung beim Kupolofen beträgt 40 bis 60%, während sie beim Flammofen nur 8—10% und beim Tiegelofen gar nur 4% erreicht.

In neuester Zeit kommt noch ein viertes Verfahren zur Anwendung, das Umschmelzen im elektrischen Ofen. Dieses eignet sich besonders für Qualitätsguß kleinerer Abmessungen, ist aber normalerweise sehr teuer und nur da lohnend, wo äußerst billiger elektrischer Strom zur Verfügung steht.

Um bei einem Gußeisen die für einen bestimmten Zweck erforderlichen Eigenschaften wie Härte, Dichte, Festigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen und Temperaturwechsel, Sicherheit gegen Verziehen und Reißen zu erhalten, werden verschiedene Sorten Gießereiroheisen, Brucheisen, Stahlabfälle und andere Schmelzzusätze miteinander vermengt und zusammengeschmolzen. Man nennt die richtige Auswahl und das Vermengen von Gie-

Bereiroheisen und Brucheisen, daß eine verlangte chemische Zusammensetzung des Eisens entsteht, das Gattieren. Um richtig zu gattieren, muß man vor allem wissen, welche chemische Zusammensetzung die Gußstücke haben müssen, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Man muß also über den Einfluß der verschiedenen Eisenbegleiter auf das Gußeisen unterrichtet sein. Ferner muß man die Schmelzvorgänge kennen; denn das Umschmelzen verändert das Eisen in ziemlich bedeutendem Maße.

Die Hauptlegierungsbestandteile des Gußeisens sind: Kohlenstoff, Phosphor, Silizium, Mangan und Schwefel. Der Kohlenstoff tritt im Gußeisen in drei Formen auf:

1. als Graphit,
2. als Karbidkohle, als Bestandteil der chemischen Verbindung Fe_3C ,
3. als Härtungskohle.

Das graue Gießereiroheisen zeichnet sich durch seinen reichen Anteil an Graphit aus, der oft fast 90% ausmacht. Bei siliziumreichem Roheisen kann der Graphitgehalt sogar 100% des Kohlenstoffes ausmachen. Im Gegensatz dazu fehlt beim weißen Roheisen der Graphit vollständig, der Kohlenstoff ist hier nur als Härtungskohle und Karbidkohle vorhanden. Die Graphitbildung wird durch folgende Umstände beeinflusst:

1. Langsame Abkühlung eines Gußstückes begünstigt, schnelle Abkühlung erschwert die Graphitbildung.

2. Silizium begünstigt, Mangan erschwert die Graphitbildung.

3. Schwefel erschwert die Graphitbildung, Phosphor begünstigt sie etwas.

4. Drückt man den Kohlenstoffgehalt herab, z. B. durch Eingattierung von Schmiedeeisenabfällen und kohlenstoffarmen Roheisen, so senkt man gleichzeitig den Graphitgehalt.

Will man also ein weiches Gußeisen erzielen, so muß man für langsame Abkühlung Sorge tragen, in diesem Falle bedient man sich einer schlecht leitenden Sandform. Andererseits erreicht man durch Gießen in eine gut leitende Kokille hartes, weißes oder halbweißes Gußeisen. Aus den gleichen Gründen wird ein Gußstück mit größerer Wandstärke oft graues Gußgefüge haben und weich sein, während ein dünnwandiges Gußstück leicht weißes Gußgefüge zeigt und hart ist. Daher muß man die Gattierung der Wandstärke anpassen. Dies läßt sich am leichtesten durch Regelung des Siliziumgehaltes erreichen. Dieses vermindert die Aufnahmefähigkeit des Eisens für den Kohlenstoff, außerdem begünstigt es die Graphitbildung. Die richtige Wahl des Siliziumgehaltes ist die Grundbedingung für die Gattierung. Will man einen Guß von hoher Festigkeit und großer Dichte erzielen, so muß man den Siliziumgehalt herabdrücken. Man darf aber nicht zu weit gehen, weil mit abnehmendem Siliziumgehalt die Schwindung des Gußeisens beim Erstarren steigt und damit die Gefahr von Lunkern und inneren Spannungen wächst.

Im Gegensatz zu Silizium begünstigt Mangan die Aufnahmefähigkeit des Eisens für Kohlenstoff, vermindert aber die Graphitausscheidung. Mangan wirkt günstig auf die Festigkeit ein, vermehrt aber die Schwindung. Gewöhnlich geht man mit dem Mangangehalt nicht über 0,8% hinaus. Will man diese Grenze überschreiten, so muß man gleichzeitig den Siliziumgehalt vermehren. Während Silizium und Mangan, im richtigen Maß vorhanden, im Gußeisen nützlich sind, muß Schwefel im Gußeisen unter allen Umständen als Schädling angesprochen werden; denn er vermehrt die Härte und Sprödigkeit und in gleichem Maße auch die Schwindung und damit die Neigung zu inneren Spannungen und zu Lunkern. Aus

all diesen Gründen soll der Schwefelgehalt möglichst niedrig sein. Nicht ganz so ungünstig verhält sich der Phosphor im Gußeisen. Er begünstigt die Graphitausscheidung und damit die Bearbeitbarkeit. Man kann bei Gußeisen im Gegensatz zu schmiedbarem Eisen mit dem Phosphorgehalt bis gegen 1% gehen. Bei hochbeanspruchten Gußstücken, namentlich solchen, die starken Temperaturschwankungen ausgesetzt werden, darf man allerdings den Phosphorgehalt nicht erheblich über 0,1% steigen lassen. Der phosphorarme Guß hat auch den Vorteil, daß er größere Schlagfestigkeit besitzt. Außerdem neigt er weniger zur Lunkerbildung.

3. Das schmiedbare Eisen oder der Stahl.

a) Die Bedeutung des schmiedbaren Eisens für den Maschinenbau.

So nützlich das Gußeisen im Maschinenbau ist und so vielseitig es dort auch angewendet wird, so tritt es doch gegenüber dem schmiedbaren Eisen an Bedeutung zurück; denn es kann nur dort verwendet werden, wo das Material verhältnismäßig wenig beansprucht wird. Für alle Maschinenteile, bei denen hohe Beanspruchungen, sei es durch Stöße oder Fliehkräfte, auftreten können, wo durch einen Bruch schwere Unglücksfälle und Zerstörungen hervorgerufen werden können und besonders auch da, wo wie bei den Maschinen der Land-, Wasser- und Flugfahrzeuge auf Leichtigkeit der Konstruktion gesehen werden muß, muß statt des Gußeisens das schmiedbare Eisen verwendet werden. Wir finden es daher bei allen hochbeanspruchten Triebwerksteilen unserer Dampfmaschinen, Verbrennungsmotoren, Kompressoren, Turbinen, Werkzeugmaschinen und sonstigen Arbeitsmaschinen. Das schmiedbare Eisen hat es erst ermöglicht, daß wir Maschinen mit den heute

vorkommenden gewaltigen Leistungen ausführen können. Es sei nur an die Dampf- und Wasserturbinen für Leistungen von 20000 KW und darüber erinnert. Diese allseitige Anwendung, besonders da, wo die anderen Werkstoffe versagen, hat das schmiedbare Eisen infolge seiner vollkommenen Festigkeitseigenschaften gefunden. Diese machen das schmiedbare Eisen zum nützlichsten und wertvollsten Werkstoff für die ganze Technik und Wirtschaft.

b) Die Benennung des schmiedbaren Eisens.

Das schmiedbare Eisen wurde bisher in Deutschland in Schmiedeeisen und Stahl eingeteilt. Bei dieser Unterteilung ging man von der Tatsache aus, daß Stahl härter, fester und spröder ist als Schmiedeeisen und daß sich bei ihm durch Abschrecken eine größere Härtesteigerung erzielen läßt als beim Schmiedeeisen. Man hat ursprünglich willkürlich einen Kohlenstoffgehalt von ca. 0,5% als Grenze zwischen beiden Eisensorten angenommen. Aber diese Unterscheidung hat nicht befriedigt, weil sie keine scharfe Grenze zwischen härtbarem und nicht härtbarem Schmiedeeisen gibt. Späterhin ging man dazu über, die Zugfestigkeit als Unterscheidungsmerkmal zu nehmen. Nach den Bestimmungen der Eisenbahnverwaltungen, sowie nach den Vorschlägen des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik sollte alles Eisen mit mehr als 50 kg/mm^2 Zugfestigkeit als Stahl und das mit weniger Festigkeit als Schmiedeeisen bezeichnet werden. Aber diese Unterscheidung ist noch viel unklarer, weil die Festigkeit sehr von der mechanischen und thermischen Vorbehandlung abhängig ist. Dadurch kann leicht der Fall eintreten, daß das gleiche Material das eine Mal als Stahl, das andere Mal als Schmiedeeisen bezeichnet werden muß. So ist denn in Deutschland der Begriff Stahl bis heute noch schwankend geblieben. Man sprach bisher

immer von Stahlwerken, selbst dann, wenn die betreffenden Werke ausschließlich weiches Thomasflußeisen unter 50 kg Zugfestigkeit erzeugten. In England und Amerika macht man keinen Unterschied zwischen Schmiedeisen und Stahl, man spricht nur von „steel“, ebenso kennt man in Frankreich und Italien nur das Wort „acier“ bzw. „acciaio“, den Grad der Härte drückt man durch Bezeichnungen wie weich, hart, besonders hart aus. Da es nach dem Geschilderten schwer möglich ist, eine scharfe eindeutige Grenze zwischen schmiedbarem Eisen und Stahl zu ziehen, hat der Normenausschuß der Deutschen Industrie beschlossen, daß in Zukunft alles ohne Nachbehandlung schmiedbare Eisen als Stahl bezeichnet werden soll. Der im flüssigen Zustande gewonnene Stahl wird als Flußstahl und der im teigigen Zustande gewonnene Stahl als Schweiß- oder Puddelstahl bezeichnet. Die üblichen Handelsbezeichnungen sollen vorerst durch diesen Beschluß nicht berührt werden. Es ist also zulässig, weiterhin von U-Eisen, Doppel T-Eisen, Schrauben-Eisen, Nieteisen, Eisenblech usw. zu sprechen, während der Werkstoff selbst als Stahl zu bezeichnen ist.

c) Die Herstellungsverfahren des Stahles.

Dem Maschinenbau stehen für seine verschiedenen Verwendungszwecke folgende nach ihrer Herstellungsart geordnete Stahlarten zur Verfügung:

1. Der Tiegelstahl.
2. Der Elektrostahl (basisch und sauer zugestellt).
3. Der Siemens-Martinstahl (basisch und sauer zugestellt).
4. Der Bessemerstahl.
5. Der Thomasstahl.

Neben diesen im flüssigen Zustande gewonnenen Stahlarten kommt noch der Schweißstahl vor. Seine Be-

deutung tritt aber heutzutage gegenüber dem Flußstahl immer mehr zurück, obwohl in früheren Zeiten fast alles schmiedbare Eisen Schweißstahl war. Maßgebend für die Anwendung einer der genannten Stahlarten sind die Festigkeitsansprüche, die man an die Erzeugnisse stellt und ferner die Wirtschaftlichkeit der Herstellungsverfahren, die nach der Örtlichkeit und den besonderen Umständen verschieden sein kann.

Von allen metallurgischen Stahlherstellungsverfahren liefert das Tiegelstahlverfahren das reinste, an Güte am höchsten stehende Erzeugnis. Bei ihm gelingt es, Schlacken und fremde Einschlüsse auf das kleinste Maß herabzusetzen. Leider ist das Tiegelstahlverfahren sehr unwirtschaftlich gegenüber den neueren Verfahren. Daher wird das Anwendungsgebiet des Tiegelstahls durch die zunehmende Vervollkommnung des Elektrostahl- und des Martinverfahrens immer mehr eingeschränkt. Trotzdem läßt sich das Tiegelstahlverfahren für viele höchst beanspruchte Konstruktionsteile, deren Bruch großen wirtschaftlichen Schaden verursacht, nicht entbehren. Benötigt man Stahl, an den die höchsten Anforderungen chemischer und mechanischer Reinheit und Fehlerfreiheit gestellt werden, besonders auch dann, wenn es sich um Schmiedestücke größerer Abmessungen aus legiertem Nickel- oder Chromnickelstahl handelt, so kommt nur das Tiegelstahlverfahren in Frage. Es ist höchst unwahrscheinlich, daß jemals eines der genannten neueren Verfahren das Tiegelstahlverfahren wird ganz ersetzen können.

Die Bestrebungen, Stahl im elektrischen Ofen herzustellen, haben in neuerer Zeit zur Ausbildung der Elektrostahlerzeugung geführt.

Die verschiedenen im Gebrauch befindlichen Öfen lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen, die Lichtbogenöfen und die Induktionsöfen. Bei den Lichtbogenöfen wird die

Wärme unmittelbar durch den elektrischen Lichtbogen erzeugt. Bei den Induktionsöfen bildet das Schmelzgut den sekundären Stromkreis eines Transformators, in dem durch Induktion große elektrische Ströme erzeugt werden, die das Metall zum Schmelzen bringen. Die hauptsächlichsten Vertreter der Lichtbogenöfen sind:

1. der Ofen von Stassano,
2. der Ofen von Hérault,
3. der Ofen von Girod,
4. der Ofen von Keller.

Von den Induktionsöfen haben die weiteste Verbreitung der Ofen von Kjellin und der Ofen von Röchling-Rodenhauer gefunden.

Die im Elektrostahlöfen verlaufenden metallurgischen Vorgänge sind in der Hauptsache denen im Siemens-Martinöfen vor sich gehenden gleich. Man schmilzt entweder Schrott oder verwendet als Einsatz flüssiges Material, das im Siemens-Martinöfen oder in der Thomasbirne bereits gefrischt worden ist. Das Elektrostahlverfahren ist um so wirtschaftlicher, je geringer einerseits die Stromkosten sind und andererseits der Stromverbrauch ist. Wo billige Wasserkräfte zur Verfügung stehen, hat also das Elektrostahlverfahren die besten Aussichten. Die Höhe des Stromverbrauchs läßt sich dadurch verringern, daß dem Ofen schon flüssiges, vorgereinigtes Material zugeführt wird. Der im Elektroöfen erzeugte Stahl zeichnet sich durch besondere Reinheit aus und wird vornehmlich dann verwendet, wenn man an die Eigenschaften des Stahles besonders hohe Anforderungen stellen muß. Er ist nach dem Tiegelstahl der beste Stahl.

Die Mehrzahl der Konstruktionsstähle des Maschinenbaues werden heute wegen der geringeren Kosten im Siemens-Martinöfen hergestellt. Dieses Verfahren dient

hauptsächlich auch dazu, die bei der Weiterverarbeitung in den Betrieben in großen Mengen entstehenden Abfallstücke, sowie die im heutigen Wirtschaftsleben entstehenden ungeheuren Mengen Alteisen (Schrott) wieder zu verwerten. Das Siemens-Martinverfahren steht aber auch als selbständiges Frischverfahren zur Erzeugung von schmiedbarem Eisen aus Roheisen heutzutage dem Windfrischverfahren (Bessemer und Thomasverfahren) kaum nach. In bezug auf die Erzeugungsmenge übertrifft es sogar alle anderen Verfahren. In der Regel wird das basische Verfahren angewendet, für gewisse Zwecke jedoch, wenn auf besondere Güte des Erzeugnisses gesehen wird, benutzt man das saure Einschmelzverfahren, das aber die Verwendung reiner Einsätze verlangt.

Ebenso wie der Tiegelstahl kommt der Bessemer-Stahl wegen seiner geringen Wirtschaftlichkeit immer weniger zur Anwendung. Aber er läßt sich zur Herstellung gewisser Werkzeuge und Instrumente wegen seiner besonderen Härtungseigenschaften nicht entbehren.

Der Thomasstahl steht, was die erzeugte Menge anbetrifft, nur wenig dem Siemens-Martinstahl nach. Er kommt hauptsächlich als Weichstahl für Walzprodukte in Anwendung, so besonders für Form-, Stab- und Breitereisen, für Bleche, Bauwerkeisen, Brücken- und Eisenbahnmateriale. Der Thomasstahl ist somit kein eigentlicher Maschinenbaustahl, sondern kommt in der Regel nur für Hilfszwecke des Maschinenbaus zur Anwendung.

Wenn man einen bestimmten Stahl vor sich hat, so läßt sich nicht mit Bestimmtheit sagen, nach welchem metallurgischen Verfahren er hergestellt wurde. Wohl gibt es gewisse Anhaltspunkte, um z. B. Bessemer- und Thomasstahl voneinander zu unterscheiden, ebenso Siemens-Martinstahl von Tiegelstahl. Aber vollkommen einwandfrei läßt sich ein Unterschied nicht feststellen, ebenso

auch nicht hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften. Und doch besteht zwischen den Erzeugnissen der einzelnen Verfahren in Bezug auf ihre Güte ein Unterschied, wenn er auch mit den heutigen Prüfmethode nicht ohne weiteres im einzelnen nachweisbar ist. Dieser Unterschied äußert sich hauptsächlich darin, daß bei den verschiedenen Stahlherstellungsverfahren die schädlichen Einflüsse von verschiedener Bedeutung sind. Solche sind z. B. die im flüssigen Stahl aufgelösten Teilchen von nicht metallischen Fremdkörpern, ebenso gelöste Gase. Um die suspendierten fremden Teilchen und die Gase völlig aus dem Stahl herauszubringen, muß man die Möglichkeit haben, den flüssigen Stahl längere Zeit ruhig abstehen zu lassen, ohne daß durch die oxydierende Wirkung von Luft oder Flammgasen aufs neue solche schädlichen Teilchen gebildet werden. Diese Bedingung erfüllt das Tiegelstahlverfahren am vollkommensten. Nach ihm kommt das Elektrostahlverfahren und in jüngster Zeit auch das Martinverfahren infolge zahlreicher Verbesserungen.

Was den Tiegelstahl ferner vor den anderen Stählen auszeichnet, ist, daß sich bei ihm ohne weiteres die günstigste Gießtemperatur und Gießgeschwindigkeit einhalten läßt, bei der die Lunkerbildung, Seigerungen, Spannungen und Gase am unschädlichsten sind. Ist beispielsweise ein großer Block für ein besonders großes Schmiedestück zu gießen, so muß die Gießtemperatur so gewählt werden, daß auch der zuletzt gegossene Stahl noch nicht zu sehr abgekühlt ist. Um dies zu erreichen, muß man z. B. beim Martinverfahren die Gießtemperatur anfangs zu hoch wählen und gegen Schluß des Gießens etwas zu niedrig, so daß man im Mittel die richtige Gießtemperatur hat. Beim Tiegelstahlverfahren dagegen hat man von selbst während des Gießens selbst der größten Blöcke dauernd die günstigste Gießtemperatur, da aus dem Schmelzofen

nur so viel Tiegel entnommen werden, als man gerade braucht. Man kann aber leicht die Gießgeschwindigkeit regeln, indem man sie von einem bestimmten Augenblick an erhöht oder vermindert.

Außer diesen Unterschieden gibt es zwischen den einzelnen Stählen noch solche in der Formgebungsmöglichkeit. Der Maschinenbauer kann daher nicht für irgendeinen Zweck einen bestimmten Stahl vorschreiben, sondern er muß es im einzelnen Falle dem Metallurgen überlassen, welches Herstellungsverfahren er zur Erreichung von gewissen Eigenschaften am besten wählt.

d) Die Eigenschaften des Stahles.

α) Die Schmiedbarkeit.

Der Stahl hat ein Einheitsgewicht von etwa 7,8, er schmilzt bei 1400—1530° C, aber er geht nicht wie das Gußeisen plötzlich vom flüssigen in den festen Zustand über, sondern er bildet im glühenden Zustande eine teigige Masse, die eine große Formänderungsfähigkeit und Bildsamkeit besitzt und sich durch Druck oder Schlag in fast jede Form bringen läßt. Man nennt diese wertvolle Eigenschaft des Stahles seine Schmiedbarkeit. Er setzt dabei der Formänderung, dem Schmieden, Pressen, Walzen verhältnismäßig geringen Widerstand entgegen, ohne daß die Gefahr besteht, daß er bricht oder reißt.

Auch in festem Zustande bei gewöhnlicher Temperatur besitzt er noch ein gewisses Formänderungsvermögen. Er läßt sich namentlich bei niedrigem Kohlenstoffgehalt ziehen und recken. Der Widerstand, den er im kalten Zustande seiner Formänderung entgegengesetzt, seine Festigkeit, ist allerdings ein Vielfaches gegenüber dem im glühenden Zustande.

Verarbeitungstemperaturen von etwa 200—400° C, bei denen das schmiedbare Eisen eine blaue Anlauffarbe zeigt,

sind für das schmiedbare Eisen sehr gefährlich; es entsteht dadurch leicht die sog. Blausprödigkeit.

Im allgemeinen steigt die Schmiedbarkeit mit der Verarbeitungstemperatur. Sie nimmt ab mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt, oberhalb von 1,7% hat es seine Schmiedbarkeit fast ganz verloren.

Aber auch die anderen Legierungsbestandteile beeinflussen, wenn auch nicht in so starkem Maße die Schmiedbarkeit des Eisens. Das Silizium macht bei höheren Gehalten das Eisen ähnlich wie der Kohlenstoff weniger schmiedbar. Ein Manganengehalt bis zu 1% begünstigt das Schmieden, darüber hinaus setzt er die Schmiedbarkeit wieder herab. Während der Phosphor das Schmieden nicht beeinflußt, übt der Schwefel auf das Eisen eine äußerst ungünstige Wirkung aus. Er ruft bei Rotglut die sog. Rotbrüchigkeit hervor, d. h. es erhält bei der Bearbeitung in der Rotgluthitze leicht Risse. Daher soll der Schwefelgehalt bei schmiedbarem Eisen nie größer als 0,1% sein.

Enthält das Eisen große Mengen Schlackeneinschlüsse, so zeigt sich beim Schmieden eine Neigung zur Ribbildung. Diese Erscheinung nennt man „Faulbruch“.

β) Die Schweißbarkeit.

Das schmiedbare Eisen ist bei heller Weißglut so weich und bildsam, daß zwei aufeinandergelegte Stücke sich durch Hammerschläge oder Druck zu einem Ganzen vereinigen lassen, daß also eine vollkommene Bindung zwischen den Kristallen der zusammengeschweißten Teile auftritt. Die Schweißtemperatur ist sehr hoch, liegt jedoch unterhalb des Schmelzpunktes. Die Schweißbarkeit setzt voraus, daß die beiden zu vereinigenden Stücke an der zu schweißenden Stelle eine reine Berührungsfläche besitzen, also nicht von einer Rost- oder Schmutzschicht überzogen sind. Da aber das Eisen bei der hohen Schweißtemperatur

große Neigung zum Oxydieren zeigt, so wird die zu schweißende Stelle mit einem reduzierenden Mittel, z. B. mit feinem Sand oder einem sog. Schweißpulver, bestreut. Dieses bildet mit den Eisenoxyden eine leicht flüssige Schlacke, welche durch den zum Schweißen erforderlichen Druck weggepreßt wird, so daß die Schweißung der frei liegenden Metallflächen erfolgen kann. Ähnlich wie die Schmiedbarkeit ist die Schweißbarkeit um so größer, je reiner das Eisen ist. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt nimmt die Schweißbarkeit ebenfalls ab. Bei einem Gehalt von etwa 1% Kohlenstoff hat es nur noch eine ganz geringe Schweißbarkeit. Im allgemeinen geht man bei gutem, schweißbarem Stahl nicht über 0,5% Kohlenstoff. Auch das Mangan übt auf das Schweißen eine ungünstige Wirkung aus. Es soll bei kohlenstoffarmem Eisen nicht über 0,5% betragen. Der Siliziumgehalt soll ebenfalls 0,2% nicht übersteigen. Auch Schwefel und Phosphor wirken ungünstig, sie müssen aber auch mit Rücksicht auf die Festigkeitseigenschaften niedrig gehalten werden.

γ) Die Festigkeitseigenschaften des Stahles und die Mittel, sie zu beeinflussen.

Was den Stahl vor dem Gußeisen besonders auszeichnet, was ihm seine Überlegenheit vor allen anderen Metallen verleiht, das sind seine Festigkeitseigenschaften. Er hat vor allem eine größere Zerreißfestigkeit und namentlich eine höhere Zähigkeit als Gußeisen, was sich sowohl in größerer Dehnbarkeit als besonders in höherer Kerbschlagfestigkeit äußert. Es ist dasjenige Metall, bei dem das Hookesche Elastizitätsgesetz ziemlich streng erfüllt ist, ja es hat seinerzeit die Veranlassung zur Auffindung dieses Gesetzes gegeben. Sein Elastizitätsmodul ist sehr hoch, d. h. es dehnt sich bei Belastung innerhalb der Elastizitätsgrenze nur sehr wenig aus, er trägt

ca. 2100000 kg/cm². Seine Zerreißfestigkeit kann schwanken zwischen 25 kg/mm² bei reinem, kohlenstofffreiem Eisen und 300 kg/mm² bei hartem, gezogenem Stahldraht. Seine Dehnung beträgt 35% bei ganz weichem Eisen und kann abnehmen bis zu 0% bei gehärtetem Stahl. Seine Kerbzähigkeit kann von 0 bis 40 mkg/cm² ansteigen.

Noch stärker veränderlich ist seine Härte. Ganz reines Eisen ist so weich und biegsam wie Weichkupfer und hat nur eine Brinellhärte von ca. 65^o, es gibt aber Stähle, bei denen man 800 und mehr Brinellgrade erzielen kann. Man sieht also, daß sich bei Stahl Festigkeitseigenschaften der verschiedensten Art und Mannigfaltigkeit erreichen lassen und daß dadurch der Stahl für alle möglichen Anwendungen der Technik und namentlich des Maschinenbaues wie geschaffen ist. Es entsteht nun die Frage, welche Mittel man in der Hand hat, um diese verschiedenen Festigkeitseigenschaften zu erreichen. Man findet, daß es hauptsächlich drei Mittel sind, nämlich:

1. die chemische Zusammensetzung,
2. die mechanisch-metallurgische Verarbeitung,
3. die Wärmebehandlung.

Von diesen drei Möglichkeiten, die Festigkeitseigenschaften des Stahles zu beeinflussen, macht man in verschiedener Weise Gebrauch, je nach dem Zwecke, den man bei einer Konstruktion verfolgt, je nach den Abmessungen, der Art der Beanspruchung und dem Sicherheitsgrad, den man bei einer Konstruktion erreichen will. Man erreicht oft schon durch Anwendung eines dieser Mittel das Ziel, in schwierigen Fällen aber müssen unter Umständen alle drei angewendet werden.

1. Die chemische Zusammensetzung. Legiert man das Eisen mit irgendeinem anderen Stoff, so erhöht man damit die Härte und Festigkeit. Alle Elemente, die im

Stahl vorkommen können, selbst gelöste Gase, steigern seine Härte und Festigkeit, und es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß bisher kein Element gefunden wurde, durch dessen Zusatz zu Eisen dessen Härte abgenommen hätte. Von dieser Härte- und Festigkeitssteigerung darf man allerdings nur bei wenigen Elementen Gebrauch machen; denn bei den meisten ist sie gleichzeitig mit einer wesentlichen Herabsetzung der Zähigkeit und Zunahme ihrer Sprödigkeit verbunden. Wir erhalten also durch den Zusatz dieser Elemente eine verringerte Dehnung und namentlich eine verminderte Kerbzähigkeit. Am schädlichsten sind in dieser Beziehung Phosphor, Schwefel, Arsen, Wasserstoff und Stickstoff. Die stärkste Härtesteigerung bewirkt der Kohlenstoff, weniger beeinflussen die anderen Legierungselemente, wie Silizium, Mangan, Nickel, Chrom, Vanadium usw., die Härte. Dagegen können manche von diesen Legierungselementen, namentlich Nickel, Mangan, Wolfram und besonders Chrom, dem Eisen eine große Härte und Festigkeit verleihen, wenn sie nicht allein, sondern in Verbindung mit dem Kohlenstoff vorkommen. Man hat schon des öfteren den Versuch gemacht, eine Erklärung dafür zu finden, warum gerade der Kohlenstoff und in Verbindung mit ihm andere Stoffe einen so großen Einfluß auf die Härte und Festigkeit des Stahles ausüben. Aber eine befriedigende Antwort haben alle bisherigen Annahmen noch nicht gebracht. Man wird daher auf die weitere Entwicklung der Atommechanik warten müssen, denn von ihr allein ist, wie die Forschungsergebnisse der letzten Zeit zeigen, eine Antwort auf diese Frage zu erhoffen. Die Härte- und Festigkeitssteigerung des Stahles nimmt im allgemeinen bis ungefähr 1% des Zusatzelementes geradlinig zu. Darüber hinaus kann sie den verschiedensten Verlauf nehmen. Der Einfluß der verschiedenen Legierungsbestandteile auf die Härte des Stahles ist in Abb. 43

dargestellt. Bei den im Maschinenbau normalerweise verwendeten Stählen, den sog. Kohlenstoffstählen oder den unlegierten Stählen, bleibt der Gehalt der verschiedenen Legierungsbestandteile unter 1%. Der wichtigste Legierungsbestandteil, der Kohlenstoff, kommt darin von 0,05% bis etwa über 1% vor. Da er die Festigkeitseigenschaften des Stahles am stärksten beeinflußt, werden nach seinem Gehalt die Stähle eingeteilt in weiche und harte.

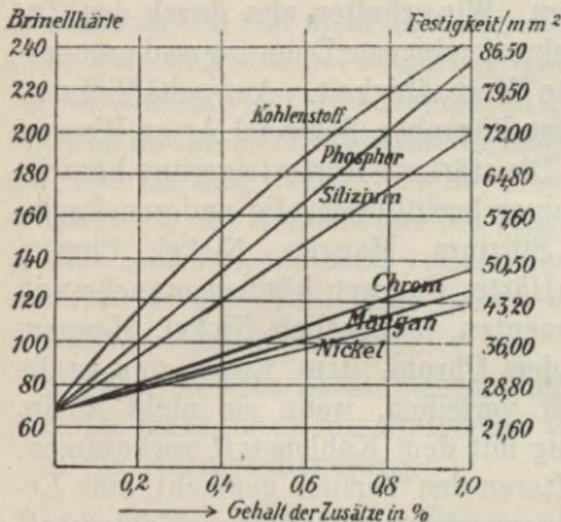


Abb. 43. Einfluß verschiedener Zusätze auf Härte und Zugfestigkeit des Stahles (nach Goerens).

Die anderen Legierungsbestandteile, wie Mangan und Silizium, kommen in den gewöhnlichen Stählen nur in einer Menge von höchstens 0,8% bzw. 0,3% vor. Bei den schädlichen Bestandteilen, wie Phosphor, Schwefel und Arsen darf der Gehalt in der Regel nicht mehr wie 0,05% betragen.

Als man seit den 70iger Jahren des vorigen Jahrhunderts die chemische Analyse der Stähle immer mehr entwickelte und den ungeheuren Einfluß des Kohlenstoffgehaltes fand, hat es nicht an Versuchen gefehlt, aus dem Kohlenstoffgehalt die Festigkeit des Stahles zu berechnen. Diese Bestrebungen haben bei reinen Kohlenstoffstählen, bei denen die sog. höheren Legierungsbildner, wie Nickel, Chrom und Wolfram, nicht vorhanden sind, zu einem gewissen Erfolge geführt. Man kann die Bruchfestigkeit gut ausgeglühten Stahles in

Abhängigkeit von dem Kohlenstoffgehalt etwa in folgende Formel kleiden:

$$\sigma_B = 25 + 80C \text{ (kg/mm}^2\text{)},$$

wobei unter C der Kohlenstoffgehalt in % zu verstehen ist. Diese Formel gilt nur bis 0,8% Kohlenstoffgehalt. Die Versuche, ähnliche Beziehungen für geschmiedetes und namentlich abgeschrecktes unlegiertes Material zu finden, haben dagegen noch zu keinem Erfolg geführt, weil die Einflüsse der Warmverarbeitung und Wärmebehandlung von zu vielen veränderlichen Umständen abhängen. Die chemische Zusammensetzung der Stähle bildet die Grundlage und Voraussetzung für ihre Festigkeitseigenschaften, aber diese hängen außerdem, namentlich bei den legierten Stählen, von der mechanisch-metallurgischen Verarbeitung und Wärmebehandlung ab. Es sollen daher diese vorher behandelt werden, bevor auf den Einfluß der chemischen Zusammensetzung der Stähle weiter eingegangen werden kann.

2. Die mechanisch-metallurgische Verarbeitung. Läßt man flüssigen Stahl erkalten, so erstarrt er zu lauter kleinen Kristallen, die ziemlich unregelmäßig angeordnet und von feinen, mit Gas gefüllten Hohlräumen durchsetzt sind. In diesem Zustande hat der Stahl in der Regel sehr schlechte mechanische Eigenschaften, er hat eine geringe Festigkeit und namentlich eine geringe Dehnung und Kerbzähigkeit. Betrachtet man sein Gefüge, so findet man, daß es verhältnismäßig grobkörnig ist, und zwar ist es um so grobkörniger, je heißer der Stahl vergossen wird. Ein 200° C oberhalb seines Schmelzpunktes zu einem Block vergossener Stahl hat ein viel gröberes Gefüge und hat viel schlechtere Festigkeitseigenschaften als ein unmittelbar oberhalb des Schmelzpunktes vergossener Stahl. Bei einem heißvergossenen Stahl haben nämlich die Kristalle

infolge der längeren Abkühlungsdauer eher die Möglichkeit, zu wachsen und sich auszubilden als bei einem kälter vergossenen Stahl. Zwischen Korngröße einerseits und Festigkeit und Zähigkeit andererseits besteht bei den Metallen und Legierungen im allgemeinen folgender Zusammenhang: Großes Korn = niedrige Festigkeit, Dehnung und Kerbzähigkeit. Kleines Korn = hohe Festigkeit, Dehnung und namentlich hohe Kerbzähigkeit.

Man hat nämlich gefunden, daß der Oberflächenzusammenhang zwischen zwei Kristallen ein festerer ist als der Zusammenhang innerhalb eines Kristalles. Man pflegt zu sagen, die intergranulare Festigkeit ist größer als die intragranulare. Wenn wir viele kleine Kristalle haben, so ist die Summe der Kristalloberflächen und damit die Festigkeit viel größer als bei großen Kristallen, weil die Oberfläche nur quadratisch mit der Länge abnimmt, der Rauminhalt dagegen mit der dritten Potenz der Länge. Von dem Mittel, den Stahl nur wenig oberhalb des Schmelzpunktes zu vergießen und dadurch feinkörniges Gefüge zu erhalten, kann man nur selten, im allgemeinen nur bei den dünnwandigen Güssen Gebrauch machen. In den meisten Fällen, namentlich aber bei großen Stahlstücken, die für große Maschinenteile benötigt werden, ist dies nicht möglich. Man muß, um feineres Korn und damit bessere Festigkeitseigenschaften zu erlangen, andere Mittel anwenden.

Die Warmverarbeitung (Das Schmieden).

Als das älteste und bewährteste Mittel, die Eigenschaften des Stahles zu verbessern, gilt das Warmverarbeiten oder Schmieden. Es bildet die Grundform der Weiterverarbeitung des Stahles und ist eines der ältesten Handwerke, das auch heute noch ausgeübt wird. Im Laufe der Zeit ist man aber von der Kraft des menschlichen Armes

auf die Anwendung der Elementarkräfte übergegangen. Man erfand zur Durchschmiedung von größeren Stahlstücken den Dampfhammer. Für größere Schmiedestücke genügte aber auch der Dampfhammer nicht mehr, weil seine Schläge, obwohl sie die ganze Umgebung weithin erschütterten, doch nur in der Hauptsache auf die Oberfläche der großen Stahlblöcke einwirkten, ohne den Kern genügend durchzuarbeiten. Man ist deshalb heutzutage bei großen schweren Stücken auf die Anwendung von Schmiedepressen übergegangen, die mit Drücken bis zu 10000 t arbeiten. Der bedeutendste Fortschritt in der hüttenmännischen Weiterverarbeitung des Stahles wurde durch die Einführung des Walzwerkes gemacht. Durch diese Erfindung ist die Herstellung der einfachen Formen des Stahles sehr verbilligt worden. Durch Walzen werden hauptsächlich Quadrat-, Rund-, Flach- und Bandeisen, ferner Profileisen, Bleche, Draht, Röhren usw. hergestellt. Obwohl der Walzvorgang äußerlich nichts mit dem Schmieden gemein hat, so ist er seinem Wesen nach doch ein Schmiedeprozeß. Das Schmieden, worunter auch das Pressen, Walzen und Warmziehen verstanden sein soll, wird bei heller Rotglut oberhalb des sog. Umwandlungspunktes (ca. 750° C) vorgenommen. In diesem Zustande ist der Stahl noch stark plastisch und verhältnismäßig leicht formänderungsfähig. Mit dem Schmieden bezweckt man einerseits eine bestimmte äußere Formgebung, man sucht z. B. einen Stahlblock in eine Welle von bestimmten Abmessungen zu verwandeln, daneben aber, und das ist in der Regel der Hauptzweck, sucht man die bei der Erstarrung des Stahles gebildeten groben Kristalle zu zertrümmern und in ein Haufwerk von feinen Kriställchen überzuführen. Hierdurch wird die Festigkeit und namentlich die Zähigkeit des Stahles erhöht. Daneben erreicht man aber auch, daß der Stahl, der häufig von kleinen mit

Gas gefüllten Hohlräumen durchsetzt ist, verdichtet wird, indem durch den Schmiededruck die Gase ausgetrieben und diese Hohlräume durch Zusammenschweißen geschlossen werden. Will man durch Schmieden einen vorzüglichen Stahl erhalten, so muß man in erster Linie darauf achten, daß die Schmiedung oberhalb des Umwandlungspunktes (ca. 750°C) erfolgt, „man muß das Eisen schmieden, solange es warm ist“, weil sonst leicht im Stahl innere Spannungen und Risse erzeugt werden können. Man darf aber nicht beliebig weit oberhalb des Umwandlungspunktes schmieden. Zwar läßt sich bei den hohen Temperaturen der Stahl am leichtesten verschmieden, weil er am weichsten ist, aber man erreicht auf diese Weise nicht die gewünschte Kornverfeinerung. Bei einer hohen Schmiedetemperatur würde man zwar durch gute Verschweißung der Hohlräume, die von Lunkern und Schwindungsrissen herrühren, eine große Gleichmäßigkeit des Stahles erzielen, aber das Gefüge des Stahles würde noch zu grob bleiben. Man richtet in der Praxis daher das Schmieden so ein, daß man die erste Schmiedung, durch welche dem Schmiedestück seine hauptsächliche Formgebung erteilt wird, bei hoher Temperatur vornimmt, dagegen die weitere Schmiedung, durch die man ein möglichst feines Korn erzielen will, bei niedriger Temperatur durchführt, so daß man das gewünschte Fertigmaß gerade erreicht, wenn man sich in der Nähe der Umwandlungstemperatur befindet. Ein solcher Stahl ist frei von inneren Rissen und hat ein sehr feines Gefüge. Die Gefügeverfeinerung, die man durch Schmieden erreicht, ist eine viel höhere als durch bloßes Glühen oberhalb des Umwandlungspunktes. In Abb. 44 ist die Korngröße eines weichen Stahles in Abhängigkeit von der Schmiede- bzw. Glüh-temperatur dargestellt. In beiden Fällen ist angenommen, daß der Stahl nach dem Schmieden bzw. Glühen bei der

betreffenden Temperatur langsam abgekühlt wird. Es fällt besonders auf, daß die Korngröße des geschmiedeten Stahles namentlich bei hohen Temperaturen weit kleiner ist als die des geglühten Stahles. Die günstige Wirkung der Kornverfeinerung zeigt sich deutlich auch in der Verbesserung der Festigkeitseigenschaften. In Abb. 45 sind

Festigkeit, Streckgrenze und Kerbzähigkeit eines mittelharten Stahles in Abhängigkeit von der Schmiede- bzw. Glüh-temperatur dargestellt. Kurve I bezieht sich auf geschmiedeten Stahl,

Kurve II auf geglühten Stahl. Das Beispiel bezieht sich auf vierfache Verschmiedung, d. h. der Querschnitt des ursprünglichen Rohgusses wurde auf den vierten Teil verringert. Aus den Kurven geht hervor, daß durch das Schmieden die Festigkeit wenig, die

Streckgrenze ziemlich erhöht, daß dagegen die Kerbzähigkeit ganz bedeutend verbessert wird. Bei 900° C erreicht man durch Schmieden den dreifachen Wert der Kerbzähigkeit gegenüber dem Glühen.

So sehr man durch gründliches Durchschmieden die Festigkeitseigenschaften eines Stahles verbessern kann, so kommt man doch schließlich an eine gewisse Grenze. Die Erfahrung hat gezeigt, daß dieser günstigste Zustand bereits bei dreifacher Verschmiedung erreicht ist. Man kann

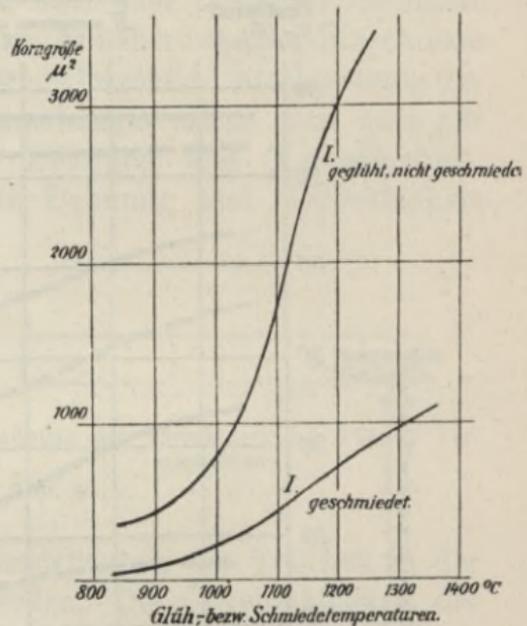


Abb. 44. Einfluß des Schmiedens auf die Korngröße weichen Stahles (n. Goerens).

also nicht durch immer weitere Verschmiedung das Material weiter verbessern. Im Gegenteil, geht man erheblich über den dreifachen Verschmiedungsgrad hinaus, so machen sich gewisse Nebeneinflüsse geltend, die den Stahl unter Umständen verschlechtern. Diese entstehen durch

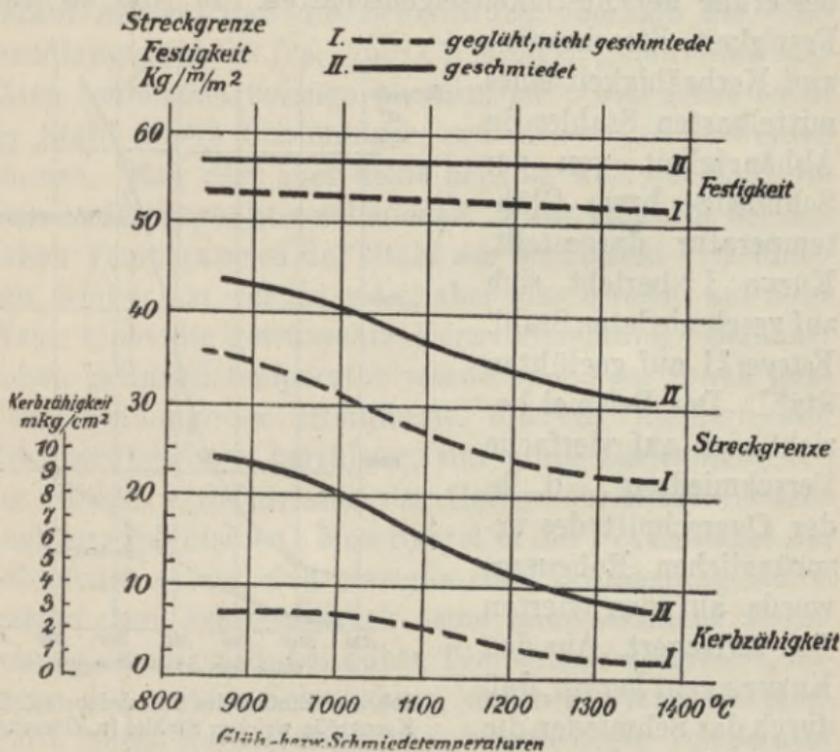
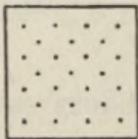


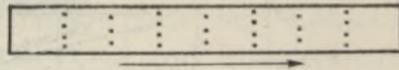
Abb. 45. Einfluß des Schmiedens auf die mechanischen Eigenschaften mittelhartem Stahls (n. Oberhoffer).

die nichtmetallischen staubförmigen Einschlüsse im Stahl. Setzt man der Einfachheit halber voraus, daß diese Einschlüsse im Stahl gleichmäßig verteilt sind, so werden beim Schmieden oder Walzen die in der Richtung der Kraftwirkung gelegenen Teilchen einander immer mehr genähert, während die in der Streckrichtung gelegenen auseinandergezogen werden (siehe Abb. 46). Mit fortschreitendem

Schmieden oder Walzen tritt daher in der Querrichtung eine immer häufigere Unterbrechung des rein metallischen Zusammenhanges auf. Diese Einschlüsse werden schließlich in länglichen Reihen angeordnet (Zeilenstruktur), es entsteht im Gefüge des Stahles eine „Faser“. Die Festigkeitseigenschaften des Stahles müssen daher verschieden sein, je nachdem sie längs oder quer zur Faser bestimmt werden. Durch die starke Annäherung der Einschlüsse quer zur Faser und die daraus folgende Unterbrechung des rein metallischen Zusammenhanges erhält man quer zur Faser eine verminderte Dehnung und Kerbzähigkeit, während längs der Faser Dehnung und Kerbzähigkeit



Einschlüsse im Gußblock
gleichmäßig verteilt.



Anordnung der Einschlüsse bei 3 facher Ver-
schmiedung.

Abb. 46.

durch das starke Auseinanderziehen der Teilchen in der Regel noch verbessert werden. Die Gleichmäßigkeit des Stahles in den verschiedenen Richtungen wird also durch die winzig kleinen Einschlüsse, die sich nur durch die Mittel der Metallmikroskopie erkennen lassen, aufgehoben. Diese treten um so stärker auf, je unreiner der Stahl ist. Der Konstrukteur hat auf diese Erscheinung wohl zu achten. Er darf also beim Stahl keineswegs mit einem Werkstoff rechnen, der nach allen Richtungen hin gleichmäßig ist. Er muß, wenn möglich, so konstruieren, daß die höchste Beanspruchung in der Richtung der Verschmiedung liegt. In Abb. 47 ist der Einfluß des Verschmiedungsgrades auf die Festigkeitseigenschaften von hartem Stahl dargestellt. Man erkennt daraus, daß man mit der Verschmiedung nicht

zu weit gehen darf, will man nicht in der Querrichtung zu geringe Zähigkeit in Kauf nehmen. Man erreicht durch das Schmieden um so bessere Festigkeitseigenschaften, je einfacher die Form des Schmiedestückes ist. Bei verwickelten Formen lassen sich nur schwer gute Festigkeits-

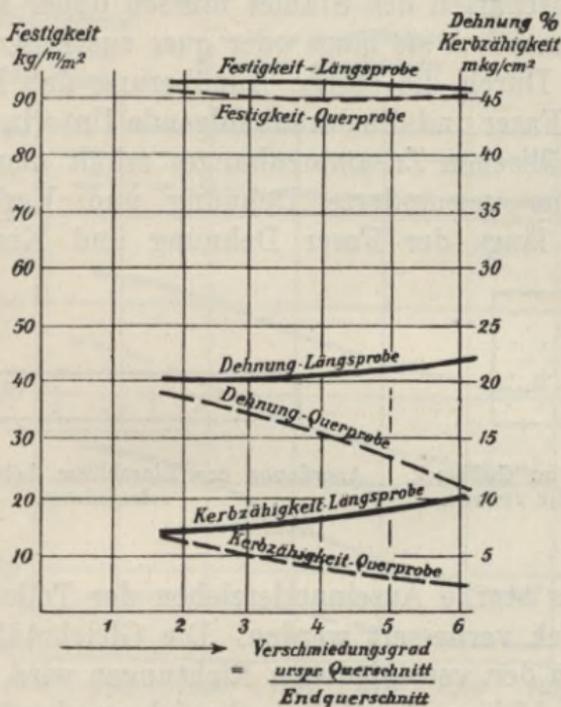


Abb. 47. Einfluß des Schmiedens auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl (n. Charpy).

eigenschaften erzielen. Von Wichtigkeit zur Erreichung von guten Festigkeitseigenschaften ist ferner die Größe des Schmiedestückes. Je kleiner das Schmiedestück ist, desto durchdringender wird die Durchschmiedung. Bei massigen Schmiedestücken lassen sich nur schwer durch Verschmieden allein so hohe Festigkeitseigenschaften erzielen wie bei kleinen Stücken, ferner sind die Festigkeitseigenschaften nicht gleichmäßig über den ganzen Quer-

schnitt verteilt, die äußeren Teile haben höhere Werte als die inneren, die nicht so stark geschmiedet sind. Die Zahlentafel 6 (Wendt, Kruppsche Monatshefte 1922) zeigt, Zahlentafel 6 (nach Wendt, Kruppsche Monatshefte 1922). Festigkeitswerte von geschmiedetem Siemens-Martin-Stahl verschiedener Querschnitte in der Streckrichtung.

Stahl	Querschn. Abmessung ca. mm Ø	Streckgr. kg/mm ²	Festigkeit kg/mm ²	Dehnung auf 10 d %	Ein- schnürung %	Kerb- zähigkeit ¹⁾ mkg/cm ²
Mit 0,35% C	300	29,2	52,2	25,4	59	7,3
	60	34,5	53,9	25,8	59	13,5
Mit 0,45% C	300	31,8	61,9	19,2	44	5,3
	60	38,0	64,5	22,5	52	9,1

welche großen Wertunterschiede sich bei Kohlenstoffstählen hinsichtlich Kerbzähigkeit und Streckgrenze bei gleicher Zusammensetzung und Warmverarbeitung, aber verschiedenem Querschnitt ergeben. Es zeigt sich, daß die Festigkeit nicht wesentlich beeinflußt wird, dagegen Streckgrenze und Kerbzähigkeit in ganz bedeutendem Maße.

Die Kaltverformung.

Es wurde schon hervorgehoben, daß die Warmverarbeitung bei Erreichung der Umwandlungstemperatur, d. h. bei ca. 750° C, beendet sein muß, weil bei Bearbeitung in Dunkelrotglut leicht das Material verdorben wird. Besonders gefährlich ist die Verarbeitung des Stahles bei noch niedrigeren Temperaturen, nämlich im Bereich zwischen 200° und 400° C, in der sog. Blauwärme, weil in diesem Temperaturbereich der Stahl eine blaue Anlauffarbe zeigt.

¹⁾ Ermittelt an Proben 30 × 30 × 160 mm mit 4 mm Normalrundkerb.

Ein Stahl, der bei dieser Temperatur verarbeitet wurde, zeigt bei gewöhnlicher Temperatur eine große Stoßempfindlichkeit (Kaltsprödigkeit), welche sich in bedeutender Abnahme der Kerbzähigkeit äußert.

Hat man nun sehr kleine Querschnitte warm zu verarbeiten, so ist es sehr schwierig, während des Arbeitsvorganges das Werkstück auf der geforderten Temperatur oberhalb des Umwandlungspunktes zu erhalten. Bei einer Dicke von weniger wie 10 mm ist es nicht mehr möglich, die richtige Arbeitstemperatur einzuhalten, da in wenigen Sekunden die Wärme an die Umgebung abgegeben ist. Solch kleine Querschnitte formt man bei gewöhnlicher Temperatur, da der Stahl auch in kaltem Zustande eine geringe Bildsamkeit besitzt. Die Kaltverarbeitung hat jedoch zur Folge, daß das Material gehärtet wird. Man nennt diese Erscheinung Kaltreckung. Man kann die Kaltreckung nur bis zu einer gewissen Grenze fortsetzen, ohne das Material zu überziehen oder zu überstrecken, wodurch es leicht brüchig wird. Um beim kaltgereckten Stahl die ursprüngliche Zähigkeit wieder zu erhalten, muß er bei einem bestimmten Verarbeitungsgrad wieder ausgeglüht werden. Die Kaltverarbeitung wirkt auf die Festigkeitseigenschaften des Stahles viel stärker ein als die Warmverarbeitung. So kann man z. B. die Zugfestigkeit eines ganz weichen Stahles, wenn er zu Draht ausgezogen wird, leicht von 30 kg/mm^2 auf das Dreifache erhöhen. In diesem Falle nimmt aber die Dehnung auf den sechsten Teil ab. Die Härtesteigerung ist bei ganz kleinen Querschnitten größer als bei mittleren. Z. B. läßt sich bei einem ganz weichen Stahldraht von 30 kg/mm^2 Festigkeit bei einem 10 mm-Draht nur 75 kg/mm^2 erreichen, während man bei 0,5 mm Draht bis 110 kg/mm^2 erzielen kann. Bei einem harten, stärker gekohlten Stahl von 0,9% Kohlenstoff, der im ausgeglühten Zustande ca. 90 kg/mm^2 Festigkeit hat, erreicht

man beim 5 mm-Draht 170 kg/mm², während man beim 0,5 mm-Draht bis auf 300 kg/mm² Festigkeit gelangen kann. Die Kaltbearbeitung findet besonders Anwendung zur Herstellung von Drähten, dünnen Blechen, Bandeisen, Rund- und Profilstangen usw. und hat eine große Ausbreitung gefunden. Zahlentafel 7 gibt eine Übersicht über die bei Stahldrähten durch Kaltziehen erreichbaren Festigkeitswerte (n. Wendt, Kruppsche Monatshefte 1922).

3. Die Wärmebehandlung. Wohl die größte Bedeutung für die Herstellung des Stahles hat die Wärmebehandlung. Der Stahl wird durch die Wärmebehandlung viel stärker beeinflußt als alle anderen Metalle und Legierungen. Will man bei einem Stahl eine bestimmte Festigkeit erreichen, ohne seine äußere Form zu verändern, so muß man ihn einer bestimmten Wärmebehandlung unterziehen. Die Wärmebehandlung des Stahles gründet sich auf die Kenntnis der durch die Wärme in Stahl erzeugten inneren Umwandlung und der damit verbundenen Veränderung seines Kleingefüges. Man unterscheidet vier Hauptarten der Wärmebehandlung.

1. Das Glühen,
2. das Härten,
3. das Vergüten,
4. das Einsatzhärten.

Das Glühen.

Neben dem Schmieden ist das Glühen das vornehmlichste Mittel, um bei gegossenem Stahl das grobe Gußgefüge in ein feinkörniges Gefüge zu verwandeln und damit brauchbare Festigkeitseigenschaften zu erzielen. Das Glühen besteht in der Erhitzung des Stahles auf eine Temperatur oberhalb des Umwandlungspunktes (ca. 750° C) mit darauffolgender langsamer Abkühlung. Oberhalb des Umwandlungspunktes oder der kritischen Temperatur besteht

der Stahl nur aus einer Art von Kristallen, die als eine feste Lösung von Eisenkarbid (Fe_3C) in γ -Eisen betrachtet wird (austenitischer Zustand), unterhalb des kritischen Punktes aus zwei Arten von Kristallen, α -Eisen und Eisenkarbid (perlitischer Zustand). Die Gefügeänderung beim Durchgang durch den kritischen Punkt äußert sich durch einen Stillstand (Haltepunkt) der Temperaturzunahme beim Erhitzen und durch einen solchen in der Temperaturabnahme während der Abkühlung. Aber nicht nur eine Gefügeänderung tritt beim Überschreiten der kritischen Temperatur ein, sondern auch eine magnetische Umwandlung. Unterhalb der kritischen Temperatur sind die Stähle magnetisch, oberhalb unmagnetisch. Es ist durchaus verständlich, daß die innere Umwandlung im Stahl, die einen Übergang von einer Kristallstruktur in eine andere zur Folge hat und mit tiefgreifenden Änderungen in den mechanischen und magnetischen Eigenschaften verbunden ist, gewisse Zeit dauert. Es ist aber nicht gleichgültig, wie weit der Stahl beim Glühen über den Umwandlungspunkt hinaus erhitzt wird. Das feinkörnigste Gefüge erhält er, wenn er nur ganz wenig über den Umwandlungspunkt hinaus erwärmt wird. Mit zunehmender Erhitzung über den Umwandlungspunkt hinaus wächst wieder seine Korngröße und verschlechtern sich seine Festigkeitseigenschaften, namentlich aber seine Zähigkeit. Ein zu hoch geglühter Stahl wird überhitzt genannt. Um ihm wieder gute Festigkeitseigenschaften zu verleihen, muß man ihn von neuem glühen, und zwar unmittelbar oberhalb des Umwandlungspunktes. Der Einfluß der Glüh Temperatur auf die Korngröße und Festigkeitseigenschaften ist in den Abb. 44 und 45 angegeben. Wie man daraus ersieht und wie schon weiter oben angeführt wurde, erreicht man durch Glühen allein kein so feines Korn und so gute Festigkeitseigenschaften wie durch Schmieden. Das Glühen wird haupt-

sächlich beim Stahlguß angewendet, um ihm das Gußgefüge zu nehmen und dadurch ein feinkörniges Gefüge zu erzielen. Dadurch erreicht man hauptsächlich Erhöhung der Streckgrenze und namentlich der Kerbzähigkeit. Ein weiterer Zweck des Ausglühens ist, erhöhte Härte und geringe Dehnung bei kaltverarbeitetem Stahl oder zu kaltgeschmiedetem Stahl zu beseitigen. Dieses Ausglühen

nennt man „Normalisieren“, weil es alle Einflüsse vorausgegangener Kalt- und

Warmbehandlung aufhebt und den Stahl in einen Zustand versetzt, in dem er sich eindeutig beurteilen läßt. Hochwertige Schmiedestücke, die nicht vergütet werden, werden zur Verbesserung ihrer Festigkeitseigenschaften nach dem Schmieden gewöhnlich ausgeglüht.

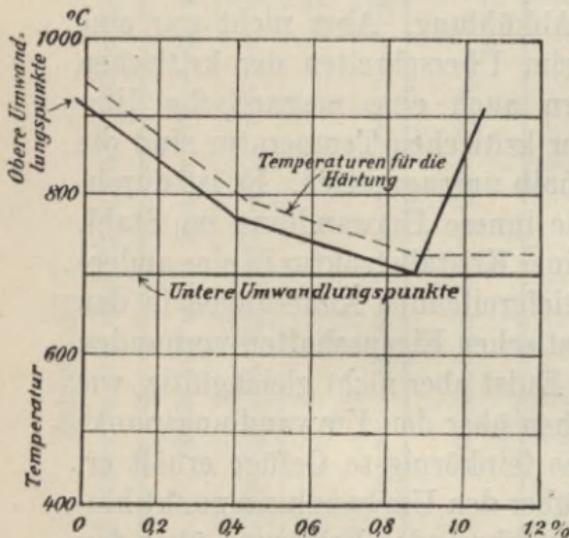


Abb. 48. Lage der Umwandlungspunkte in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt in %.

Das Ausglühen wird auch zur Beseitigung von Spannungen im Stahl angewendet; in diesem Falle genügt unter Umständen auch eine Erwärmung auf 500—700° C.

Damit das Glühen von Erfolg begleitet ist, muß nicht nur die Glühtemperatur richtig gewählt sein, sondern auch die Glühzeit. Außerdem muß das Abkühlen ausreichend langsam erfolgen. Die Glühtemperatur hängt vom Kohlenstoffgehalt ab, sie darf um so niedriger sein, je höher dieser ist. In Abb. 48 ist die ungefähre Lage der Gefügem-

wandlungspunkte von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt angegeben. Die gestrichelte Linie zeigt die richtige Glühtemperatur, sie fällt auch mit der Härtungstemperatur zusammen. Die Glühdauer muß um so länger sein, je stärker das Stahlstück ist. Allgemein gültige Angaben lassen sich nicht machen. Doch muß die Glühzeit so bemessen werden, daß das Stück ganz gleichmäßig die nötige Glühtemperatur angenommen hat. Übertrieben langes Glühen bei richtiger Glühtemperatur wirkt wie kurze Glühzeit bei hoher Temperatur. Es ruft also eine Vergrößerung des Kornes hervor. Die Abkühlung muß um so langsamer erfolgen, je höher der Kohlenstoffgehalt ist. Zu langsames Abkühlen ist nie von Nachteil, während rasches Abkühlen, namentlich bei großen Stahlstücken, durch Entstehen von Spannungsrissen schweren Schaden anrichten kann.

Das Härten.

Entzieht man dem über den Umwandlungspunkt erhitzten Stahl plötzlich seine Wärme, so entstehen in ihm eigenartige Zwangszustände, die eine Härtung verursachen. Das Mittel, um die schnelle Wärmeentziehung zu bewirken, ist das plötzliche Abkühlen des Stahles in einer Härteflüssigkeit (Wasser, Öl u. dgl.). Bei plötzlicher Abkühlung hat der im Stahl gelöste Kohlenstoff keine Zeit, sich wie bei langsamer Abkühlung in Karbidform auszuscheiden. Das Wesen der Härtung besteht demnach darin, im Stahl eine möglichst gleichmäßige, äußerst feine Verteilung des Zementites zu erzielen. Das Gefüge des gehärteten Stahles nennt man Martensit. Es zeichnet sich durch lauter feine Nadeln aus (siehe Abb. 24, S. 69). Im Gegensatz dazu ist der Zementit beim langsam abgekühlten Stahl nicht mehr gleichmäßig verteilt, sondern er bildet in dem weichen Gefügebestandteil, dem sog. Ferrit, der aus reinen Eisen-



Abb. 49. Grobkörniger Stahlguß bestehend aus Ferrit (hell) u. Perlit (dunkel). Vergr. = 265 fach.

kristallen besteht, Inseln von sog. lamellaren oder streifigen Perlit (siehe Abb. 49). Die Härtungsfähigkeit wächst mit dem Kohlenstoffgehalt (siehe Abb. 50); während bei niedrig gekohltem Stahl die Härte nur wenig zunimmt, steigt sie bei hoch gekohltem Stahl bis zur Glashärte, so daß die Feile nicht mehr angreift. Durch die Härtung wird der Stahl fester, d. h. Festigkeit und Streckgrenze nehmen zu, aber auch spröder, seine Dehnung nimmt erheblich ab, bei ganz weichen Stählen fällt sie schon auf die Hälfte, bei

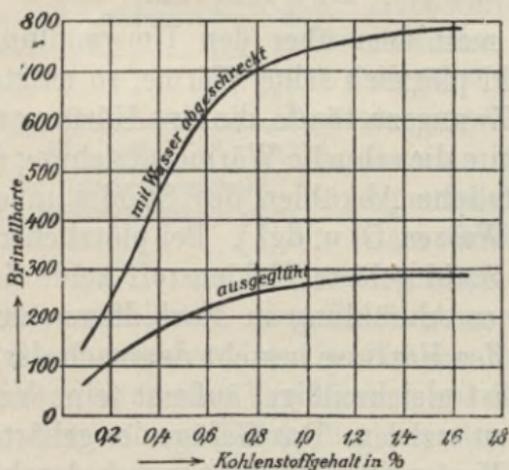


Abb. 50. Brinellhärte für ausgeglühten und abgeschreckten Stahl.

kohlenstoffreicheren Stählen nimmt sie noch stärker ab. Er muß daher nach dem Härten (Abschrecken oder Ab-

löschen) meistens noch angelassen werden. Die Härtung wird im allgemeinen nur bei höher gekohlten Stählen vor-

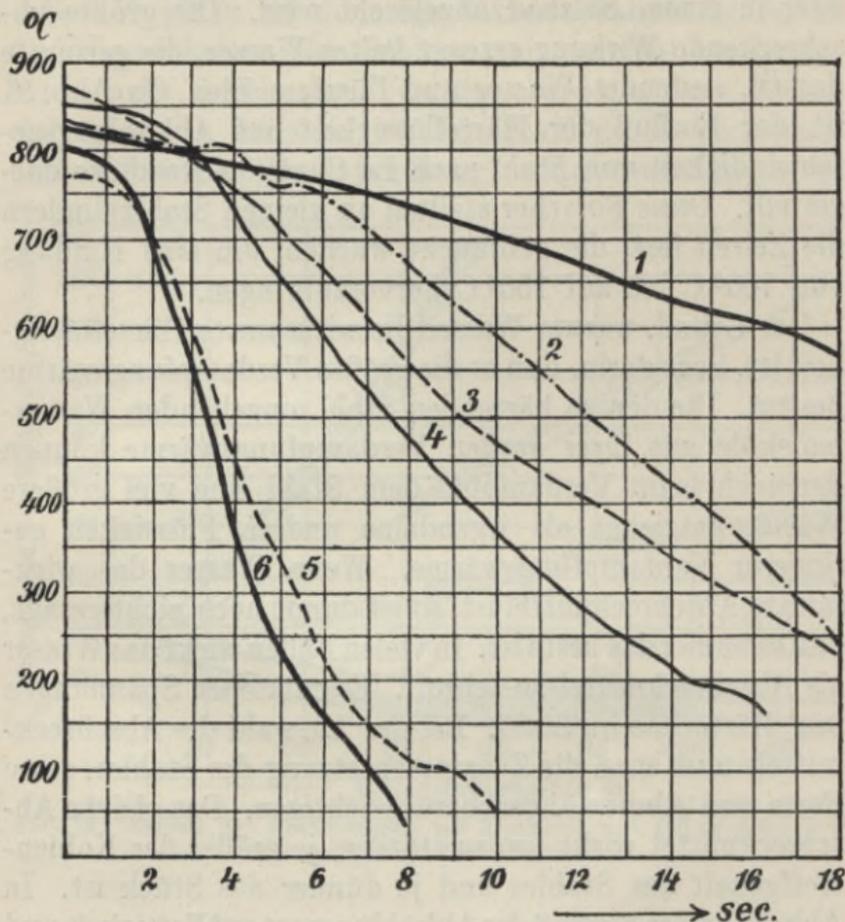


Abb. 51. Einfluß der Härteflüssigkeit auf die Abkühlungsgeschwindigkeit von Stahl (nach Le Chatelier).

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. = Blei | 4. = Quecksilber |
| 2. = siedendes Wasser | 5. = Wasser von 20° C |
| 3. = Leinöl | 6. = Sprühregen |

genommen. Gehärtet werden meistens Werkzeuge mit 0,7—1,5% Kohlenstoff, ferner Teile, die wie Lehren, Stifte, Kugeln für Kugellager sich durch Reibung beim Gebrauch nicht abnützen dürfen. Zur Erzielung einer

großen Härte ist es nicht gleichgültig, welches Härtemittel man anwendet, ob ein Stahl im Wasser, Quecksilber, Öl oder in einem Salzbad abgelöscht wird. Die größte abschreckende Wirkung erzeugt kaltes Wasser, die geringste das Öl, siedendes Wasser und flüssiges Blei. In Abb. 51 ist der Einfluß der Härteflüssigkeit auf Abkühlungsgeschwindigkeit von Stahl nach Le Chatelier-Haedicke dargestellt. Diese Forscher stellten an kleinen Stahlzylindern die Zeiten fest, die gebraucht wurden, um eine Kühlung von 700°C bis auf 100°C hervorzubringen.

Der Grund, warum Wasser die wirksamste Härteflüssigkeit ist, liegt darin, daß es die größte Verdampfungswärme besitzt. Die den zu härtenden Stahl umgebenden Wassermoleküle mit ihrer großen Verdampfungswärme können demnach beim Verdampfen dem Stahl eine viel größere Wärme entziehen als irgendeine andere Flüssigkeit geringerer Verdampfungswärme. Wenn Wasser das wirksamste Abschreckmittel ist, so ist damit noch nicht gesagt, daß es immer das beste ist. In vielen Fällen wirkt das Wasser als Abschreckmittel zu schroff. Es entstehen Spannungen und Härterisse im Stahl. Bei der Auswahl des Abschreckmittels muß man die Zusammensetzung des Stahles, seine Form und Abmessungen berücksichtigen. Das gleiche Abschreckmittel wirkt um so stärker, je größer der Kohlenstoffgehalt des Stahles und je dünner das Stück ist. In Abb. 52 ist der Einfluß der Abkühlungsart auf Festigkeit und Dehnung bei verschiedenem Kohlenstoffgehalt dargestellt.

Dem Härten des Stahles folgt fast immer das Anlassen, um die beim Abschrecken des Stahles erzeugte Sprödigkeit etwas zu mildern und die inneren Spannungen etwas auszugleichen. Das Anlassen darf jedoch bei den im gehärteten Zustande verwendeten Stählen (es handelt sich meistens um hochgekohlte Werkzeugstähle) höchstens bis gegen 300°C gehen, um eine Abnahme der Härte zu verhüten.

Das Vergüten.

Das Vergüten ist diejenige Wärmebehandlungsart, die die Eigenschaften des Stahles am meisten verbessert. Man sucht durch das Vergüten weniger eine Härtesteigerung zu erzielen, als den Stahl gegen wechselnde und stoßweise Beanspruchung widerstandsfähiger zu

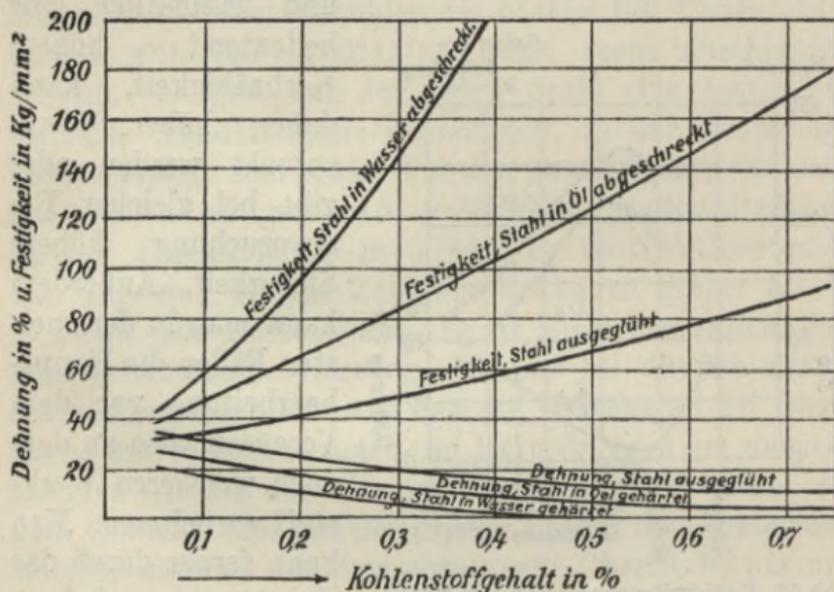


Abb. 52. Einfluß der Abkühlungsart auf Festigkeit und Dehnung bei Stahl von verschiedenem Kohlenstoffgehalt.

machen. Das Vergüten besteht ebenfalls wie das Härten in dem Abschrecken aus einer Temperatur oberhalb des Umwandlungspunktes, jedoch mit darauffolgendem, weitgehendem Anlassen bis in die Nähe des Umwandlungspunktes (500—700° C). Die Vergütung wird bei den Konstruktionsstählen vorgenommen, um für eine gegebene Festigkeit höhere Streckgrenze und namentlich bessere Kerbzähigkeit zu erzielen. Das Vergüten, das wegen seiner erhöhten Ausführungskosten sich nur bei

hochbeanspruchten Konstruktionen empfiehlt, gewährt verschiedene Vorteile. Vor allem kann man bei gleicher Festigkeit einen etwas niedriger gekohlten, also im normalisierten Zustande etwas weicheren Stahl verwenden. Ein solcher läßt sich gleichmäßiger herstellen und gewinnt noch durch das Vergüten an Gleichmäßigkeit, ferner hat er bei gleicher Festigkeit eine etwas höhere Streckgrenze

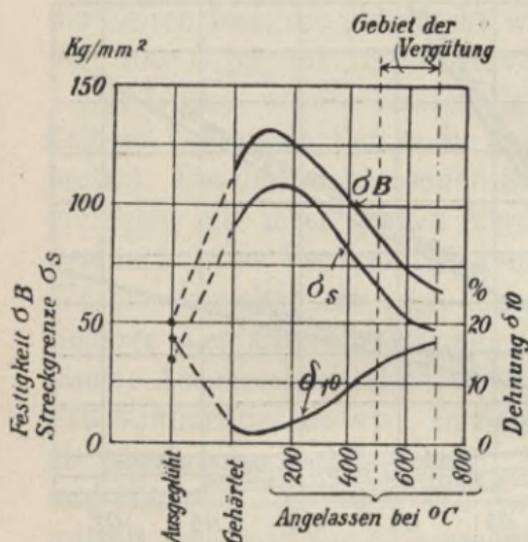


Abb. 53. Festigkeitseigenschaften von mittelhartem Stahl bei verschiedener Wärmebehandlung.

schaften verleihen und dadurch seinem Verwendungszweck besser anpassen. In Abb. 53 ist die Veränderlichkeit der Festigkeitseigenschaften mit der Anlaßtemperatur für einen vergüteten Kohlenstoffstahl von 0,3% Kohlenstoff dargestellt. Man ersieht hieraus deutlich, welch vorzügliches Hilfsmittel wir in der Vergütung besitzen, um die Festigkeitseigenschaften eines Stahles in der einen oder anderen Richtung zu beeinflussen. Das Härten und Vergüten ist bei den reinen

und namentlich eine bedeutend höhere Kerbzähigkeit, kann daher höher beansprucht werden oder gibt bei gleicher Beanspruchung höhere Sicherheit. Außerdem kann man in den meisten Fällen die Hauptbearbeitung vor dem Vergüten, also an dem noch weicheren Werkstoff vornehmen. Man kann ferner durch das Vergüten ein und demselben Stahl verschiedene Festigkeitseigen-

Kohlenstoffstählen auf verhältnismäßig kleine Stücke beschränkt. Stücke mit über 100 mm Dicke lassen sich nur schwer gleichmäßig härten und vergüten. Bei den großen Querschnitten muß man zu legiertem Stahl greifen. Dies hat in folgendem seinen Grund: Das Härten wird durch schnellen Wärmeentzug des über dem Unwandelungspunkt erhitzten Stahles bewirkt. Soll die Härtung wirksam erfolgen, so muß bei Abkühlen des Stahles der Temperaturbereich von 700° — 200° C möglichst rasch durchlaufen werden. Es gibt nun für jeden Stahl eine bestimmte kritische Abkühlungsgeschwindigkeit, in der dieses Abkühlen erfolgt sein muß. Bei den gewöhnlichen Kohlenstoffstählen beträgt diese 5—7 Sek. Wird ein Stahlteilchen rascher abgekühlt als in 5 Sek., so tritt vollkommene Härtung ein. Ist die Zahl der Sekunden größer als 7, so bleibt jede Härtung aus. Es ist leicht begreiflich, daß eine vollkommene Härtung sich nur bei dünnen Stahlstücken erreichen läßt und daß die Härtung an der Oberfläche am vollkommensten, im Kern dagegen am unwirksamsten ist. Da der Wärmeinhalt eines Stahlstückes mit dem Gewicht, also mit der dritten Potenz der Abmessung wächst, während die abzuschreckende Oberfläche nur mit dem Quadrate der Längen wächst, so erreicht man trotz noch so energischer Abschreckung bald eine kritische Stahldicke, die nicht überschritten werden darf, wenn auch der Kern mit Sicherheit gehärtet werden soll. Bei den reinen Kohlenstoffstählen kann man daher von der verbessernden Wirkung des Vergütens auf die Festigkeitseigenschaften nur beschränkten Gebrauch machen. Gerade bei den größeren wichtigeren Schmiedestücken, die am meisten beansprucht sind, muß man bei den Kohlenstoffstählen auf das Vergüten verzichten, weil sie sich infolge ihrer hohen kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit nicht mehr härten lassen. Im Gegensatz zu den reinen

Kohlenstoffstählen haben die mit Nickel und Chrom legierten Stähle eine viel geringere kritische Abkühlungsgeschwindigkeit. Sie ist bei den Nickel- und namentlich bei den Chromnickelstählen 10—100mal kleiner. Während also beim Kohlenstoffstahl die Abkühlung von 700° C auf 200° C in längstens 7 Sek. vollendet sein muß, um die Härtung zu erreichen, gelingt beim 5%igen Nickelstahl noch eine vollständige Härtung, wenn die Abkühlung in 60 Sek. erfolgt, beim Chromnickelstahl von 3% Nickel und 1½% Chrom wird die Härtung gar noch in 500 Sek. erreicht. Aus dieser Eigenschaft der legierten Stähle erwachsen für die Praxis große Vorteile. Es gelingt auf diese Weise, vor allem auch die größten Querschnitte durchzuhärten und dann durch Anlassen das gehärtete Martensitgefüge in das feinste Perlitgefüge umzuwandeln. Dieses ist aber die Vorbedingung für Erreichung der höchsten Zähigkeit bei Konstruktionsstählen. Außerdem hängt der Erfolg der Härtung nicht von Sekunden ab; man kann als Abschreckmittel statt des schroffen Wassers das mildere Öl verwenden und vermindert dadurch innere Spannungen und Risse. Die Vergütung wird hauptsächlich bei geschmiedeten Konstruktionsstählen vorgenommen. Durch die zusammengefaßte Wirkung dieser beiden Wärmebehandlungsarten lassen sich bei den legierten Stählen die größte Festigkeit und Zähigkeit vereinen. In neuester Zeit wird das Vergüten auch bei Stahlguß mit bestem Erfolge angewendet, so daß selbst da Formstücke verwendet werden, wo bis vor kurzer Zeit Schmiedestücke unentbehrlich erschienen.

Das Einsatzhärten (Zementieren).

Glüht man weiches kohlenstoffarmes Schmiedeeisen längere Zeit oberhalb des Umwandlungspunktes in kohlenstoffabgebenden Mitteln, so beobachtet man, daß der Kohlenstoff allmählich in das weiche Eisen hineinwandert (dif-

fundiert) und dieses in harten Stahl umwandelt. Dieser Vorgang ist seit alter Zeit bekannt und wird Einsatzhärtung oder Zementieren genannt. Die älteste Anwendung dieses Verfahrens diente zur Herstellung des sog. Zement- oder Blasenstahls. Diese Art von Stahlerzeugung kommt heute noch selten vor, in der Regel nur als Ausgangsmaterial für die Tiegelstahlerzeugung. Dagegen ist die neuere Einsatzhärtung im Maschinenbau zu großer Bedeutung gelangt. Man glüht hier nur wenige Stunden, so daß der Kohlenstoff nur wenig in das Innere des Stahles eindringt. Auf diese Weise erreicht man, daß der Stahl, der vorher nicht härtbar war, durch Abschrecken an der Oberfläche glashart wird, während der Kern noch weich und zäh bleibt. In Abb. 54 ist der Härteverlauf im Querschnitt eines im Einsatz gehärteten Stahles angegeben.

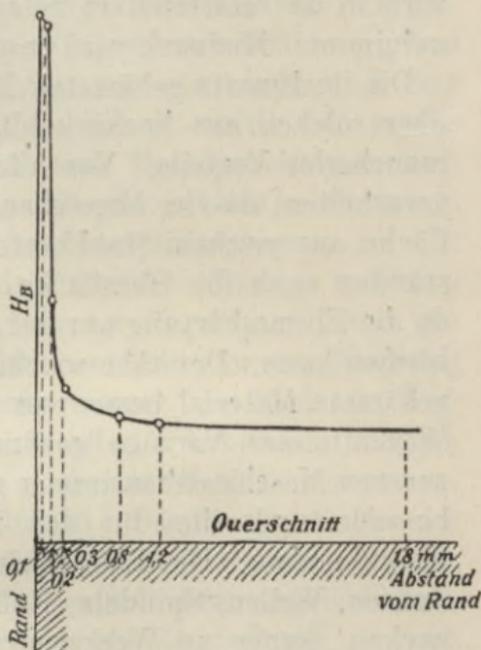


Abb. 54. Abhängigkeit der Brinellhärte vom Randabstand bei eingesetztem Stahl (nach Baumann).

Die im Einsatz gehärteten Stahles angegeben. Die im Einsatz gehärteten Werkstücke sind daher an der Oberfläche sehr widerstandsfähig gegen Verschleiß, während sie vermöge ihres zähen Kernes äußerst unempfindlich gegen Schlag und Stoß sind. Zum Einsatzhärten gehört in gewisser Beziehung auch die Streupulverhärtung der Werkzeuge. Sie kommt dann zur Anwendung, wenn der zu härtende kohlenstoffreiche Stahl beim Erhitzen im Feuer an der

Oberfläche etwas entkohlt wurde. (Es tritt hier der umgekehrte Vorgang wie beim Zementieren auf, der Kohlenstoff wandert dort an die Oberfläche, wo er verbrennt.) Um die Oberfläche des Stahles gegen dieses Entkohlen zu schützen, werden auf den erhitzten Stahl kohlenstoffreiche Salze (Zyankali usw.) aufgestreut oder der heiße Stahl wird in das Härtepulver getaucht, wobei er Kohlenstoff aufnimmt. Hiernach wird er abgeschreckt.

Die im Einsatz gehärteten Maschinenteile haben gegenüber solchen aus hochgekohltem und gehärtetem Stahl mancherlei Vorteile. Vor allem lassen sie sich leichter verarbeiten, da sie, abgesehen von der gehärteten Oberfläche, aus weichem Stahl bestehen. Man kann unter Umständen auch die Oberfläche teilweise leicht bearbeiten, da die Einsatzhärtung nur auf einzelne Stellen beschränkt bleiben kann. Der zähe weiche Kern schützt das einsatzgehärtete Material besser vor dem Reißen beim Härten. Wegen dieser Vorzüge gewinnt die Einsatzhärtung im neueren Maschinenbau immer größere Ausbreitung. Ganz besonders gilt dies für den Fahrzeug- und Werkzeugmaschinenbau. Die Einsatzhärtung wird an Zahnrädern, Achsen, Wellen, Spindeln, Kolbenbolzen, Hebeln, Steuernocken, ferner an Werkzeugen, wie Stempel, Schnitte, Schraubenmuttern usw. vorgenommen. Als Einsatzmaterial eignet sich nur Stahl mit geringem Kohlenstoffgehalt, da ein hoher Kohlenstoffgehalt den Kern spröde macht. Man soll bei Einsatzstahl nicht über 0,2% Kohlenstoff gehen. Er muß um so niedriger gehalten werden, je weicher der Kern bleiben soll. Guter Einsatzstahl darf ferner nur wenig Phosphor und Schwefel enthalten, auch der Mangangehalt soll nicht höher sein wie 0,5%, um Spannungen zu vermeiden. Ebenso darf Silizium nicht mehr wie 0,3% vorhanden sein. Daher soll man zum Einsetzen nicht einen beliebigen Kon-

struktionsstahl verwenden, sondern nur einen besonderen Einsatzstahl.

Für höchste Ansprüche an das Einsatzmaterial, wenn man neben glasharter Oberfläche einen harten und doch zähen Kern benötigt, genügen die Kohlenstoffstähle nicht mehr. Man verwendet dann Nickel- und Chromnickelstähle. Diese enthalten 2—5% Nickel und als Chromnickelstähle bis $1\frac{1}{2}\%$ Chrom. Chromnickelstähle ergeben besonders eine höhere Streckgrenze und namentlich eine höhere Schlagfestigkeit. Man nimmt sie da, wo starke Erschütterungen und wechselnde Beanspruchungen auftreten, z. B. im Autobau bei Zahnrädern oder bei Schwinghebeln von schnellschlagenden Dampfhammern.

Als Zementationsmittel können feste, flüssige und gasförmige verwendet werden. In der Regel nimmt man gepulverte Lederkohle oder Knochenkohle oder eine Mischung von Holzkohle und Bariumkarbonat. Die kohlennde Wirkung des Einsatzpulvers ist auf die kohlenstoffhaltigen Gase zurückzuführen, die sich aus den Zementationsmitteln in der Glühhitze bilden. Da die Oberfläche der Werkstücke den Kohlenstoff rascher aufnimmt, als sie ihn an die weiter innen gelegenen Schichten abgeben kann, so bildet sich eine ziemlich scharfe Randschicht, die sich deutlich vom Kern abhebt. Der Kohlenstoffgehalt dieser Randschicht soll nicht mehr wie 1% betragen. Die gekohlte Schicht ist meistens an den Ecken und Vorsprüngen etwas stärker. Die Glühtemperatur beim Einsetzen beträgt im allgemeinen 850—900° C. Die Tiefe der Einsatzschicht hängt von der Glühdauer ab. Unlegierte Kohlenstoffstähle ergeben in der gleichen Zeit eine um ca. 50% höhere Einsatztiefe wie die legierten Stähle. Genaue Angaben über die notwendige Glühdauer lassen sich nicht machen. Sie ist zu sehr von dem Härtepulver und der Einsatztiefe abhängig. Eine Einsatztiefe von 1 mm, über

die man selten hinausgeht, erreicht man bei gutem Einsatzpulver in ca. 6 Stunden. Nach dem Zementieren läßt man das Stück in der Regel langsam erkalten, ein direktes Härten ist wegen des grobkörnigen Gefüges nur in wenigen Fällen gestattet. Dadurch, daß der Stahl längere Zeit einer höheren Temperatur ausgesetzt war, hat er eine grobkristalline Struktur angenommen, auch ist er nicht spannungsfrei und neigt daher leicht zur Rißbildung, er muß daher vor dem Härten noch einmal ausgeglüht werden. Man bringt daher die zementierten Stücke in einen Ofen, dessen Temperatur man langsam auf ca. 650° C steigert und ungefähr 1 Stunde auf dieser Temperatur hält. Hierauf läßt man langsam abkühlen. Das Härten wird in der Weise vorgenommen, daß man langsam auf 700° C anwärmt und dann rasch auf die Härtetemperatur von ungefähr 800° C geht und dann in der Härteflüssigkeit (Wasser oder Öl) ablöscht. Zur Beseitigung etwaiger durch das Härten entstandener Spannungen empfiehlt es sich, die weniger einfachen Stücke anzulassen. Dies geschieht zweckmäßig durch mehrstündiges Erwärmen in kochendem Wasser oder heißem Öl.

V. Zusammenfassung.

In vorliegendem Band I wurde zunächst auf die Bedeutung der Werkstoffe für den Maschinenbau hingewiesen. Es wurde hervorgehoben, daß der Fortschritt im Maschinenbau zum großen Teil von der Verbesserung der Werkstoffe abhängt und daß es daher nötig ist, daß in den technischen Kreisen die Werkstoffkunde viel mehr als bisher gepflegt wird.

Es zeigte sich, daß die Werkstoffe in erster Linie Festigkeitsaufgaben zu erfüllen haben und daß sich in dieser

Hinsicht die Metallegierungen am besten eignen. Entsprechend den vielseitigen Beanspruchungen der Metallegierungen wurden die verschiedenen Festigkeitsprüfungsmethoden behandelt, aber es stellte sich heraus, daß die Festigkeitsprüfung und die technologischen Proben noch durch die chemischen Analysen, Metallographie und schließlich noch durch die Röntgenstrahluntersuchung ergänzt werden müssen, will man über die Gründe des verschiedenen Verhaltens der Metallegierungen bei mechanischen Beanspruchungen näheren Aufschluß erhalten.

Unter den Metallegierungen zeichnen sich als Konstruktionswerkstoffe besonders die Eisenlegierungen aus. Die Maschinen bestehen fast ganz aus Eisen. Es läßt sich in zwei Klassen einteilen: Das Gußeisen und das schmiedbare Eisen. Zunächst wurde das Gußeisen, seine Herstellung und seine allgemeinen physikalischen Eigenschaften dargestellt. Hierauf wurde das schmiedbare Eisen oder der Stahl, der wichtigste Werkstoff im Maschinenbau, behandelt. Es wurden die verschiedenen Stahlherstellungsverfahren beschrieben und die Gründe dargelegt, warum die einzelnen Verfahren Stähle verschiedener Güte liefern; sodann wurden seine Schmiedbarkeit, Schweißbarkeit, Härtefähigkeit und insbesondere seine Festigkeitseigenschaften geschildert. Da sich bei den Stählen die verschiedenartigsten Festigkeitseigenschaften erreichen lassen, von der größten Weichheit bis zur größten Härte, von der größten Sprödigkeit bis zur größten Zähigkeit, so wurden auch die Mittel angegeben, die man hat, die Festigkeitseigenschaften in verschiedenster Weise zu beeinflussen. Als solche fanden sich die Regelung der chemischen Zusammensetzung, die mechanisch-metallurgische Verarbeitung und die verschiedenen Arten der Wärmebehandlung.

Aufgabe des nachfolgenden zweiten Bandes ist es, die verschiedenen Gußeisenarten, die Konstruktionsstähle,

die Werkzeugstähle, die Stahlgußarten, sowie die wichtigsten im Maschinenbau vorkommenden Nichteisenmetalle nach ihren Festigkeitseigenschaften einzuteilen und zu beschreiben, sowie ihre chemische Zusammensetzung und ihren Verwendungszweck anzugeben.

Da die Konstruktionswerkstoffe auch bei höheren und tieferen Temperaturen Verwendung finden, wird der Einfluß der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften gezeigt. Auch die Korrosion der Metalle und die Mittel, die zu ihrer Abwehr zur Verfügung stehen, werden näher behandelt.

In einem besonderen Abschnitt werden noch die wichtigsten Hilfswerkstoffe des Maschinenbaues und ihre Anwendungsgebiete besprochen. Zum Schluß wird die Bedeutung der Werkstoffnormung im Sinne der Vereinfachung und Verbilligung der Fertigung hervorgehoben.



Namen- und Sachverzeichnis.

- | | | |
|--|---|--|
| <p>Abkühlung. Einfluß auf Härte von Gußeisen 87.</p> <p>Abkühlungsgeschwindigkeit, kritische, des Stahles 121.</p> <p>Ablöschen, Abschrecken von Stahl 64, 115—118, 121, 122.</p> <p>Abnutzung der Werkstoffe 51, 117.</p> <p>Absorption der Röntgenstrahlen 75.</p> <p>α-Eisen 77.</p> <p>Altern der Werkstoffe 47.</p> <p>Amorpher Bruch 62.</p> <p>Analyse, chem. 60.</p> <p>Anlassen von Stahl 64, 118.</p> <p>Anlaßtemperatur von Stahl 119, 120.</p> <p>Anlauffarben 95, 109.</p> <p>Anrisse 48.</p> <p>Anstrengung des Materiales 33.</p> <p>Arnold 67.</p> <p>Atomanordnung beim Eisen 77.</p> <p>Ätzen 63.</p> <p>Aufornprobe 59.</p> <p>Aufgaben der Festigkeitslehre 14, 15, 16.</p> <p>— des Maschinenbaues 6.</p> <p>Ausbreitprobe 59.</p> <p>Ausnützung der Werkstoffe 9.</p> <p>Bach 26.</p> <p>Bandagenstahldraht 58.</p> <p>Basisches Siemens-Martin-Verfahren 93.</p> <p>Bauer 62, 67.</p> <p>Baumann 66, 67.</p> <p>Bauschinger 31.</p> <p>Beanspruchung der Werkstoffe 6, 7, 14, 15, 16 bis 19, 47, 58.</p> <p>Bearbeitbarkeit 51, 54, 55.</p> | <p>Bedeutung der Werkstoffe für den Maschinenbau 8.</p> <p>Benennung des schmelzbaren Eisens 89.</p> <p>Bessemerstahl 90, 93.</p> <p>Bestandteile, schädliche, 60.</p> <p>Biegegröße 56.</p> <p>Biegeprobe 29.</p> <p>Biegespannung 29.</p> <p>Biegezahl 56.</p> <p>Blausprödigkeit 45.</p> <p>Blauwärme 109.</p> <p>Bleche 56.</p> <p>Bleibende Deform. 22.</p> <p>— Dehnung 21.</p> <p>Bördelprobe 59.</p> <p>Brinellhärte 52, 55, 98.</p> <p>Brinellprobe 52, 53.</p> <p>Bronzedraht 58.</p> <p>Bruchbiegeradius 56.</p> <p>Bruchdehnung 24, 38, 42.</p> <p>Brüche an Maschinen 7, 31, 37.</p> <p>Bruchfestigkeit 21.</p> <p>Bruchlast 20.</p> <p>Bruchspannung 28.</p> <p>Charpy 39, 67.</p> <p>Chemische Analyse der Werkstoffe 60.</p> <p>— Zusammensetzung der Werkstoffe 9, 60.</p> <p>— Zusätze zu Stahl 99.</p> <p>Chemisch reines Eisen 79.</p> <p>Chrom, Einfluß auf Stahl 79, 99, 122, 125.</p> <p>Chromnickelstahl 91, 122, 125.</p> <p>Dauerbeanspruchung 47.</p> <p>Dauerbruch 47.</p> <p>Dauerschlagstab 50.</p> <p>Dauerschlagversuch 48.</p> <p>Dauerschlagwerk 48.</p> <p>Dehnbare Werkstoffe 24, 30, 35, 53.</p> | <p>Dehnung 17, 20—22, 39, 98.</p> <p>Dehnungszahl 19, 22.</p> <p>Dendriten 69.</p> <p>Drähte 56.</p> <p>Druckfestigkeit 26.</p> <p>Druckkegel 26, 27.</p> <p>Druckversuche 25, 51.</p> <p>Dunkelrotglut 58.</p> <p>Dünne Bleche 58.</p> <p>Dynamische Beanspruchung 9, 14, 30, 38.</p> <p>— Festigkeitsprüfungen 30, 51.</p> <p>Eindringtiefe des Bohrers 55.</p> <p>Eindrucktiefe 52, 54.</p> <p>Einheitsgewicht des Gußeisens 84.</p> <p>Einheitsgewicht des Stahles 95.</p> <p>Einsatzhärten 122—126.</p> <p>Einsatzmaterial 125.</p> <p>Einsatztiefe 125.</p> <p>Einschlüsse im Stahl 59, 107.</p> <p>Einschnürung 17, 22, 24.</p> <p>Einteilung des Eisens 80.</p> <p>Eisenforschungsinstitut 46.</p> <p>Eisenhüttenchemie 60.</p> <p>Eisenkarbid 113.</p> <p>Eisenlegierungen 79.</p> <p>Elastizität 14, 20.</p> <p>— unvollkommene, 47.</p> <p>Elastizitätsgesetz, Hooke'sches, 18, 21, 22.</p> <p>Elastizitätsgrenze 17, 22, 23, 31.</p> <p>Elastizitätsmodul 19, 84.</p> <p>Elektrische Öfen 85.</p> <p>Elektrolyteisen 71.</p> <p>Elektrostahl 90, 92.</p> <p>Entkohlung 64, 124.</p> <p>Entmischung 65.</p> |
|--|---|--|

- Entwicklung des Maschinenbaues 5, 7.
 Erichsen 58.
 Erichsenprobe 58.
 Ermüden der Werkstoffe 33.
 Ermüdungsversuche 47.
 Erstarrungsvorgang 64, 65.
- Fallhammerverfahren 51.
 Falten 58.
 Faser des Stahles 107.
 Faseriges Blech 58.
 Faulbrüchigkeit 59, 96.
 Fehlerstellen 75.
 Feinkörniger Bruch 48.
 Ferrit 68, 69.
 Feste Lösung 13, 14.
 Festigkeit 14, 102, 103, 105, 108, 110.
 Festigkeitseigenschaften d. Stahles 97, 114, 119.
 Festigkeitslehre 8, 14—16.
 Festigkeitsprüfungen, dynamische, 30—50.
 — statische, 17—30.
 Flammofen 85.
 Fliehkraft 42, 50.
 Fließfiguren 20.
 Fließgrenze 20, 28.
 Flußstahl 90.
 Formänderung, bleibende, 16.
 Formänderungsarbeit 20.
 Formänderungsvermögen 95.
 Fremdkörper im Stahl 94.
 Frischverfahren 93.
- Gattieren 86, 87.
 Gefügeuntersuchung 63.
 Geschmeidigkeitsprüfung 58.
 Gezogenes Material 44.
 Gießereiroheisen 86.
 Gießtemperatur von Stahl 94.
 Giroföfen 92.
 Glühdauer 64, 115.
 Glühen von Stahl 111—115.
 Glühtemperatur 105, 114, 115, 125.
 Graphit im Gußeisen 72, 73, 86.
 Graues Gußeisen 84, 86.
- Grobkörniges Gefüge 48, 62, 101.
 Großgefügeuntersuchung 64—67.
 Gürtler 67.
 Gußeisen 24, 30, 33, 54, 73, 81, 83—88.
 — Eigenschaften 83.
 Gußeisenherstellung 83 bis 85.
- Haarrisie 76.
 Halbgraues Gußeisen 84.
 Haltepunkte 113.
 Handproben 61.
 Härte 51—55, 79, 85, 87, 98—100, 110, 122.
 Härtebestimmung 51—55.
 Härtebohrverfahren 55.
 Härteflüssigkeit 115—118.
 Härtemesser nach Shore 53.
 Härten 89, 115—118, 121 bis 126.
 Härtepulver 124.
 Härterisse 118.
 Härtetemperatur 115, 121, 126.
 Hartguß 84.
 Härtungskohle 86.
 Héroultofen 92.
 Herstellungsverfahren des Stahles 90—95.
 Heyn 41, 67, 82.
 Hilfsmittel der Werkstoffkunde 59.
 Hin- und Herbiegeprobe 56.
 Hochbeanspruchte Maschinenteile 50.
 Hochlegierte Stähle 50.
 Hochofenguß 83.
 Hohlräume 64, 65.
 Howe 67.
- Induktionsöfen 91.
 Industrienormen, deutsche, 53.
- Kaltbiegeprobe 56.
 Kaltrecken 64, 110.
 Kaltsprödigkeit 110.
 Kaltverarbeitung 110, 114.
 Kaltziehen 112.
 Kanten, Einfluß d. K. auf Stoßempfindlichkeit 32.
 Karbidkohle 86.
- Kegeldruckverfahren nach Ludwik 51.
 Keilnuten, Kerbwirkung d. K., 32, 35, 37.
 Kelleröfen 92.
 Kelvin, Lord 23.
 Kerbschlagprobe 39, 50.
 Kerbwirkung 30, 32—38, 40, 47, 62.
 Kerbzähigkeit 39—43, 50, 55, 102, 105, 109, 110, 114, 119.
 Kesselblech 41.
 Kessner 55.
 Kleingefüge 63.
 Kohlenstoff, Einfluß auf Gußeisen 80, 84, 86, 87.
 — — — Stahl 13, 14, 64, 65, 66, 68, 73, 79, 80, 87, 96, 97, 98—101, 110, 115—120, 122—125.
 Kohlenstoffanreicherung 64.
 Kohlenstoffstähle 100, 109, 115, 120, 121, 125.
 Kokille 65, 87.
 Konstruktionsstähle 119, 122, 124.
 Kontraktion 17.
 Körber 46.
 Kornverfeinerung 104.
 Körniger Perlit 71.
 Kristalle 14, 62—65.
 Kritische Abkühlungsgeschwindigkeit von Stahl 121.
 — Temperatur 113.
 Kruppsche Monatshefte 65.
 Kruppsches Dauerschlagwerk 48.
 Kugeldruckverfahren nach Brinell u. Martens 51 bis 53.
 Kupferammoniumchloridätzung 66.
 Kupolöfen 85.
 Kurzstab 18.
- Lagermetalle 51, 74.
 Längsrisse 44.
 Laue 76.
 Legierungen 12—14, 65, 79.
 Legierungselemente des Eisens 79, 86.

- Legierungsfähigkeit des Eisens 79.
 Leichte Metalle 76.
 Léon 36.
 Lichtbogenöfen 91, 92.
 Lösungen, feste, 13.
 Lötungen 66.
 Ludwik 16, 51.
 Lunker 35, 64, 65, 94, 104.
- Magnetische Umwandlung des Stahles** 113.
 Mailänder 45.
 Makroskopische Untersuchung 64.
 Mangan, Einfluß auf d. Eigenschaften d. Eisens 86, 87, 96, 100, 124.
 Martens 51, 67.
 Martensit 68.
 Materialfehler 29, 47, 64, 76.
 Maurer 45.
 Mechanisch-metallurgische Verarbeitung d. Stahles 98.
 Meßlänge 18.
 Metalle als Konstruktionswerkstoffe 12—14.
 Metallforschung 62.
 Metallhüttenchemie 60.
 Mikroskopische Untersuchung 63.
 Mischkristalle 14.
 Monellmetall 73.
 Moser 45.
- Natürliche Kerbzähigkeit 42.
 Nickel, Einfluß auf Stahl 79, 99, 122, 125.
 Nickelstähle 91, 122, 125.
 Normalien des Verbandes f. Materialprüfung 40.
 Normalisieren des Stahles 114.
 Normalstab 18.
 Normenausschuß d. Deutschen Industrie 90.
- Oberflächenhärte** 54.
 Öfen von Girod, Héroult, Keller, Stassano, Röchling-Rodenhauser 92.
 Osmond 67.
- Pendelschlagwerke 39, 40.
 Perlit 68, 69.
 Perlitguß 73.
 Phosphor, Einfluß auf die Eigenschaften d. Eisens 60, 65, 86, 88, 96, 97, 100, 124.
 Phosphorseigerung 65.
 Polterprobe 59.
 Poren 64.
 Pressen 103.
 Preuß 36.
 Probedicke 56.
 Probestab 18.
 Proportionalitätsgrenze 17, 20, 28.
 Proportionalstab 18.
 Prüfung der Metalle auf Verwendbarkeit 12—14.
 Puddelstahl 90.
- Querschnittsverminderung** 24.
- Rasch 23.
 Raungitter 77, 78.
 Richtungswechsel der Kraft 32.
 Risse 48, 56, 64, 67, 104, 126.
 Rissiges Material 59.
 Ritzhärteprüfung 51.
 Roberts-Austen 67.
 Roheisen 80.
 Roheisenerzeugung 81.
 Röntgenmetallographie 74 bis 78.
 Roozeboom 67.
 Rotbrüchig 59, 96.
 Rotglut 96.
 Rotierende Maschinen 42.
 Rücksprungverfahren 54.
 Ruhende Belastung 25, 30, 31.
 Rundkerb 49.
 Rundstab 18.
 Rutschkegel 26.
- Saures Siemens-Martin-Verfahren 93.
 Schalenguß 84.
 Scharfe Übergänge 32.
 Scharfkerb 49.
 Schlackeneinschlüsse 35, 62, 71, 91.
 Schlagempfindlichkeit 39.
- Schlaggeschwindigkeit 45.
 Schlaghärteprüfung 51, 54.
 Schlagproben 38.
 Schmelztemperatur des Gußeisens 84.
 — — Stahles 95.
 Schmiedbares Eisen 80, 88 bis 90.
 Schmiedbarkeit 95, 96.
 Schmiededresse 102—109.
 Schmiedepresse 103.
 Schmiedestücke 46, 103, 104, 108, 121, 122.
 Schrott 93.
 Schwefel, Einfluß auf Gußeisen 86, 88.
 — — — Stahl 96, 97, 100, 124.
 Schwefelabdruckprobe 66.
 Schwefelseigerung 66, 96.
 Schweißbarkeit 96.
 Schweißen 66.
 Schweißstahl 90, 91.
 Schwindung 84, 87, 104.
 Schwingende Belastung 34.
 Schwingungsfestigkeit 31.
 Seigerungen 35, 64—66.
 Shore 51.
 Sicherheitsgrad 6, 32.
 Siemens-Martin-Stahl 90, 93.
 Silizium, Einfluß auf Gußeisen 86, 87.
 — — — Stahl 96, 97, 100, 124.
 Skleroskop 53.
 Sorby 67.
 Spannungsdehnungskurve 24.
 Spannungserhöhungen 34, 37.
 Spannungsrisse 115.
 Spannungsverlauf bei Kerben 34.
 Spannungswechsel 32.
 Spitzkerb 37.
 Spröde Materialien 24, 26, 30, 34—36, 41, 45, 47, 80, 87.
 Stahl 88—126.
 — Bedeutung für den Maschinenbau 88.
 — Benennung des Stahles 89, 90.
 Stahllarten 90—95.
 Stahldrähte 111.

- Stahleigenschaften 95.
Stahlguß 114, 122,
Stahlherstellungsverfahren
90—95.
Stanzung 67.
Stassanoöfen 92.
Statische Beanspruchung
14, 33, 38.
— Festigkeitsprüfungen
17—30.
Streckgrenze 17, 21, 23,
24, 50, 114.
Stribeck 31.
- Tammann 67.
Technologische Festigkeits-
proben 55.
— Mechanik 16.
Temperaturverlauf beim
Zerreißvorgang 23.
Thomasstahl 90, 93.
Tiefziehprobe 58.
Tetmajer 56.
Tiegelschmelzverfahren 85.
Tiegelstahl 90, 91, 93, 94.
Torsionsbeanspruchung 28.
Trichter 65.
- Übergänge, scharfe, 32.
Überhitzte Metalle 62.
- Umwandlungspunkt, Tem-
peratur-, 103, 104, 109,
110, 111—115, 119, 121.
- Vanadium 99.
Vanadiumstahl 72.
Verarbeitungstemperatur
des Stahles 95, 96.
Verband f. Materialprü-
fung d. Technik 40, 89.
Verbesserung der Werk-
stoffe 9—12.
Verdampfungswärme 118.
Vergüten 114, 119—122.
Vergüteter Stahl 42.
Vernietung 67.
Verschmiedungsgrad 106,
107.
Vorbehandlung des Mate-
rials 41, 63, 89.
- Walzen 103, 106.
Walzprodukte 93.
Wandstärke, Einfluß auf d.
Härte des Gußeisens 87.
Warmbiegeprobe 58, 59.
Wärmebehandlung 39, 41,
45, 63, 111.
Warmproben 58.
Warmstauchprobe 59.
Warmverarbeitung 64.
- Wechselnde Belastung 31,
32, 36, 125.
Weiches Gußeisen 87.
Weichstahl 42, 93.
Weiße Gußeisen 84, 87.
Weißmetall 74.
Wellenbrüche 31, 37, 38.
Wendt 65, 109, 111.
Werkstoffkunde 8, 17.
Werkzeugstähle 117, 118.
Widmannstaettensche Fi-
guren 69, 70.
Windfrischverfahren 93.
Wöhler 31.
- Zähigkeit der Werkstoffe
24, 30, 38.
Zeilenstruktur 107.
Zementationsmittel 125.
Zementieren 122.
Zementit 115.
Zementstahl 123.
Zerreißfestigkeit 15, 17, 22
24, 25, 53, 98.
Zerreißmaschine 17, 20.
Zerreißstab 17.
Zerreißversuch 17—21, 40.
Zugfestigkeit = Zerreiß-
festigkeit 15, 17, 22
24, 25, 53, 98.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



I-301303



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000298011