

WAS IST STAHL?

EINFÜHRUNG IN DIE STAHLKUNDE
FÜR JEDERMANN

VON

LEOPOLD SCHEER

WAS IST STAHL?

EINFÜHRUNG IN DIE STAHLKUNDE
FÜR JEDERMANN

VON

LEOPOLD SCHEER

MIT 37 ABBILDUNGEN IM TEXT



SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH 1937

ISBN 978-3-662-35790-3

ISBN 978-3-662-36620-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-36620-2

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN.

COPYRIGHT 1937 BY SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG
URSPRÜNGLICH ERSCHIENEN BEI JULIUS SPRINGER IN BERLIN 1937
SOFTCOVER REPRINT OF THE HARDCOVER 1ST EDITION 1937

Vorwort.

Neben einem ins Riesenhafte angewachsenen fachwissenschaftlichen Schrifttum auf dem Gebiete des Stahles sind nur wenige belehrende Bücher erschienen, die das Ziel verfolgen, den großen Kreis der an „Stahl und Eisen“ interessierten Laien, vor allem auch den Kreis der Stahlverkäufer und der Einkäufer über das Wesen des Stahles allgemeinverständlich zu unterrichten. Geschrieben wurden auch diese Lehrbücher von Fachleuten, die gemeiniglich allein für berufen befunden werden, auf ihrem Gebiete Aufschluß zu geben. Diese Ansicht ist nicht ganz richtig. Der Fachmann ist zu sehr auf seinesgleichen eingestellt; oft ist er in seinen technischen Gedankengängen so befangen, daß er sich nicht bewußt wird, was von den technischen Dingen noch zum „Allgemeinwissen“ gehört und was schon zu den „Sonderkenntnissen“ zu rechnen ist; er setzt bei seinen nichttechnischen Lesern häufig zu viel voraus. Solche Lehrbücher haben meistens auch nicht ihren Zweck erfüllt. Der willige Leser legt sie oft sehr bald ermüdet aus der Hand und gibt dann sein „Studium“ überhaupt auf. Ein auch nur oberflächliches Eindringen in das Wesen des Stahles ist dem Nichtfachmann im allgemeinen versagt geblieben. Man frage einmal einen längere Jahre im Stahlfach „selbständig“ arbeitenden Verkäufer nach den einfachsten Begriffen, die ihm bei seiner Arbeit täglich in die Quere kommen, und man wird sich davon überzeugen, daß ihm jede brauchbare Vorstellung fehlt. Von zehn Stahlverkäufern werden keine zwei auch nur den Unterschied zwischen Normalglühen und Weichglühen angeben können, während der jüngste Autoverkäufer bis ins kleinste über die technischen Einzelheiten seiner Wagen Bescheid weiß.

Der Verfasser des vorliegenden Buches ist Kaufmann, also Nichtfachmann. Er hat sich in langen Jahren durch einen Berg von Fachliteratur durchgearbeitet und kennt aus eigener Erfah-

rung die Schwierigkeiten, die sich dem technisch nicht Vorbildeten auf diesem interessanten Gebiete entgegenstellen. Er bemüht sich in dieser Schrift, in leicht verständlicher Form und in gedrängtem, aber ausreichendem Maße einen Begriff vom Wesen des Stahles zu geben. Die Arbeit kann und soll nicht mit der eingangs erwähnten fachwissenschaftlichen Literatur in Wettbewerb treten, sie wendet sich an einen ganz anderen Leserkreis.

Das Buch ist kein Nachschlagewerk, das in der Schreibtischlade liegen und zu gelegentlicher Beratung hervorgeholt werden soll. Es ist eine „Einführung“ und muß Seite für Seite gewissenhaft durchgearbeitet werden. Jeder einzelne Abschnitt ist zum Verständnis der weiteren Ausführungen notwendig, weshalb auch der „Vorgeschrittene“ nichts überschlagen soll.

Damit der Leser die volle Gewähr hat, nur unverfälschte Tatsachen vorgesetzt zu bekommen, wurde das Buch in liebenswürdigster Weise von Herrn Direktor Dr.-Ing. F. Rapatz durchgesehen, dem der Verfasser auch an dieser Stelle seinen Dank ausspricht. Ebenso gebührt den Herren Direktor Dr. E. M. Wohlfarth und Direktor J. Deutschmann Dank für ihre Anregungen und für die Unterstützung, die sie dem kleinen Werk angedeihen ließen. Schließlich soll auch des Edelstahlwerks Düsseldorf der Gebr. Böhler & Co. A.-G. gedacht werden, das in entgegenkommender Weise die notwendigen Bilder zur Verfügung stellte, soweit sie nicht die Verlagsbuchhandlung aus eigenen Beständen nehmen konnte.

Düsseldorf, im Februar 1937.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Einleitung	1
2. Der Kohlenstoff	1
3. Kleiner, unbeschwerter Ausflug in die Atomphysik	3
4. Das Raumgitter des Eisens	5
5. Die Verteilung des Kohlenstoffs im Stahl	6
6. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	9
7. Die Wärmebehandlung (Nutzanwendung des Diagramms)	17
A. Das Glühen der Stähle	18
a) Weichglühen (auf körnigen Zementit glühen)	18
b) Normalglühen (Normalisieren)	18
c) Spannungsfreiglühen	19
B. Das Härten der Stähle	19
a) Umwandlungshärtung	20
Anlassen	23
b) Abarten der Umwandlungshärtung	24
α) Stufenhärtung und Warmbadhärtung (Thermalhärtung)	24
β) Einsatzhärtung	25
γ) Örtliche Oberflächenhärtung (Brennerhärtung)	27
c) Kalthärtung	28
d) Ausscheidungshärtung (Aushärtung)	29
C. Das Vergüten der Stähle	31
8. Die Legierungen des Stahles	31
A. Allgemeines	31
B. Einteilung der Grundstoffe nach ihren Wirkungen	34
C. Einteilung der Stähle nach ihrem Gefüge	35
9. Kohlenstoffstähle	37
10. Manganstähle	40
11. Nickelstähle	43
12. Chromstähle	44
13. Chrom-Nickelstähle	47
14. Chrom-Manganstähle	50
15. Siliziumstähle	51
16. Kobaltstähle	53
17. Wolframstähle	53
18. Molybdänstähle	55
19. Vanadinstähle	58
20. Aluminium im Stahl	59
21. Kupfer im Stahl	60

	Seite
22. Der Stickstoff	60
23. Der Sauerstoff	61
24. Andere Grundstoffe im Stahl	62
25. Rost-, säure- und hitzebeständige Stähle	62
26. Die Schnellarbeitsstähle	73
27. Die Schneidmetalle	78
a) Die Stellite	79
b) Die Hartmetalle (Karbidschneidmetalle)	79
28. Prüfung der Stähle	81
29. Schlußwort	85
Namen- und Sachverzeichnis	88

1. Einleitung.

Als Stahl bezeichnet man heute alle Eisenlegierungen — mit Ausnahme von Grauguß und Hartguß — ohne Rücksicht auf ihre Eigenschaften. Früher wurde als wesentliches Merkmal des Stahles die Härbarkeit angesehen. Es gibt aber eine ganze Reihe von Stählen, die sich nicht härten lassen, die durch das Abschrecken aus hohen Temperaturen im Gegenteil sogar weicher, zäher werden.

Edelstähle werden vielfach solche Stähle genannt, die außer mit Kohlenstoff auch noch mit anderen Grundstoffen, z. B. mit Chrom, Nickel, Wolfram, Vanadin usw. legiert sind. Diese Begriffsbestimmung ist jedoch nicht erschöpfend und auch anfechtbar. Denn man wird einen reinen Kohlenstoffstahl, der sorgfältig erzeugt und auf dem ganzen Wege der Herstellung — vom Guß bis zum Versand — immer wieder gewissenhaft geprüft worden ist, zweifellos auch zu den Edelstählen rechnen müssen. Andererseits enthalten manchmal Massenstähle — auch als unbeabsichtigte Verunreinigungen — gewisse Mengen von Legierungselementen.

Das Richtige wird man treffen, wenn man die von den großen Hüttenwerken in großen Mengen abgegossenen billigen Stähle als Massenstähle bezeichnet, die von einem Edelstahlwerk mit Sorgfalt und unter schärfster Kontrolle hergestellten Stähle dagegen als Edelstähle.

Die billigen Massenstähle werden meistens nach Festigkeit verkauft, die Edelstähle dagegen nach dem Verwendungszweck und unter einer Markenbezeichnung.

Reines Eisen wird entweder auf elektrischem Wege (Elektrolyse) oder nach einem Sonderschmelzverfahren erzeugt. Am bekanntesten ist das Armco-Eisen (Abkürzung für American Rolling Mill Company), das einen Reinheitsgrad von etwa 99,8% besitzt.

2. Der Kohlenstoff.

Das wichtigste Legierungselement im Stahl ist der Kohlenstoff (chemisches Zeichen: C). Die Bedeutung dieses Grundstoffes

wird klar, wenn man erfährt, daß die üblichen Werkzeugstähle in den gewohnten Härtestufen „weich“, „zäh“, „mittelhart“ und „hart“ Kohlenstoffgehalte von 0,65 bis 1,50% haben, daß also diese großen Verschiedenheiten in der Härte innerhalb einer Spanne von nur etwa 0,8% Kohlenstoff erscheinen.

Nun darf man sich die Sache aber nicht etwa so vorstellen, daß sich der Kohlenstoff als solcher über die ganze Eisenmasse gleichmäßig verteilt vorfindet. Es wird überraschen, daß sich im Stahl — wenigstens in den meisten der hier zu besprechenden Fälle — überhaupt kein Kohlenstoff im eigentlichen Sinne findet.

Jedermann wird sich von der Schule her erinnern, daß bei einer chemischen Verbindung zweier oder mehrerer Grundstoffe ein völlig neuer Stoff mit ganz anderen Eigenschaften entsteht, der mit den ursprünglichen Grundstoffen aber auch nichts mehr gemein hat. So ist z. B. Wasserstoff (chemisches Zeichen: H) ein leicht brennbares Gas, mit dem man wegen seines geringen spezifischen Gewichtes Luftballone füllt. Sauerstoff (chemisches Zeichen: O) ist ein Gas, ohne das es kein Feuer gibt, ja das Verbrennen ist überhaupt nichts anderes als ein fortlaufendes Entstehen einer chemischen Verbindung des Sauerstoffes mit dem betreffenden brennbaren Stoff. Vereinigt sich nun Sauerstoff mit Wasserstoff zu einer solchen chemischen Verbindung, dann entsteht — Wasser (H_2O). Mit Wasser kann man natürlich keine Luftballone mehr füllen, man kann sie aber damit löschen, wenn sie Feuer gefangen haben, denn der neue Stoff ist ja selbst unverbrennbar. Dieses einfache Beispiel soll nur in Erinnerung bringen, wie grundlegend die Eigenschaften zweier Elemente verändert werden, wenn sie sich zu einer chemischen Verbindung, also zu einem neuen (zusammengesetzten) Stoff vereinigen.

Genau so verhält es sich mit dem Kohlenstoff (C) im Stahl. Auch er ist nicht einfach mit dem Eisen (Fe) gemischt, sondern diese beiden Elemente Kohlenstoff und Eisen sind eine chemische Verbindung eingegangen und haben einen ganz neuen Stoff mit ganz anderen Eigenschaften gebildet, nämlich das *Eisenkarbid*, auch *Zementit* genannt, das die chemische Formel Fe_3C hat. Diese Formel besagt, daß an der Verbindung immer im gleichen Verhältnis 3 Teile Eisen (Fe) und 1 Teil Kohlenstoff (C) beteiligt sind.

In den meisten der für uns wichtigen Fälle ist es nun nicht der freie Kohlenstoff, sondern das Eisenkarbid, das im Stahl verteilt ist. Dennoch wird aber bei der Angabe der Zusammensetzung eines Stahles nicht der Gehalt an diesem neuen Stoff, dem Eisenkarbid, angeführt, sondern der entsprechende Gehalt an Kohlenstoff, der das Karbid bildet.

Während das reine Eisen weich und bildsam — fast wie Kupfer — ist, zeichnet sich das Eisenkarbid durch große Härte und Sprödigkeit aus. Es ist daher zu erwarten und trifft auch zu, daß ein Stahl um so härter ist, je mehr von diesem harten Karbid in die Masse des reinen Eisens verteilt ist.

Die Verteilung des vorhandenen Eisenkarbids ist nicht regellos und zufällig, sondern unterliegt strenger Gesetzmäßigkeit, wie wir noch sehen werden.

3. Kleiner, unbeschwerter Ausflug in die Atomphysik.

Wollen wir die später zu besprechenden Vorgänge und Veränderungen im Stahl richtig verstehen, dann müssen wir uns zuerst einmal mit der Frage beschäftigen, wie eigentlich die Materie aufgebaut ist.

Wie jeder weiß, sind die Stoffe aus Atomen zusammengesetzt. Die Natur baut aber nach anderen Grundsätzen und in anderen Formen als unsere biederer Maurermeister.

Der Unterschied beginnt schon bei der Gestalt der Bausteine: Die Atome sind nicht ziegel- oder quaderförmig, sondern haben nach unserer Vorstellung Kugelgestalt.

Ziegelsteine lassen sich ohne Zwischenräume schön aneinander-schichten, viele Abwechslungsmöglichkeiten in der Anordnung sind dabei jedoch nicht gegeben. Es wird einfach Ziegel an Ziegel gereiht und Stein auf Stein gesetzt. Das Ergebnis ist der starre Mauerkörper.

Kugelige Bausteine, wie wir uns die Atome vorstellen, können dagegen auch bei ganz regelmäßiger Anordnung die verschiedensten Stellungen zueinander einnehmen. Ein Beispiel ist in Abb. 1¹

¹ Von Herrn Prof. Wever, Eisenforschungsinstitut, Düsseldorf, freundlichst zur Verfügung gestellt.

dargestellt. Die Natur macht von diesen Möglichkeiten beim Bauen mit den Atomkugeln ausgiebig Gebrauch: jeder Stoff hat einen anderen Atomaufbau. Mit Hilfe der Röntgenstrahlen kann man ihn ohne Schwierigkeiten studieren und die Lage der einzelnen Atome genau bestimmen.

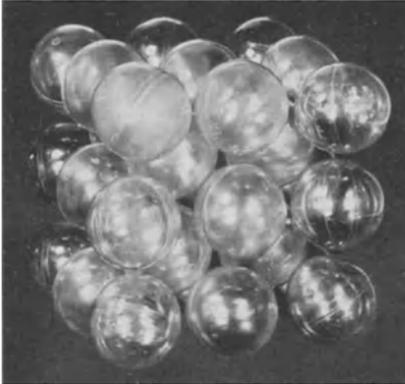


Abb. 1. Atomhaufwerk. Beispiel einer Anordnungsmöglichkeit von Atomen zueinander. Bei dieser Darstellungsweise sind hintereinanderliegende Atomkugeln teilweise oder ganz verdeckt.

Besser bezeichnet man nur die Lage der Atomzentren durch Punkte, wie es in Abb. 2 geschehen ist, und verbindet sie durch Linien. Auf diese Weise wird die Stellung aller Atome im Raum klar und eindeutig erkennbar. Man erhält damit räumliche Gittergebilde und spricht auch tatsächlich von „Raumgittern“.

Es ist weiter nicht verwunderlich, daß bei jeder Stoffart die Atome anders angeordnet sind, d. h. daß jeder Stoff ein anderes „Raumgitter“ aufweist. Merkwürdiger und folgenschwerer ist,

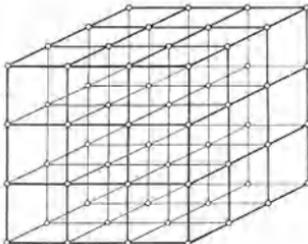


Abb. 2. Raumgitter. Übersichtliche schematische Darstellung. Nur die Atomzentren sind durch Punkte bezeichnet und durch Linien miteinander verbunden. Die Stellung eines jeden einzelnen Atoms im Raume ist klar erkennbar.

daß auch bei einem und demselben Stoff, z. B. beim Eisen, mehrere Gitterformen auftreten und infolge äußerer Umstände einander abwechseln können. Die Atome sind also keineswegs so starr aneinandergefügt wie die Ziegel im Mauerwerk.

Möglich wird dies unter anderem auch schon dadurch, daß jede Art von „Mörtel“ bei dieser Bauweise fehlt. Die Atome sind nicht miteinander verkittet, der Zusammenhalt wird

vielmehr durch große Anziehungskräfte bewirkt, die auf jedes einzelne Atom von allen Seiten durch die Nachbaratome ausgeübt werden; so bleibt trotz gewisser Abstände der Zusammenhang der Stoffe gewahrt.

4. Das Raumgitter des Eisens.

Für unseren Zweck interessiert vor allem, daß das reine Eisen (Fe) bei Raumtemperatur (20°)¹ ein raumzentriertes und bei hohen Temperaturen ein flächenzentriertes würfeliges Gitter aufweist. Abb. 3 stellt die beiden Formen dar, und zwar nur je eine vollständige Raummasche, aus dem Gitter herausgelöst.

Beim raumzentrierten Gitter des Eisens, also bei gewöhnlicher Temperatur, sitzt je ein Eisenatom, wie aus Abb. 3 ersichtlich ist, an den acht Ecken und außerdem ein neuntes Atom in der Mitte — im „Zentrum“ des Würfelraumes, daher die Be-

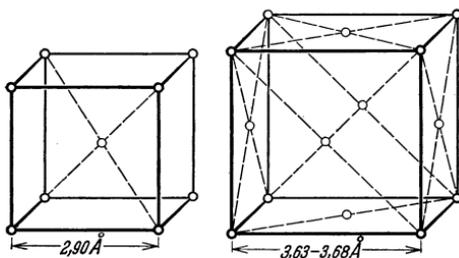


Abb. 3. Atomaufbau des α - und γ -Eisens².

zeichnung „raumzentriert“. Beim Erwärmen erfährt diese Anordnung bis 900° keine wesentliche Änderung. Bei dieser Temperatur jedoch ändern die einzelnen Atome wie auf ein Kommando kaleidoskopartig ihre Stellung zueinander, das Ganze „klappt um“ und aus dem „raumzentrierten“ Gitter wird ein „flächenzentriertes“. Wieder sitzt je ein Eisenatom an den acht Ecken des Gitterwürfels, das Zentrum des Würfels ist aber jetzt frei, der Gitterraum ist ganz leer. Dagegen sitzt in der Mitte — im Zentrum einer jeden der sechs Würfelseiten (Flächen) je ein Eisenatom; das Gitter ist jetzt „flächenzentriert“.

Der „raumzentrierte“ Gitterwürfel besteht, wie aus dem Vorgesagten und aus Abb. 3 hervorgeht, aus neun Atomen (je eines im Raumzentrum und an den acht Ecken), der „flächenzentrierte“ Würfel aber aus vierzehn Atomen (sechs in den Seitenflächen und acht an den Ecken). Da durch das bloße Erwärmen auf 900°

¹ Alle Temperaturangaben verstehen sich in Celsiusgraden.

² Die Abb. 3, 6—11, 13, 17, 21—29, 32—36 sind aus Rapatz: Edelmstähe, 2. Aufl., Berlin 1934, entnommen.

natürlich keine Vermehrung der Atome bewirkt wird, kann der Ausgleich nur derweise erfolgen, daß der „flächenzentrierte“ Würfel mehr Raum einnimmt. Nach dem „Umklappen“ wird also die gleiche Eisenmasse aus weniger vielen Raumwürfeln bestehen, von denen aber jeder einzelne größer und aus mehr Atomen zusammengesetzt ist. Die Gesamtzahl aller Atome muß selbstverständlich vor und nach dem „Umklappen“ gleich sein.

Das „raumzentrierte“ Eisen wird Alpha-Eisen genannt, das auf 900° und darüber erhitzte „flächenzentrierte“ dagegen Gamma-Eisen (Alpha ist die Aussprache für den griechischen Buchstaben $\alpha = a$, Gamma für den griechischen Buchstaben $\gamma = g$. Meistens schreibt man einfach α -Eisen, γ -Eisen). Bei noch weiterer Erwärmung, und zwar bei 1401° , klappt das „flächenzentrierte“ Gamma-Eisen wieder in ein „raumzentriertes“ um, das jetzt als Delta-Eisen bezeichnet wird (Delta ist die Aussprache für den griechischen Buchstaben $\delta = d$). Beim Abkühlen spielen sich natürlich die gleichen Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge ab. Ausdrücklich bemerkt sei jedoch, daß die angeführten Temperaturen alle unter dem Schmelzpunkt liegen, daß also die geschilderten Umwandlungen im festen Zustande erfolgen.

Es ist unbedingt notwendig, daß man die Anschauung von dem „Umklappen“ des Atomgitters von einer in die andere Form (Phase), wie es durch Erhitzen des Eisens auf entsprechende Temperaturen und umgekehrt durch Abkühlen ausgelöst wird, sich zu eigen macht. Nur dann kann man die einschneidenden Veränderungen und überhaupt das Wesen von „Stahl und Eisen“ verstehen.

5. Die Verteilung des Kohlenstoffs im Stahl.

Eisen ist ein kristallisierter Stoff wie jedes Metall. Durch das Mikroskop kann man die einzelnen Kristalle ohne weiteres erkennen — zum Unterschied vom Raumgitter, dessen Maschenausdehnungen unvorstellbar klein sind und auch im stärksten Mikroskop nicht beobachtet werden können. Die Eisenkristalle sind ungleichmäßig und unregelmäßig, weil sie sich gegenseitig in der vollen Ausbildung hindern. Bei reinem Eisen haben sie bei der Betrachtung durch das Mikroskop etwa die aus Abb. 4 ersichtliche Gestalt. Dieses Gefüge nennen wir *Ferrit* (lateinisch: ferrum = Eisen).

Vom Kohlenstoff wissen wir bereits, daß er mit dem Eisen eine chemische Verbindung nach der Formel Fe_3C eingeht. Der Formel entsprechend wird jedes einzelne Atom des in einem bestimmten Stahl vorhandenen Kohlenstoffs aus der Eisenmasse je drei Eisenatome herausziehen und zu Karbid abbinden. Je größer also der Kohlenstoffgehalt eines Stahles ist, desto mehr Eisen ist chemisch gebunden, desto weniger freies Eisen bleibt übrig.



Abb. 4. Ferritgefüge.

Das entstandene Eisenkarbid lagert sich in einem ganz bestimmten Mengenverhältnis in Form dünner Platten in die Eisenkristalle ab. Abb. 5 zeigt einen solchen einzelnen Kristall, der gleichmäßig von Karbidplatten durchzogen ist. Der Kohlenstoffgehalt eines derweise durchsetzten Kristalls ist etwa 0,90%. Demgemäß werden bei einem Stahl mit 0,90% Kohlenstoff gerade alle Kristalle mit Karbidplatten einheitlich durchzogen sein. Diese gleichmäßige Gefügeausbildung nennen wir *Perlit*. Durch das Mikroskop betrachtet zeigt das Perlitgefüge fingerabdruckähnliche Zeichnungen (Abb. 6).



Abb. 5. Einzelner Perlitkristall, schematisch. Kohlenstoffgehalt etwa 0,9%.

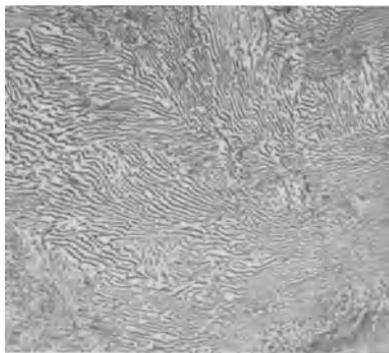


Abb. 6. Perlitgefüge. Kohlenstoffstahl mit etwa 0,9% C.

Da der Kohlenstoffgehalt des einzelnen Perlitkristalls bei den Kohlenstoffstählen

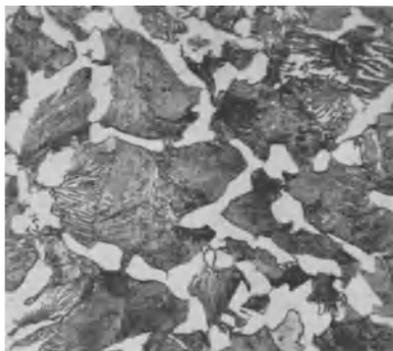


Abb. 7. Kohlenstoffstahl mit etwa 0,5% C.
Ferrit- und Perlitgefüge.

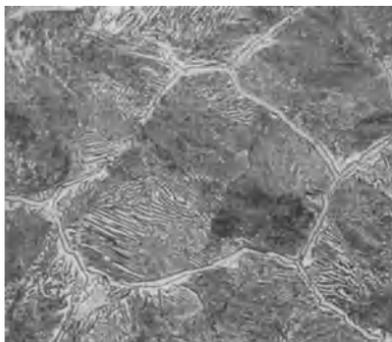


Abb. 8. Kohlenstoffstahl mit etwa 1,2% C.
Perlitgefüge und Korngrenzen-Zementit.

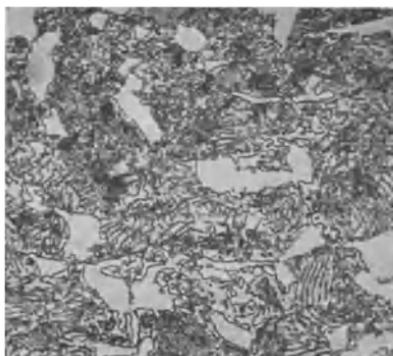


Abb. 9. Kohlenstoffstahl mit etwa 2,2% C.

immer 0,90% beträgt, so wird er bei einem Stahl mit weniger als 0,90% C nicht für sämtliche Kristalle ausreichen. In einem solchen Stahl wird man daher neben den Perlitkristallen auch noch Kristalle aus reinem, kohlenstofffreiem Eisen, also Ferritkristalle finden (Abb. 7).

Bei einem Stahl mit mehr als 0,90% Kohlenstoff sind alle Kristalle mit Karbidplatten versorgt, wozu aber nur 0,90% notwendig sind, so daß also noch reines Eisenkarbid übrigbleibt. Dieses überschüssige Karbid lagert sich zwischen die Perlitkristalle netzförmig oder vielmehr schalenförmig ab, so daß die Kristalle selbst einander nicht mehr berühren (Abb. 8).

Wenn schon beim Perlitgefüge die Karbidplatten den Kristallen und damit dem Stahl selbst eine gewisse Versteifung und Härte geben, so ist dies noch mehr der Fall bei einem Stahl mit mehr als 0,90% Kohlenstoff, bei dem das Schalennetz aus reinem, hartem Karbid außerordentlich versteifend wirkt. Je höher der Kohlenstoffgehalt steigt, desto dicker wird das Karbidschalennetz, während die von ihm umschlossenen Perlitkristalle gleichbleibend

0,90% Kohlenstoff aufweisen. Das Wachsen der Schalendicke setzt sich bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 1,70% fort und hört dann plötzlich auf. Ein weiterer Zusatz von Kohlenstoff hat keine Wirkung mehr auf die Schalendicke und natürlich noch weniger auf die umschlossenen Perlitkristalle. Der über 1,70% hinaus überschüssige Kohlenstoff ballt sich vielmehr zu groben Karbidkörnern zusammen, die dann mehr oder weniger unregelmäßig in die Grundmasse eingestreut sind (Abb. 9).

6. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.

Nachdem wir uns im Vorausgegangenen mit den einfachsten Grundvorstellungen und Begriffen der Gefügelehre vertraut gemacht haben, können wir uns jetzt dem sog. Eisen-Kohlenstoff-

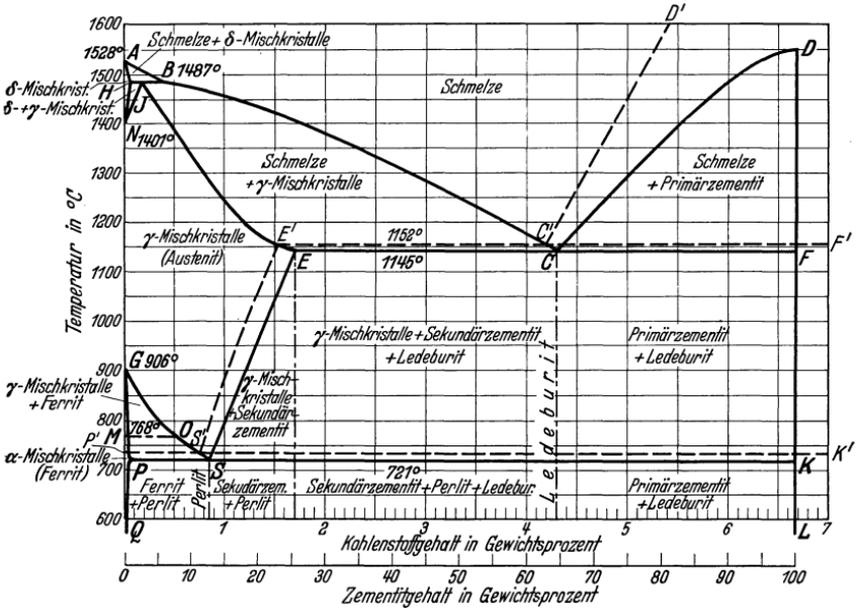


Abb. 10. Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.

Diagramm zuwenden (Abb. 10). An diesem „Zustandsschaubild“ kann man ablesen, in welchem Gefügestand sich Stähle verschiedenen Kohlenstoffgehaltes bei irgendeiner Temperatur befinden, soweit es sich nicht um später zu besprechende Zwangszustände handelt. Diese graphische Übersicht ist für die gesamte

Wärmebehandlung von größter Bedeutung, und wir müssen uns daher wenigstens mit dem wichtigsten Teilausschnitt aus dem Diagramm etwas genauer auseinandersetzen. Die nachfolgenden Ausführungen, die zum Teil schon Bekanntes wiederholen und zusammenfassen, wollen wir genau an Hand des Diagramms verfolgen¹.

Auf der Grundlinie, die wir Abszisse nennen, sind — von links nach rechts steigend — die Gehalte an Kohlenstoff und darunter zum Vergleich die Gehalte an dem entsprechenden Eisenkarbid angegeben. Der Anfangspunkt der Abszisse trägt die Ziffer 0 und bezeichnet somit den Standpunkt des reinen Eisens mit 0% Kohlenstoff. Das Aussehen des Gefüges des reinen Eisens kennen wir bereits von Abb. 4 her, und wir haben diese Gefügeform im vorhergehenden Abschnitt *Ferrit* genannt.

Wenn wir auf der Grundlinie — der Abszisse — nach rechts wandern, gesellt sich zum reinen Eisen in steigendem Ausmaße der Kohlenstoff in Form der uns schon bekannten chemischen Verbindung Fe_3C — als Eisenkarbid. Immer größer wird die Zahl jener Eisenkristalle, die in der uns schon geläufigen Weise von Karbidplatten durchzogen sind, bis wir bei 0,90% C zum Standort eines Stahles kommen, bei dem sämtliche Kristalle mit Platten durchsetzt sind. Dieses Gefüge haben wir im Abschnitt 5 mit *Perlit* bezeichnet (Abb. 6). Solcher Stahl wird auch eutektoider, d. i. wohlgebauter Stahl genannt. Die sog. untereutektoiden Stähle — also die Kohlenstoffstähle mit C-Gehalten zwischen 0 und 0,90% — bestehen aus einem mit dem Kohlenstoffgehalt wechselnden Gemisch von *Ferrit*- und *Perlit*kristallen. Abb. 7 zeigt z. B. das Gefüge eines Stahles mit etwa 0,50% Kohlenstoff. Bei den übereutektoiden Stählen — bei den Stählen mit mehr als 0,90% C — enthalten die einzelnen Kristalle selbst 0,90% in der bekannten Plattenform, der darüber hinausgehende Kohlenstoff lagert sich dagegen in der Form von reinem Eisenkarbid zwischen die *Perlit*kristalle netzschalenförmig ab (Abb. 8). Je mehr wir im Diagramm nach rechts gehen, d. h. je mehr der Kohlenstoffgehalt steigt, desto mehr wächst auch die Dicke des zwischengelagerten Schalenwerks, während der Kohlenstoffgehalt

¹ Bei unseren Betrachtungen interessieren uns nur die voll ausgezogenen Linien des Schaubildes; die gestrichelten Linien sind für unsere Zwecke belanglos.

der Kristalle selbst unverändert 0,90% bleibt. Bei 1,70% C hört das Wachsen der Schalendicke auf.

Wir unterbrechen jetzt unsere Wanderung in der Ebene und sehen uns einmal an, welche Veränderungen beim Erwärmen der Stähle eintreten. Links neben unserem Schaubild sind in senkrechter Richtung die Temperaturen angegeben. Wir nennen diese senkrechten Linien mit den Temperaturangaben für die verschiedenen Kohlenstoffgehalte Ordinaten.

Wir beginnen unsere Höhenwanderung beim Standort des reinen Eisens mit 0% Kohlenstoff. Wenn wir mit der Temperatur steigen, ereignet sich vorerst nichts Besonderes. In den niedrigen Temperaturbereichen kennen wir das Eisen bereits als raumzentriertes Alpha-Eisen. Es ist magnetisch. Erst bei 768° verliert es den Magnetismus, d. h. es läßt sich von einem Magneten nicht mehr anziehen — es wird zum „unmagnetischen Alpha-Eisen“. Früher nannte man es Beta-Eisen (Beta ist die Aussprache für den griechischen Buchstaben $\beta = b$). Man hat aber die Bezeichnung Beta-Eisen fallen lassen, seitdem man weiß, daß mit dem Erreichen dieser Temperatur — vom Verlust des Magnetismus abgesehen — keine besonderen Veränderungen des Gefügebauens des Eisens verbunden sind. Dennoch erhält dieser Temperaturpunkt in unserem Zustandsschaubild als eine Art Höhenmarke den Buchstaben M und wir nennen ihn den Haltepunkt A_2 — einen Haltepunkt A_1 gibt es beim reinen Eisen nicht¹.

Wird die Erwärmung fortgesetzt, dann kommt plötzlich bei 900° das uns schon bekannte Kommando „Umklappen!“, und das raumzentrierte Gitter des Alpha-Eisens stellt sich in das flächenzentrierte des Gamma-Eisens um (Abb. 3). Wir haben jetzt die

¹ Der Ausdruck „Haltepunkt“ ist damit zu erklären, daß an einem solchen Temperaturpunkt bei weiterer Wärmezufuhr oder weiterem Wärmenetzug die Temperatur des Stahles so lange auf gleicher Höhe stehenbleibt, bis sich die begonnene Änderung der Eigenschaften oder auch des inneren Aufbaues gänzlich vollzogen hat. Die Haltepunkte werden mit dem Großbuchstaben A (von arrêt = Halt) und der entsprechenden Indexziffer 1, 2, 3, 4 bezeichnet. Häufig setzt man nach dem Großbuchstaben A noch einen der beiden Kleinbuchstaben c und r und zeigt damit an, daß man zu dem Punkt durch Erwärmen ($c = \text{chauffage}$) aus niedrigeren Temperaturen oder durch Abkühlen ($r = \text{refroidissement}$) aus höheren Temperaturen gekommen ist, z. B. Ac_2 , Ar_3 . Die Haltepunkte beim Erwärmen und beim Abkühlen fallen nicht genau zusammen.

Gefügeform des *Austenits* vor uns (Abb. 11). Dem Temperaturpunkt von 900° geben wir als Höhenmarke den Buchstaben *G* (vgl. das Diagramm!) und die Bezeichnung: Haltepunkt A_3 .

Bei weiterer Steigerung der Temperatur ändert sich vorerst wieder nichts, nur die Größe der Austenitkristalle nimmt zu. Bei $1401^\circ =$ Haltepunkt A_4 (im Diagramm Buchstabe *N*) kommt abermals das Kommando „Umklappen!“, das flächenzentrierte Austenitgitter stellt sich wieder in ein raumzentriertes Gitter um, und es entsteht das Delta-Eisen. Der Bereich dieser Gefügeform erstreckt sich bis 1528° , bei welcher Temperatur dann das reine Eisen schmilzt (Buchstabe *A*).

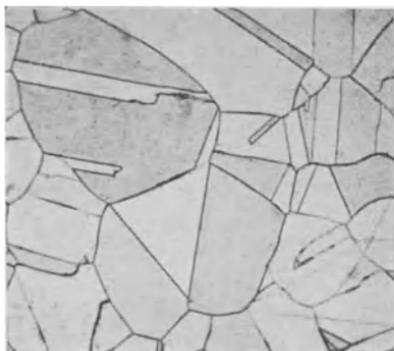


Abb. 11. Austenit.

Beim Abkühlen treten die gleichen Erscheinungen in umgekehrter Reihenfolge auf.

Das geschilderte „Umklappen“ des Raumgitters vom Alpha- in das Gamma-Eisen, von diesem in das Delta-Eisen und umgekehrt erfolgt beim reinen Eisen — also ohne Kohlenstoff und andere Legierungselemente — mit einer Leichtigkeit und Exaktheit, die nichts zu

wünschen übrig läßt. Die Schnelligkeit des Erwärmsens oder Abkühlens spielt in diesem Falle überhaupt keine Rolle.

In gleicher Weise wollen wir nun — immer an Hand des Diagramms — beobachten, welche Wirkung mit der Erwärmung bei einem Stahl mit 0,90% Kohlenstoff verbunden ist, d. h. bei einem Stahl, der in seiner ganzen Masse gleichmäßig aus plattendurchzogenen Perlitkristallen besteht. Auf der Grundlinie suchen wir den Standort der genannten Konzentration von 0,90% und steigen dann, der senkrechten Ordinate entlang, mit der Temperatur nach oben. Bis 721° geschieht nichts von Bedeutung. Bei dieser Temperatur spielt sich aber ein ganz neuer Vorgang ab: Das Eisenkarbid, also die chemische Verbindung Fe_3C , löst sich in dem Eisen auf. Um das besser zu verstehen, greifen wir auf unsere Anschauung vom Raumgitter zurück. Das bei tieferen Temperaturen beständige raumzentrierte Alpha-Eisen klappt jetzt infolge

der Beeinflussung durch den anwesenden Kohlenstoff schon bei 721° (Buchstabe *S*) in das flächenzentrierte um, d. h. der Haltepunkt A_3 ist von 900° auf 721° gesunken. Bei dieser Alpha-Gamma-Umwandlung wird, wie wir schon wissen, im Gitter der Würfelraum frei, und in diesen leeren Raum hinein löst sich der Kohlenstoff auf. Mit anderen Worten: das Kohlenstoffatom, das sich vorher irgendwo an den Würfelgrenzen befunden hat, sitzt jetzt mitten im flächenzentrierten Gamma-Würfel. Diesen Zustand bezeichnet man als feste Lösung oder — genau wie beim reinen Eisen auch — als *Austenit*. Die feste Lösung ist unmagnetisch, d. h. ein austenitischer Stahl wird vom Magneten nicht angezogen. Der einzelne Kristall der festen Lösung wird „Mischkristall“ genannt.

Gehen wir mit der Temperatur höher, dann schneidet unsere Ordinate — die Senkrechte über 0,90% — bei etwa 1250° eine Kurvenlinie, die sog. *Soliduslinie* (lateinisch: solidus = fest). Bei Überschreiten dieser Temperatur beginnt der Stahl allmählich zu schmelzen. Je mehr wir die Temperatur steigern, desto flüssiger wird der zuerst teigige Brei, bis beim Erreichen der nächsten Kurvenlinie, der *Liquiduslinie* (lateinisch: liquidus = flüssig) — in unserem augenblicklichen Fall bei etwa 1460° — der gesamte Stahl flüssige Schmelze ist. Unterhalb der Soliduslinie ist alles fest, oberhalb der Liquiduslinie ist alles flüssig, dazwischen eine teigige Masse.

An diesem Beispiel haben wir gesehen, daß durch das Hinzu-kommen des Kohlenstoffs der Umwandlungspunkt A_3 (Alpha-Gamma-Umwandlung), der doch beim reinen Eisen bei 900° liegt, wesentlich gesenkt wird, und zwar auf 721° . Auch der Schmelzpunkt erfährt eine Senkung; ein Punkt ist er eigentlich gar nicht mehr, denn das Schmelzen erfolgt jetzt über einen ganzen Temperaturbereich von etwa 1250 bis 1460° (s. Diagramm!).

Und noch etwas Wichtiges stellen wir fest: Bei der Umwandlung vom Alpha- in das Gamma-Eisen und vor allem umgekehrt bei der Umstellung von Gamma- auf Alpha-Eisen ist jetzt bei Anwesenheit des Kohlenstoffs die Schnelligkeit der Temperaturänderung nicht mehr nebensächlich, wie wir es beim reinen Eisen gesehen haben. Jetzt ist vielmehr für das ordnungsmäßige Umstellen eine bestimmte, wenn auch kleine „Mindestzeit“ erforderlich. Es ist dies auch verständlich, wenn man bedenkt, daß jetzt

bei der Umwandlung beispielsweise vom Alpha- in das Gamma-Eisen ein doppelter Vorgang stattfindet: Einerseits wandert das beim Alpha-Eisen im Mittelpunkt des Raumwürfels sitzende Eisenatom beim Umklappen in das flächenzentrierte Gamma-Eisen aus dem Würfelzentrum heraus, andererseits löst sich gleichzeitig das Kohlenstoffatom in den Gitterwürfel hinein. Bei diesem Stellungswechsel tritt eine gewisse gegenseitige Behinderung der Eisen- und Kohlenstoffatome auf, deren Überwindung eben eine bestimmte Mindestzeit erfordert.

Nachdem wir nun kennengelernt haben, in welcher Weise sich die Umwandlungsvorgänge sowohl beim reinen Eisen als auch beim reinen Perlit, d. h. beim Stahl mit 0,90% Kohlenstoff abspielen, interessieren uns noch die Vorgänge bei den gemischten Gefügeformen, also bei den Stählen mit weniger und mit mehr als 0,90% Kohlenstoff. Wir wissen schon, daß ein Stahl mit weniger als 0,90% Kohlenstoff — wir haben ihn untereutektoid genannt — zum Teil aus plattendurchsetzten Perlitkristallen und zum anderen Teil aus Ferritkristallen, d. h. aus reinen Eisenkristallen besteht. Wir greifen den Stahl mit 0,50% C heraus, der etwa zur Hälfte aus Ferrit- und zur anderen Hälfte aus Perlitkristallen besteht (Abb. 7), und beginnen wieder im Diagramm unsere Wanderung nach oben. Es ändert sich nichts bis 721° . Bei dieser Temperatur zerfallen innerhalb eines jeden einzelnen Perlitkristalles die Karbidplatten, und der Kohlenstoff löst sich in das Gitter hinein auf, das sich gleichzeitig von der Alpha- in die Gamma-Anordnung umgestellt hat. Innerhalb der einzelnen Perlitkristalle vollzieht sich also bei unserem Stahl mit 0,50% Kohlenstoff die gleiche Umwandlung, die sich im vorhergehenden Beispiel — beim reinen Perlit — über die ganze Masse des Stahles vollzogen hat. Diese Umwandlung der einzelnen Perlitkristalle erfolgt bei jedem Kohlenstoffstahl bei der gleichen Temperatur von 721° , weshalb wir diesen Temperaturpunkt den *Perlitpunkt* nennen und mit A_1 bezeichnen. Im Gegensatz zum reinen Perlit besteht aber in unserem jetzigen Beispiel der Stahl mit 0,50% Kohlenstoff, wie wir wissen, nur zur Hälfte aus Perlitkristallen; die andere Hälfte sind reine Ferritkristalle, die dann mit steigender Temperatur von den umgewandelten Perlitkristallen, die wir jetzt schon Austenitkristalle nennen müssen, aufgesaugt werden. Bei 800° ist dieses Aufsaugen beendet

und wir haben reinen, antimagnetischen Austenit vor uns. Im Diagramm ist das der Schnittpunkt der senkrechten Ordinate des Stahles von 0,50% C mit der schief abfallenden Linie $G-O-S$. Bei weiterer Temperatursteigerung schneidet diese Ordinate dann bei etwa 1380° die Soliduslinie, bei welcher der Stahl zu schmelzen beginnt, und erreicht weiter bei etwa 1490° die Liquiduslinie, an welcher der ganze Stahl geschmolzen ist.

Ganz ähnliche Vorgänge spielen sich bei den Stählen mit mehr als 0,90% Kohlenstoff ab, d. h. bei den übereutektoiden Stählen: Bei 721° — dem Perlitpunkt — wandeln sich die einzelnen Perlitkristalle wieder jeder für sich in Austenitkristalle um, die dann mit steigender Temperatur das Karbidschalenwerk allmählich aufsaugen. (Bei den untereutektoiden Stählen waren es an Stelle des Karbidnetzes die reinen Ferritkristalle, die aufgesaugt wurden.) An der Linie $S-E$ ist dieses Aufsaugen beendet, und wir haben wieder die gleichmäßige feste Lösung — reinen, antimagnetischen Austenit — vor uns. Erreichen wir mit der weiter zunehmenden Temperatur die Soliduslinie, dann beginnen natürlich auch die übereutektoiden Stähle zu schmelzen, und bei den Temperaturen der Liquiduslinie sind die Stähle jeder Konzentration geschmolzen.

Die wichtigsten Linien im ganzen Zustandsschaubild sind für uns die Linien $G-O-S$ und $S-E$, oberhalb welcher sich die Stähle in fester Lösung, also im austenitischen Zustand befinden.

Betrachten wir nochmals unser Diagramm, so stellen wir fest, daß bei dem Punkte E , der bei einer Temperatur von etwa 1145° liegt, der Gehalt des Austenits an gelöstem Kohlenstoff am größten ist. Wenn wir von diesem Punkte E eine senkrechte Linie nach unten ziehen, dann können wir an der Grundlinie diesen Gehalt mit 1,70% ablesen. Der Austenit kann demnach verschiedene Mengen von Kohlenstoff, allerhöchstens aber 1,70% lösen.

Wie wir schon wissen, ist diese Konzentration von 1,70% Kohlenstoff gleichzeitig jene, bei welcher das Karbidschalenwerk bei gewöhnlicher Temperatur die größte Schalendicke erreicht hat. Bei einem Gehalt von mehr als 1,70% erscheint der überschüssige Kohlenstoff, wie erinnerlich, in Form gröberer, harter Karbidkörner, die in das Gefüge hinein verstreut sind. Solche hochgekohlte Stähle nennt man *Ledeburit*stähle. Ledeburitishe Stähle zeichnen sich durch ganz besondere Härte aus.

Den wichtigsten Teilausschnitt des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms — mit den Kohlenstoffgehalten von 0,0 bis 1,70% und bei Temperaturen bis über die Umwandlungslinien $G-O-S-E$ — sehen wir in Abb. 12 gefügemäßig dargestellt. Die Abbildung ist aus einzelnen Säulen zusammengesetzt, von denen jede das Gefüge des Stahles mit dem darunter angegebenen Kohlenstoffgehalt darstellt. Die verschiedenen Gefügeformen sind deutlich zu unterscheiden. Ganz links sehen wir die Säule, welche der Ordinate über dem Nullpunkt im Diagramm entspricht; es sind die Ferritkristalle des kohlenstofffreien Eisens, die sich bis 900° nicht ändern und bei dieser Temperatur in den schwarz gezeichneten Austenit umklappen. In der zweiten Säule mit 0,10%

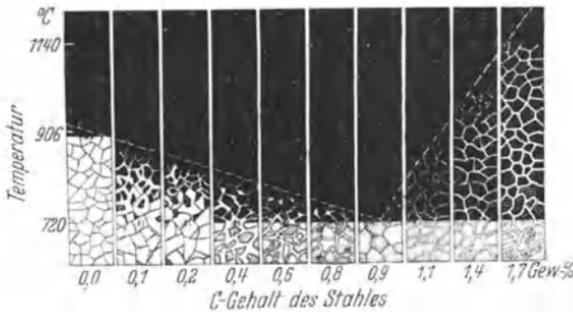


Abb. 12. Ausschnitt aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, gefügemäßig dargestellt.

Kohlenstoff finden sich im Gefüge schon einzelne kleinere Perlitkristalle — ihre Schraffierung stellt die bekannten Karbidplatten dar. Beim Perlitpunkt (721°) wandeln sich die Perlitkristalle — jeder für sich — in Austenitkristalle um, die bei fortschreitender Temperatursteigerung immer mehr die Ferritkristalle aufsaugen, bis wir beim Erreichen der Linie $G-O-S$ wieder den ganz gleichartigen, schwarz gezeichneten Austenit sehen. Je mehr wir nach rechts gehen, desto größer und zahlreicher werden die Perlitkristalle, die „in sich“ alle beim Perlitpunkt von 721° in Austenit aufgehen und in der Folge die Ferritkristalle aufsaugen; desto weniger zahlreich werden aber auch die reinen Ferritkristalle, weshalb sie auch schneller und früher aufgesaugt sind — die A_3 -Linie sinkt, genau wie im Diagramm selbst auch. Bei der Säule mit 0,90% Kohlenstoff besteht das ganze Gefüge nur mehr aus Perlitkristallen — aufzusaugende Ferritkristalle sind nicht mehr vorhanden.

Beim Perlitpunkt klappt daher das ganze Gefüge auf einmal um, so daß in dieser Säule der schwarz gezeichnete Austenit schon bei 721° voll erscheint. Noch weiter rechts treten neben den Perlitkristallen wieder weiß gezeichnete Anteile auf. Jetzt stellen aber diese weißen Teile nicht mehr Ferritkristalle dar, sondern sie bezeichnen das Schalenwerk des reinen Eisenkarbids Fe_3C . Der Vorgang beim Erwärmen ist auch hier der gleiche: Beim Perlitpunkt wandeln sich die einzelnen Perlitkristalle in schwarz gezeichnete Austenitkristalle um, die mehr und mehr jetzt das Karbid-schalenwerk aufsaugen, bis beim Erreichen der schiefe ansteigenden Linie $S-E$ wieder reiner Austenit vorliegt.

An dieser bildlichen Darstellung läßt sich gut erkennen, wie die schraffierten, von Karbidplatten durchzogenen Perlitkristalle bei allen Säulen, d. h. bei allen Kohlenstoffgehalten, nur bis zur gleichen Temperaturhöhe von 721° — bis zum Perlitpunkt — reichen. Dagegen sind die Begrenzungslinien des vollendeten Austenits — die Linien $G-O-S$ und $S-E$ — fallend und steigend, je nachdem ob mehr oder weniger Ferritkristalle bzw. Schalenzementit aufzusaugen sind. Mit anderen Worten: der A_1 -Punkt liegt immer bei 721° , der A_3 -Punkt dagegen — der wichtige Punkt der vollendeten Umwandlung, wo der reine gleichartige Austenit beginnt — ist in seiner Höhe vom Kohlenstoffgehalt abhängig. Dies muß bei der Wärmebehandlung berücksichtigt werden.

7. Die Wärmebehandlung (Nutzanwendung des Diagramms).

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir eine Übersicht erhalten über jene Veränderungen des Gefüges der Kohlenstoffstähle¹, die bedingt sind durch — nicht zu schnelle, aber auch nicht zu langsame — Veränderungen der Temperatur. Durch besonders schnelles, aber auch durch ungewöhnlich langsames Ändern der Temperaturen können wir noch andere Zustände herbeiführen, die besondere Eigenschaften mit sich bringen. Wir nennen diese Beeinflussung der Zustandsausbildung, wodurch bestimmte Eigenschaften hervorgerufen werden sollen, die Wärme-

¹ Als Kohlenstoffstähle bezeichnet man jene Stähle, die neben ihrem Gehalt an Kohlenstoff beabsichtigte Zusätze von weiteren Legierungselementen nicht aufweisen.

behandlung des Stahles und teilen sie ein in Glühen, Härten und Vergüten.

A. Das Glühen der Stähle.

Durch das Glühen der Stähle kann man verschiedene Ziele erreichen. Wir unterscheiden:

- a) Weichglühen,
- b) Normalglühen (Normalisieren),
- c) Spannungsfreiglühen.

a) **Weichglühen** (auf körnigen Zementit glühen). Nach den früheren Ausführungen bestehen die Perlitkristalle aus weichem Eisen, das von harten Karbidplatten durchzogen ist. Bei den Stählen mit mehr als 0,90% Kohlenstoff fanden wir die Perlit-

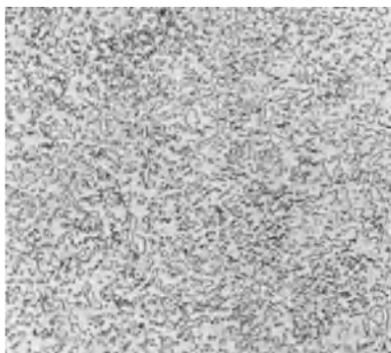


Abb. 13. Weichgeglühter Stahl: kugelige Karbidausbildung.

kristalle außerdem noch von Karbidschalen umschlossen, die sich zu einem harten und starren Schalenwerk verketten. Es ist klar, daß eine solche Anordnung des Karbids jeder Kaltbearbeitung, insbesondere dem Hobeln, Drehen, Fräsen usw., einen erheblichen Widerstand entgegensetzt. Im Weichglühen haben wir nun ein Mittel, die Anordnung und Verteilung des Karbids (Zementits) günstiger zu gestalten.

Wenn wir den Stahl ungefähr in der Temperatur knapp unter A_1 (Perlitpunkt = 721°) glühen — man kann auch um diese Temperatur pendeln —, dann wird die geschilderte Anordnung zerstört, und das Karbid ballt sich zu kleinen Kügelchen zusammen, die untereinander jetzt keinen oder nur lockeren Zusammenhang mehr haben und einzeln in die Grundmasse des weichen Eisens eingebettet sind. Auf diese Weise wird nicht nur das Karbid der Perlitplatten, sondern auch das des Schalenwerks umgeformt, und die Bearbeitung ist jetzt ohne Schwierigkeiten möglich (Abb. 13).

b) **Normalglühen** (Normalisieren). Wird ein Stahl zu lange und auf zu hohe Temperaturen (z. B. Weißglut) erhitzt, so wachsen

die Kristalle derweise, daß sich mehrere kleine zu größeren Kristallkörnern vereinigen. Einen derartigen Stahl nennt man überhitzt. Grobkörniger Stahl härtet schlecht und reißt leicht.

Um überhitztem Stahl wieder sein normales, feineres Gefüge zu geben, wird er normalgeglüht (normalisiert). Das Normalglühen wird knapp oberhalb des Umwandlungspunktes A_3 vorgenommen, also über der Linie $G-O-S$ im Diagramm, d. h. im Gamma-Bereich. Bei dieser Art des Glühens wird eine zweimalige Umwandlung bewirkt: beim Erwärmen von der Alpha- in die Gamma-Phase und beim nachträglichen Abkühlen zurück von der Gamma- in die Alpha-Phase. Durch die zweimalige Umwandlung erfolgt eine vollkommene „Umkristallisation“, wir erhalten kleinere Kristalle, d. h. das angestrebte feinere Gefüge.

Der eigentliche Zweck des Normalglühens ist aber der, dem Stahl, der vom Schmieden, Walzen oder Gießen her ein recht ungleichartiges Gefüge hat, zu „homogenisieren“, d. h. ihm ein gleichartiges Gefüge zu verleihen.

c) **Spannungsfreiglühen.** Im gewalzten oder geschmiedeten Stahl sind manchmal bedeutende Spannungen vorhanden, die auf ungleichmäßiges Abkühlen und andere Umstände zurückzuführen sind. Um diese Spannungen zu beseitigen, genügt ein Erwärmen auf etwa 500 bis 600° (dunkelbraune Glühfarbe) mit nachfolgender langsamer Abkühlung, was man „Spannungsfreiglühen“ nennt. Bei dieser Temperatur besitzt der Stahl nur mehr geringe Festigkeit, er ist weich und die inneren Spannungen können sich leicht ausgleichen. Es tritt hierbei jedoch noch nicht das beim „Weichglühen“ angestrebte kugelige Zusammenballen des Zementits auf.

B. Das Härten der Stähle.

Vom Abschnitt 3 her kennen wir den Begriff des Raumgitters: Die Atome, aus denen die Materie aufgebaut ist, kleben nicht aufeinander, sondern sind durch Zwischenräume voneinander getrennt. Die Zwischenräume werden nach allen Seiten durch große Anziehungskräfte aufrechterhalten, die wie Drahtseile wirken und strengste Ordnung erzwingen. Wird diese Ordnung durch irgendwelche Einflüsse von außen her gestört, dann suchen die „Drahtseile“ — die Anziehungskräfte — dies zu verhindern und die etwa aus der Reihe gedrängten Atome zurückzuzwingen. Es wird

ein außerordentlich starkes Zerren und Ziehen hervorgerufen, d. h. es treten bedeutende Gitterspannungen auf und — unser Stahl ist damit gehärtet. (Härtung kann allerdings auch durch andere Vorgänge erfolgen, wie wir noch sehen werden.)

Gehärteter Stahl befindet sich somit in einem Zwangszustande, und gerade dieser ist es, der die Härte ausmacht. Wie entsteht aber dieser Zustand? Er kann absichtlich hervorgerufen werden durch geeignete Maßnahmen, die wir mit „Härten“ bezeichnen. Er kann aber auch als — oft unerwünschte — Begleiterscheinung bestimmter Bearbeitungsvorgänge auftreten.

Wir unterscheiden folgende Arten von Stahlhärtung:

a) Umwandlungshärtung: Mehr oder weniger schroffes Abschrecken des Stahles aus dem Gebiete der festen Lösung, d. h. über $G-O-S$.

b) Kalthärtung: Begleiterscheinung vom Kaltwalzen, Ziehen, Kalthämmern u. dgl.

c) Ausscheidungshärtung.

a) **Die Umwandlungshärtung.** Im Gamma-Bereich (feste Lösung), also bei den Temperaturen über $G-O-S$, hat das Raumgitter des reinen Eisens die uns schon bekannte „flächenzentrierte“ Anordnung, bei welcher das „Zentrum“ des Würfelraumes frei von Eisenatomen ist. Bei Anwesenheit von Kohlenstoff ist dieser bei den hohen Temperaturen der festen Lösung in die Würfelräume hineingelöst. Der Kohlenstoff ist es also, der jetzt im Zentrum der Gitterwürfel sitzt. Nimmt die Temperatur langsam ab, dann wandelt sich das flächenzentrierte Gamma-Eisen in das raumzentrierte Alpha-Eisen um, d. h. es wandern Eisenatome in das Zentrum der einzelnen Würfel. Das dort sitzende Kohlenstoffatom muß den Platz räumen und setzt sich irgendwo an den Würfelgrenzen fest. Dieser Platzwechsel geht ohne Schwierigkeiten vor sich, wenn hierfür genügend Zeit zur Verfügung steht.

Wenn man aber den über A_3 erhitzten Stahl schroff abschreckt, etwa durch Eintauchen in kaltes Wasser, dann reicht die jetzt ganz wesentlich verkürzte Abkühlungszeit für die ordnungsmäßige Abwicklung des geschilderten Stellungswechsels nicht mehr aus. Wohl klappt das Gamma-Eisen in der gewohnten Weise in das Alpha-Eisen um, der behäbigere Kohlenstoff kommt aber nicht so schnell mit, und wenn die durch das Abschrecken rasch absinkende Temperatur bei etwa 250° angelangt ist, hört die Mög-

lichkeit eines Stellungswechsels überhaupt auf. Das Kohlenstoffatom bleibt zwangsweise im Würfel eingeschlossen, obwohl dort für dasselbe doch eigentlich gar kein Platz mehr vorhanden ist, denn nach dem Umklappen sitzt ja bekanntlich ein Eisenatom im Zentrum des Würfelraumes. Das raumzentrierte Eisenatom und das Kohlenstoffatom sind somit in dem engen Käfig des Würfelraumes zusammengesprengt; sie machen sich gegenseitig diesen Raum streitig und eines sucht das andere durch die Würfelwände hindurchzudrücken. Doch das Gitter hat sich bei der niedrigen Temperatur solide geschlossen, und die beiden Atome bleiben zusammengepreßt. Dieser Zwangszustand macht aber die Härte aus.

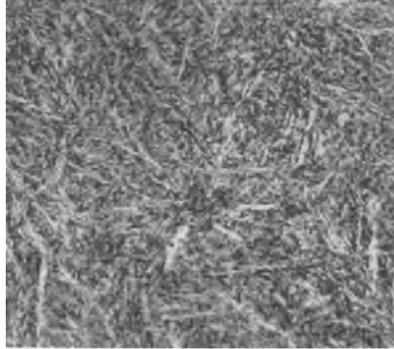


Abb. 14. Martensit.

Um die geschilderte Wirkung zu erzielen, muß die Temperatur sehr rasch mit der sog. „kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit“ sinken, die mehrere hundert Grad je Sekunde beträgt.

Das so entstehende Gefüge wird *Martensit* genannt. Im Mikroskop betrachtet stellt es sich als ein nadeliges Gebilde dar, wie es die Abb. 14 zeigt. Ganz fein ausgebildeter *Martensit*, bei dem die Nadeln kaum zu erkennen sind, wird auch *Hardenit* genannt (Abb. 15).

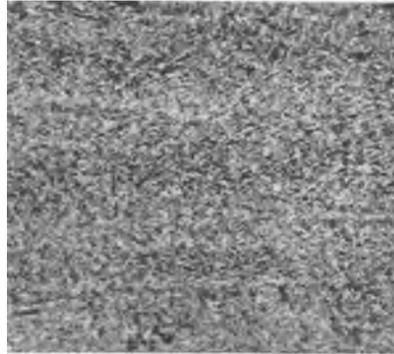


Abb. 15. Hardenit.

Ist die Abkühlungsgeschwindigkeit nicht ganz so schnell, so beginnt zwar die Ausscheidung des Kohlenstoffs in Form von Karbid, der Vorgang bleibt aber in den Anfängen stecken. Durch das Mikroskop gesehen zeigt ein derart behandelter Stahl sehr fein verteilten Plattenperlit, und wir nennen das Gefüge *Sorbit* (Abb. 16).

Wird die Abkühlungsgeschwindigkeit etwas größer, ohne aber noch jene „kritische“ zu erreichen, dann erhalten wir das aus Abb. 17 ersichtliche Gefüge, das den Namen *Troostit* führt. Dieser

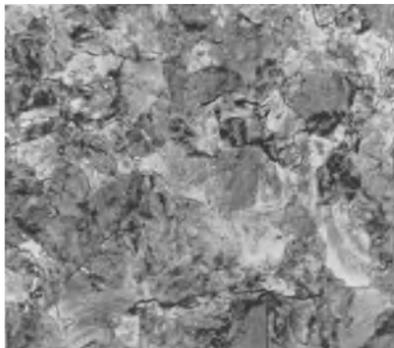


Abb. 16. Sorbit.

Zustand weist bereits eine größere Härte auf als der sorbitische, ergibt aber noch nicht die Vollhärte des Martensits. Der oben angegebene Temperaturpunkt von etwa 250° , bei welchem das Kohlenstoffatom aus dem Gitter nicht mehr heraustreten kann, heißt der *Martensitpunkt*.

Wenn sich ein Stahl härten lassen soll, dann muß er einen gewissen Mindestgehalt an Kohlenstoff haben. Wir

haben ja gesehen, daß die Härte nichts anderes ist als ein Zwangszustand, der durch das Zusammenpressen je eines Eisen- und Kohlenstoffatoms im engen Würfelraum entsteht. Als Grenze

brauchbarer Umwandlungshärtbarkeit kann man etwa 0,40% Kohlenstoff annehmen. In diesem Zusammenhange ist zu erwähnen, daß beim Walzen, Schmieden und Glühen meistens eine gewisse Entkohlung der Oberfläche des Stahles auftritt, die dann beim Härten ungenügende Härte annimmt, weil ja kohlenstoffarmer Stahl nicht oder wenig härtet. Es ist daher



Abb. 17. Troostit (dunkel), eingestreut in Martensit (hell).

notwendig, die Stahlabmessungen für Werkzeuge etwas größer zu bestellen, damit ein Abarbeiten der Randzonen des Stahles möglich wird und dadurch die entkohlte Oberflächenschicht entfernt werden kann.

Aus welcher Temperatur wird nun gehärtet? Die Härtetemperatur richtet sich nach dem Kohlenstoffgehalt. Der

Grund dafür ist leicht einzusehen: Das Härten erfolgt aus dem Gebiet der festen Lösung, die Temperatur darf jedoch nicht zu hoch über A_3 ansteigen, da sonst, wie wir wissen, der Stahl überhitzt wird. Richtig härtet man aus einer Temperatur etwa 40 bis 60° über dem A_3 -Punkt, d. h. über der Linie $G-O-S$. Da diese Linie mit steigendem Kohlenstoffgehalt (bis 0,90% C) fällt, so fällt damit auch die Härtetemperatur. Bei den übereutektoiden Stählen, also bei den Stählen mit mehr als 0,90% Kohlenstoff, steigt man jedoch nicht längs der Linie $S-E$ mit der Härtetemperatur wieder an. Das ist deshalb nicht notwendig, weil der übereutektoiden Schalenzenitit, der sich nach dem meist vorangegangenen Weichglühen in kugeligiger Form befindet, schon an und für sich außerordentlich hart ist. Die Härtetemperatur bleibt daher bei den übereutektoiden Stählen in gleicher Höhe, 40—60° über dem Perlitpunkt. Die eigentliche Härtung erstreckt sich bei diesen Stählen nur auf die Perlitkristalle, die harten Zementitkugeln liegen nach dem Härten eingebettet in die gehärtete Grundmasse. In Abb. 18 werden die Härtetemperaturen durch die Linie $a-b$ bezeichnet.

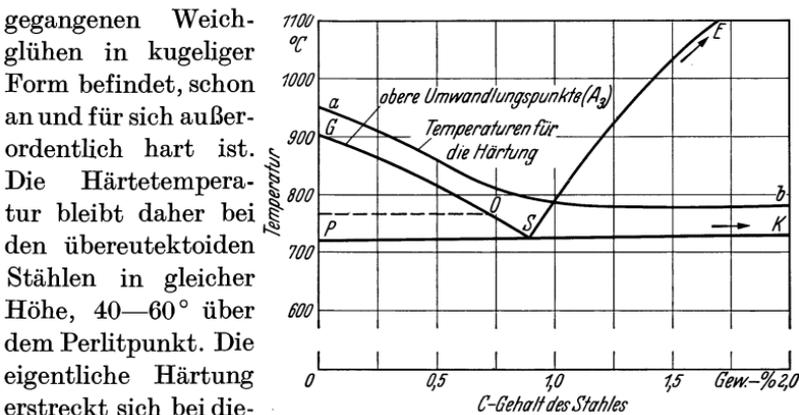


Abb. 18. Härtetemperaturen der Kohlenstoffstähle bei mittlerer Stückgröße.

Das Anlassen der gehärteten Stähle. Erwärmt man gehärteten Stahl, so werden die Wirkungen des Härtens um so stärker rückgängig gemacht, je höher die Temperatur steigt. Dieses Erwärmen nennt man *Anlassen*. Während bis etwa 100° nur Härtenspannungen verringert werden, fällt darüber hinaus die Härte selbst ab und der Stahl wird zäher. Damit ist auch schon der Zweck des Anlassens gesagt: man läßt den Stahl an, um ihm Härtenspannungen zu nehmen, die schon an sich zum Reißen des gehärteten Werkzeugs führen könnten, noch bevor es in Verwendung genommen wird; man läßt den Stahl aber auch deshalb

an, weil er im vollharten Zustande für das Arbeiten meist zu spröde wäre.

Beim Erwärmen auf die Anlaßtemperaturen läuft der Stahl an, d. h. es erscheinen die sog. Anlaßfarben, denen bestimmte Temperaturen entsprechen. Man kann daher an der Anlaßfarbe sehen, welche ungefähre Temperatur der Stahl angenommen hat. Je höher die Anlaßtemperatur gewählt wird, desto mehr geht die Härte zurück, desto zäher wird der Stahl. Die anzuwendende Anlaßtemperatur richtet sich nach dem Verwendungszweck des betreffenden Werkzeuges.

Die Anlaßfarben sind:

20°	blank,	290°	dunkelblau,
200°	blaßgelb,	300°	kornblumenblau,
220°	strohgelb,	320°	hellblau,
240°	braun,	350°	blaugrau,
260°	purpur,	400°	grau.
280°	violett,		

Zu erklären sind die Anlaßfarben damit, daß die Oberfläche des Stahles bei der Anlaßwärme oxydiert. Je höher oder länger erwärmt wird, desto dicker wird die Oxydschichte und damit ändert sich die Farbe.

Es braucht wohl nicht besonders darauf aufmerksam gemacht zu werden, daß die Anlaßfarben selbstverständlich nicht das geringste mit den Glühfarben zu tun haben.

b) Abarten der Umwandlungshärtung. α) Stufenhärtung und Warmbadhärtung (Thermalhärtung). Eine Abart der Umwandlungshärtung ist die Stufenhärtung. Sie wird noch wenig angewendet, obwohl sie gewisse, nicht zu unterschätzende Vorteile bietet. Das zu härtende Werkstück wird dabei in zwei Stufen abgeschreckt: zuerst in einem warmen Bad, dessen Temperatur beträchtlich über dem Martensitpunkt liegt, und unmittelbar darauf in einem zweiten, kalten Bad. Beim Abschrecken im warmen Bad werden die Vorbedingungen für die Martensitbildung geschaffen und beim nachfolgenden raschen Abkühlen im kalten Bad tritt der Martensit selbst, der Träger der Härte, auf.

Bei höher legierten Stählen kann man auch so vorgehen, daß man die Temperatur des warmen Bades etwas tiefer — knapp über dem Martensitpunkt — wählt. Zur gänzlichen Abkühlung legt man die Stücke sodann an die Luft, das kalte Bad läßt man

entfallen. Diese Art der Härtung hat man Warmhärtung (Thermalhärtung) genannt. Der metallurgische Vorgang ist der gleiche wie oben: Im warmen Bad wird die Martensitbildung vorbereitet, der Martensit selbst tritt erst beim weiteren Abkühlen an der Luft auf.

Als Ziel erreicht man bei diesen Härtemethoden große Verzugs- und Spannungsfreiheit der gehärteten Teile.

β) Die Einsatzhärtung. Eine andere Abart der Umwandlungshärtung ist die Einsatzhärtung. Man verwendet dazu Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt ($C =$ etwa 0,15 bis 0,20%), also Stähle, die wenig oder gar nicht härten, d. h. zäh bleiben, und führt in die Oberfläche Kohlenstoff ein. Zu diesem Zweck verpackt man die aus solchen kohlenstoffarmen Stählen angefertigten Teile zusammen mit kohlenstoffabgebenden Mitteln (sog. Zementationsmitteln), z. B. Lederkohle, Knochenkohle, Bariumkarbonat usw., in geeignete Kasten und erhitzt das Ganze auf hohe Temperaturen. Dabei vergast der Kohlenstoff der Zementationsmittel und dringt in die Oberfläche der verpackten Werkstücke ein. Je höher die Einsatztemperatur ist und je länger eingesetzt wird, desto dicker wird die aufgekohlte Randzone. Über eine Dicke von etwa 2 mm wird man jedoch zweckmäßigerweise nicht hinausgehen. Die Schnelligkeit der Aufkohlung wird dabei auch von der Art des Zementationsmittels abhängen. Die Dauer der Aufkohlung wird sich praktisch zwischen 4 bis 6 Stunden erstrecken. Stellen, die weich bleiben sollen, bedeckt man mit Lehm oder überzieht sie auf galvanischem Wege mit einer dünnen Kupferschicht. Der Kohlenstoff kann dann an diesen Stellen in die Oberfläche nicht eindringen.

Ist das Einsetzen beendet, dann bestehen die Stücke aus zweierlei Stahl: aus dem Kern von der ursprünglichen nichthärtenden, zähen Beschaffenheit und aus der aufgekohlten und damit werkzeugstahlähnlichen Randzone mit etwa 1% Kohlenstoff und darüber. Härtet man jetzt, dann bleibt der nichthärtende Kern zäh, in der Randzone, d. h. an der Oberfläche, erhält man dagegen Glashärte.

Man wird daher die Einsatzhärtung immer dann anwenden, wenn ein Werkstück eine harte, verschleißfeste Oberfläche und gleichzeitig einen zähen, gegen Stoß- und Biegebeanspruchung unempfindlichen Kern besitzen soll (z. B. Zahnräder, Wellen, Bolzen usw.).

Da man nach dem Einsetzen, wie ausgeführt, zweierlei Stahl vor sich hat, ergibt sich von selbst, daß auch eine zweifache Wärmebehandlung notwendig wird. Vom Eisen-Kohlenstoff-Diagramm her wissen wir ja, daß bei Stählen mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt die Wärmebehandlung bei verschiedenen Temperaturen zu erfolgen hat.

Vor allem haben wir einmal zu berücksichtigen, daß nach dem durchgeführten Einsetzen die Werkstücke stark überhitzt sind, da sie ja längere Zeit einer hohen Temperatur ausgesetzt waren. Um das ursprüngliche feine Gefüge zurückzuerhalten, wird man die Teile aus einer Temperatur knapp oberhalb A_3 abschrecken. Aus dem Diagramm ersehen wir, daß diese Temperatur für einen Kohlenstoffgehalt von 0,15 bis 0,20 % etwa 900° beträgt (s. auch Abb. 18). Mit diesem Abschrecken erzielt man eine ähnliche Kornverfeinernde Wirkung im Kern wie beim Normalglühen; gleichzeitig wird der Kern in bescheidenem Maße verfestigt, soweit dies bei dem geringen Kohlenstoffgehalt überhaupt möglich ist. Die gewünschte Zähigkeit bleibt dabei gewahrt. Die angegebene Temperatur von 900° ist aber für den aufgekohlten Rand mit etwa 1 % Kohlenstoff zu hoch und bewirkt in dieser Zone wieder eine Überhitzung. Aus dem Diagramm ergibt sich für einen Stahl mit 1 % Kohlenstoff eine Härtetemperatur von etwa 800° . Wir bringen daher unser Werkstück bei einem zweiten Erwärmen auf diese niedrigere Temperatur. Dabei erfolgt jetzt die Umkristallisation und Kornverfeinerung auch der aufgekohlten Randzone. Der Kern wird dadurch nicht mehr berührt, weil ja die höhere Temperatur von 900° erforderlich wäre, um ihn zu beeinflussen. Nun härtet man in der üblichen Weise durch Abschrecken im Härtebad.

Um Kosten zu sparen, kann man weniger beanspruchte Teile sofort aus dem Einsatz härten. Dabei wird der Rand selbstverständlich auch hart, wenn auch überhitzt und grobkörnig. In manchen Fällen wird dies aber nicht viel ausmachen, wenn nur der Kern zäh und bruchstark ist.

Das Aufkohlen der Randzone kann man auch durch flüssige oder durch gasförmige Zementationsmittel durchführen. Beim flüssigen Verfahren werden die Werkstücke in kohlenstoffabgebende Bäder von etwa 800 bis 900° auf eine Dauer von etwa 1 bis 2 Stunden getaucht und dann abgeschreckt (*Durferrit*-Verfahren). Beim Einsetzen in Gas werden die aufzukohlenden Teile in einer

sich langsam drehenden zylindrischen Retorte erhitzt, in welche das Kohlendgas (meist Leuchtgas oder Kohlenwasserstoff) unter höherem Druck eingepreßt wird.

γ) Die örtliche Oberflächenhärtung (Brennerhärtung). Bei dieser Abart der Umwandlungshärtung wird das Werkstück, das gehärtet werden soll, nicht als Ganzes auf Härtetemperatur erhitzt, sondern nur örtlich, und zwar meistens mit der Sauerstoff-Azetylenflamme. Das Abschrecken erfolgt unmittelbar darauf, bevor der Kern warm geworden ist.

Im Gegensatz zu der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Art von Oberflächenhärtung, der Einsatzhärtung, wird bei der Brennerhärtung die Oberfläche der Werkstücke nicht aufgekühlt. Man kann daher hierfür nur solche Stähle verwenden, die schon an sich härtbar sind, d. h. einen Kohlenstoffgehalt von wenigstens etwa 0,40% haben.

Bei der Brennerhärtung wird unter anderem als Vorteil empfunden, daß sich die Werkstücke nicht verziehen, weil sie ja im Kern kalt bleiben. Auch hat man es in der Hand, nur jene Teilflächen zu härten, die dem Verschleiß ausgesetzt sind.

Die praktische Ausführung der Brennerhärtung ist je nach der Form der zu härtenden Teile verschieden, und es wurden hierfür auch eine ganze Reihe von Sondermaschinen geschaffen.

Das von der Firma „Griesogen“ in Frankfurt a. M. entwickelte Verfahren eignet sich besonders zum Härten von Zahnrädern. Dabei wird abwechselnd je eine Zahnflanke durch die Brennerflamme erhitzt und unmittelbar darauf mit einem Wasserstrahl abgeschreckt. Für diesen Zweck baut die genannte Firma vorzügliche Härtemaschinen (Abb. 19).

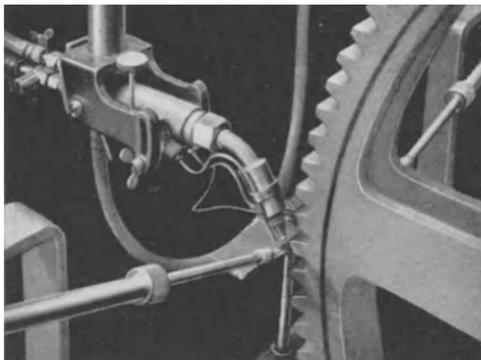


Abb. 19. Härtemaschine für Zahnräder (Griesogen). (Aus dem AWF-Härtebuch, AWF 261, 1. Aufl.)

Für das Härten der Lagerstellen von Kurbelwellen wurde von den Deutschen Edelstahlwerken A.-G. das sog. Doppelduro-Verfahren entwickelt. Dabei wird die Welle vor einem feststehenden, schlitzförmigen Brenner derweise gedreht, daß die Brennerflamme die Lagerstelle in der ganzen Breite bestreicht. Wenn die Zapfenoberfläche nach ganz kurzer Zeit auf Härtetemperatur gebracht worden ist, schreckt man mittels Brause ab. Abb. 20 zeigt schematisch die Härteanlage.

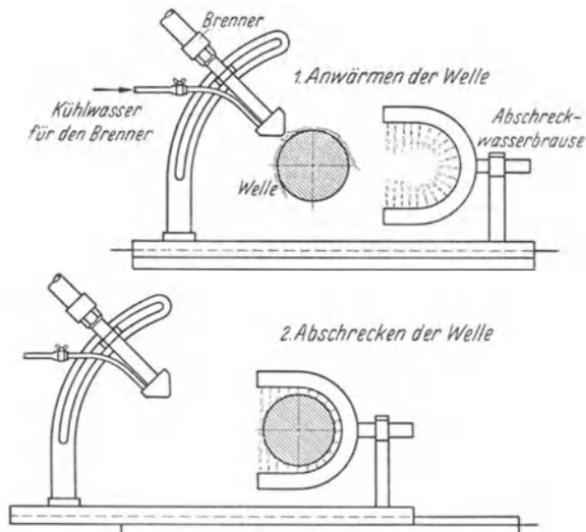


Abb. 20. Härteanlage für Wellen (Doppelduro). (Aus dem AWF-Härtebuch, AWF 261, 2. Aufl.)

Anmerkung. Eine weitere Oberflächenhärtung, die Nitrierhärtung, wird in Abschnitt 22 besprochen.

c) **Die Kalthärtung.** Beim Warmwalzen und Warm Schmieden werden die Eisenkristalle dauernd zertrümmert. Die Kristalltrümmer wachsen jedoch bei den hohen Arbeitstemperaturen sofort wieder zu normalen Kristallen aus. Bei kalter Verformung (Ziehen, Hämmern usw.) werden die Kristalle zwar ebenfalls zertrümmert oder sonst verformt, sie können aber bei gewöhnlicher Temperatur nicht nachwachsen. Damit ist eine Härteannahme verbunden, die unter Umständen ganz bedeutend sein kann.

Zu erklären ist das vielleicht am besten in folgender Weise: Als Härte bezeichnet man vor allem die Eigenschaft eines Stoffes,

einem von außen eindringenden Gegenstand, etwa der Kugel der Brinellpresse, einen bestimmten Widerstand entgegenzusetzen. Bei weichem Eisen ist dieser Widerstand nicht sehr groß, denn die Eisenkristalle lassen sich in gewissem Ausmaße auch im kalten Zustande verhältnismäßig leicht verschieben — sie gleiten etwas aneinander und die Brinellkugel drückt sich in den Eisenkörper ein. Sind die Kristalle durch Kalthärtung zertrümmert oder sonst stärker verformt, dann ist ein Verschieben schwieriger. Die vorher glatte Kristalloberfläche ist zackig und uneben geworden — die sog. Gleitflächen sind mehr oder weniger zerstört. Damit ist die Beweglichkeit der Kristalle geringer geworden und die Brinellkugel hat beim Eindringen einen größeren Widerstand zu überwinden, d. h. der Stahl ist jetzt härter. So wird es verständlich, daß Kalthärtung selbst bei kohlenstoffärmsten Stählen auftritt, bei denen eine Umwandlungshärtung nicht mehr möglich wäre.

Werden kalt verformte Stähle gegläht, so wird dadurch der geschilderte Ausnahmestand aufgehoben, denn bei den hohen Glühtemperaturen können die Kristalltrümmer wieder schnell und leicht zu vollen Kristallen auswachsen.

Man wird daher kalt verformte Stähle immer einer Glühung unterwerfen, wenn die Begleiterscheinung der Kaltverformung — die Härte — nicht erwünscht ist. So wird man z. B. beim Ziehen, das aus mehreren Arbeitsvorgängen besteht, Zwischenglühungen einschalten müssen, da der Stahl sonst so hart wird, daß das Fertigziehen unmöglich ist.

d) Die Ausscheidungshärtung (Aushärtung). Diese noch nicht lange bekannte Art von Härtung beruht im wesentlichen darauf, daß der Stahl im festen Zustand bei höheren Temperaturen ein größeres Lösungsvermögen für Legierungselemente hat als bei Raumtemperatur, und zwar auch schon innerhalb der gleichen Eisenphase, d. h. ohne Alpha-Gamma-Umwandlung.

Die gleiche Erscheinung kennt jedermann bei den flüssigen Lösungen. Eine Lösung, die von dem betreffenden Stoff nichts mehr aufnehmen kann, heißt „gesättigt“. Wird die Temperatur der Lösung erhöht, dann steigt das Lösungsvermögen oft beträchtlich an. So enthält z. B. eine „heiß gesättigte“ Alaunlösung 24 mal mehr Alaun als eine „kalt gesättigte“. Läßt man eine heiß gesättigte Lösung erkalten, so muß sich notwendigerweise

der über den Sättigungsgrad des kalten Zustandes vorhandene Überschuß ausscheiden.

Genau so verhält es sich mit den „festen Lösungen“ des Stahles. Wenn man eine bei höheren Temperaturen — angenommen bei 500 bis 600° — mehr oder weniger gesättigte feste Lösung langsam abkühlen läßt, so scheiden sich die für den kalten Zustand überschüssigen Bestandteile fortschreitend aus. Schreckt man den Stahl aber aus den höheren Temperaturen ab, dann bleibt die Lösung in der gleichen Zusammensetzung vorerst noch bestehen. Allmählich scheiden sich aber dann doch — manchmal erst nach längerer Zeit — jene überschüssigen Teilchen aus, die auch bei langsamer Abkühlung nicht in Lösung gehalten werden können, und lagern sich zwischen die Kristalle ab. Dieses Ausscheiden kann man beschleunigen, indem man den abgeschreckten Stahl wieder etwas erwärmt. Natürlich darf man dabei mit der Temperatur nicht so hoch gehen, daß das Lösungsvermögen des Stahles wieder stärker erhöht wird.

Das Ausscheiden der gelösten Stoffe bringt eine Störung der Gleitfähigkeit der Kristalle mit sich und damit eine oft nicht unwesentliche Härteannahme des Stahles. Ein Beispiel aus dem täglichen Leben soll dies verständlich machen: Wenn ein Straßenbahnwagen bei glatten Schienen gleitet (rutscht) und nicht zum Halten gebracht werden kann, dann gibt der Wagenführer Sand, der sich zwischen Schienen und Räder legt und eine stärkere Reibung hervorruft; nun kann der Wagen gebremst werden. Genau die gleiche Wirkung tritt im Gefüge des Stahles ein, wenn sich feine Teilchen zwischen die Kristalle ausscheiden, die vorher bei den höheren Temperaturen gelöst waren: Die blanken Gleitflächen werden rau, die Kristalle bremsen sich gegenseitig ab und können der eindringenden Brinellkugel nicht mehr so leicht nachgeben — der Stahl ist härter geworden.

Nicht alle Legierungselemente sind für die Ausscheidungshärtung in gleicher Weise geeignet. Kohlenstoff wird z. B. deshalb weniger in Betracht kommen, weil das Eisen innerhalb der Alpha-Phase nur sehr geringe Lösungsfähigkeit für dieses Element hat. Weit besser eignen sich Kupfer, Titan, Wolfram, Molybdän, Beryllium.

Die Ausscheidungshärtung als bewußte Wärmebehandlung steckt noch in den Kinderschuhen. In der Zukunft dürfte ihr aber eine größere Bedeutung zukommen.

Eine Phasenumwandlung oder Martensitbildung tritt bei der Ausscheidungshärtung nicht auf.

C. Das Vergüten der Stähle.

Das Vergüten ist eine zusammengesetzte Wärmebehandlung. Es besteht in einem Härten mit darauffolgendem Anlassen auf höhere Temperaturen (etwa 400 bis 750°), womit eine bedeutende Steigerung der Zähigkeit gegenüber dem vollgehärteten Zustand verbunden ist. Je höher die Anlaßtemperatur gewählt wird, desto mehr verliert der gehärtete Stahl an Festigkeit und um so mehr nimmt seine Zähigkeit zu. Man kann daher durch entsprechendes Anlassen alle Festigkeitsabstufungen vom vollgehärteten bis herab zum weichgeglühten Zustand erreichen.

Angewendet wird das Vergüten hauptsächlich bei den Baustählen, die ja neben genügender Festigkeit eine besondere Zähigkeit besitzen müssen, um der mannigfachen Beanspruchung im Maschinenbau (Zug, Druck, Stoß, Biegebeanspruchung usw.) zu genügen.

Vergleichen wir das „Vergüten“ mit dem bloßen „Anlassen“, das auf Seite 23 beschrieben wurde, so finden wir folgenden Unterschied:

Anlassen = das Erwärmen gehärteter Werkzeuge auf niedrigere Temperaturen, um ihnen die Härtespannungen sowie die Sprödigkeit der Vollhärte zu nehmen;

Vergüten = bei Baustählen das Härten mit darauffolgendem Erwärmen auf höhere Temperaturen, wobei die Zähigkeit wesentlich gesteigert wird.

Die Vergütestähle werden von den Stahlwerken vielfach schon im vergüteten Zustand geliefert. In diesem Fall hat beim Verbraucher selbstverständlich jede Warmverarbeitung (Schmieden usw.) zu unterbleiben, weil dadurch die Wirkung des Vergütens aufgehoben würde.

8. Die Legierungen des Stahles.

A. Allgemeines.

Um dem Stahl bestimmte Eigenschaften zu geben, legiert man ihn mit verschiedenen Grundstoffen.

Das wichtigste Legierungselement, der Kohlenstoff, wurde in vorhergehenden Abschnitten bereits ausführlich besprochen. An

dieser Stelle sei nur in Erinnerung gebracht, daß beim Übergang vom Alpha- in das Gamma-Gitter und vor allem beim umgekehrten Vorgang das langsamere Kohlenstoffatom eine gewisse Mindestzeit benötigt, um bei dem Stellungswechsel mitzukommen; es wird dabei auch durch die in entgegengesetzter Richtung wandernden Eisenatome behindert. Wir haben gesehen, daß dieser Umstand beim Härten derweise ausgenützt wird, daß man den Stahl aus dem Bereiche der „festen Lösung“ schroff abschreckt, so daß das Kohlenstoffatom nicht mehr rechtzeitig aus dem Gamma-Gitter herauskommt, sondern nach dem „Umklappen“ des Gitters im Alpha-Würfel eingeschlossen bleibt, wodurch ein Zwangszustand und damit die Härte eintritt (s. Abschnitt 7 Ba). Die hierfür notwendige Schnelligkeit der Temperaturabnahme haben wir die „kritische Abkühlungsgeschwindigkeit“ genannt.

Legiert man den Stahl mit weiteren geeigneten Grundstoffen (= legierte Stähle im engeren Sinne), dann hat es das Kohlenstoffatom noch schwerer, an all diesen neuen Hindernissen, nämlich den ebenfalls über das ganze Raumgitter verstreuten Legierungsatomen, vorbeizukommen — es braucht jetzt noch mehr Zeit zu dem durch das Umklappen des Gitters bedingten Stellungswechsel. Es ist daher gar nicht mehr notwendig, so ganz schroff in Wasser abzuschrecken, um das Kohlenstoffatom im Gitter einzuschließen; es genügt ein milderer Abschrecken in Öl — die „kritische Abkühlungsgeschwindigkeit“ ist kleiner geworden. Bei hochlegierten Stählen ist nicht einmal mehr Öl nötig, das Abkühlen in bloßer Luft tut es auch.

Jetzt wird uns auch verständlich, warum die sog. Wasserhärter, d. h. die reinen Kohlenstoffstähle sowie niedriglegierte Stähle, nur bis zu einer begrenzten Tiefe einhärten, während die mittel- und hochlegierten Stähle durchhärten: Durch das Abschrecken wird die Oberfläche des Stahles rasch abgekühlt, im Kern des Stückes nimmt aber die Wirkung des Abschreckens ab, d. h. im Innern erkaltet der Stahl langsamer als an der Oberfläche. Da aber, wie wir gesehen haben, legierte Stähle eine geringere Abkühlungsgeschwindigkeit benötigen, wird auch das langsamere Abkühlen im Kern eines solchen Stahles für die Härtung noch ausreichen. Dagegen wird ein Kohlenstoffstahl nicht durchhärten, weil er eine hohe Abkühlungsgeschwindigkeit verlangt, die aber nur an der Oberfläche und bis zu einer begrenzten

Tiefe gegeben ist, während die langsamere Abkühlung im Kern in diesem Fall für die Härtung nicht mehr genügt. Nur ganz dünne Teile aus Kohlenstoffstahl härten ebenfalls noch durch.

Man kann den Legierungsgehalt, wie gesagt, so weit steigern (nicht alle Elemente haben diese Wirkung), daß schon durch bloße Abkühlung an ruhiger Luft Härtung eintritt. Damit erhält man die sog. martensitischen Stähle. Bleibt die Gamma-Alpha-Umwandlung überhaupt aus, dann haben wir die austenitischen Stähle vor uns. Bei den martensitischen Stählen ist das Gitter so sehr mit den Atomen der Legierungselemente vollgepfropft, daß es zwar noch umklappt, daß aber dabei das Kohlenstoffatom unter keinen Umständen mehr aus dem Gitter heraustreten kann. Bei den austenitischen ist sogar das Umklappen selbst unmöglich geworden — der Zustand der unmagnetischen „festen Lösung“ bleibt jetzt auch bei gewöhnlicher Temperatur erhalten, d. h. die Umwandlungspunkte A_1 und A_3 im Diagramm entfallen und das Gamma-Feld dehnt sich bis zur Grundlinie des Diagramms aus (Abb. 21).

Im Gegensatz hierzu wird durch andere Grundstoffe mit steigendem Gehalt die Temperatur der Alpha-Gamma-Umwandlung erhöht, gleichzeitig aber die Gamma-Delta-Umwandlung erniedrigt, so daß wir ein verengtes und abgeschnürtes Gamma-Feld erhalten. Dieses ist dann halbkreisförmig auf die äußerste linke Seite des neuen Zustandsschaubildes beschränkt (Abb. 22). Rechts davon geht der Delta-Zustand ohne Unterbrechung in den Alpha-Zustand über. Eigentlich kann von einem Übergang gar nicht gesprochen werden, denn aus Abschnitt 4 ist uns noch in Erinnerung, daß das Delta-Eisen das gleiche raumzentrierte Gitter hat wie das Alpha-Eisen. Wir sagen daher besser, daß

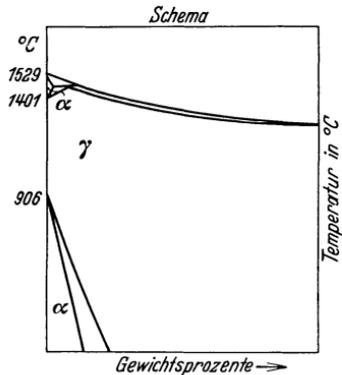


Abb. 21. Schema eines austenitischen Diagramms.

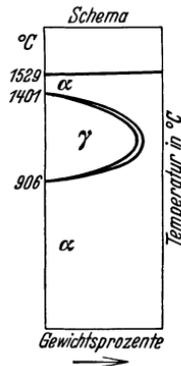


Abb. 22. Schema eines ferritischen Diagramms.

solche in der Zusammensetzung rechts vom verengten Gamma-Feld gelegene Stähle, vom Schmelzpunkt angefangen bis herab zur Raumtemperatur, unverändert das raumzentrierte Gitter beibehalten und überhaupt keine Umwandlung erfahren. Damit ist aber auch jede Möglichkeit einer Wärmebehandlung genommen. Wir nennen solche Stähle ferritisch.

Aber nicht nur die Umwandlungspunkte werden durch Legierungszusatz gehoben oder gesenkt, es treten auch waagerechte Verschiebungen im Zustandsschaubild auf. So wird vor allem der Punkt *S*, der Standort des reinen Perlitgefüges, unter Umständen ganz wesentlich nach links zu geringeren Kohlenstoffgehalten gerückt. Während das Perlitgefüge des Kohlenstoffstahles erst bei 0,90% Kohlenstoff vollständig durchgebildet (gesättigt) ist, hat z. B. der rostbeständige Chromstahl mit 13% Chrom und nur 0,40% Kohlenstoff bereits übereutektoides Gefüge mit dem bekannten Karbidschalenwerk. Das ist damit zu erklären, daß die Karbidplatten, von denen der Perlitkristall durchsetzt ist, bei Anwesenheit anderer Grundstoffe dünner sind als bei reinem Kohlenstoffstahl.

Auch der Punkt *E* im Diagramm wird durch Legierungszusatz nach links verschoben, so daß *Ledeburist*stähle (s. Abschnitt 6) schon bei geringeren Kohlenstoffgehalten möglich werden.

B. Einteilung der Grundstoffe nach ihren Wirkungen.

So verschieden sich die Legierungselemente in ihren Wirkungen auf die Eigenschaften der Stähle verhalten, so lassen sie sich doch nach bestimmten Gesichtspunkten in einige wenige Klassen aufteilen. Für unsere Zwecke genügt die Zweiteilung in Grundstoffe, die das Gamma-Gebiet in der schon beschriebenen Weise erweitern, und solche, die es verengen. Die folgende Gegenüberstellung gibt das zusammenfassend nochmals wieder:

a) Grundstoffe, die das Gamma-Gebiet erweitern. Abb. 21 zeigt schematisch den Einfluß der Elemente dieser Gruppe. An der Senkrechten links, der Ordinate des reinen Eisens, erscheinen die uns vom Eisen-Kohlenstoff-Diagramm her bekannten Haltepunkte: 1529° (Schmelzpunkt), 1401° (A_4), 900° (A_3). Je mehr der Legierungsgehalt nach rechts zunimmt, desto mehr senkt sich die Linie A_3 (Gamma-Alpha-Umwandlung); schon sehr bald reicht

das Gamma-Feld herab bis zur Grundlinie (Raumtemperatur), d. h. wir haben die austenitischen Stähle vor uns.

Die wichtigsten Grundstoffe dieser Gruppe sind Mangan, Nickel, Kobalt.

b) Grundstoffe, die das Gamma-Gebiet verengen. In diese Gruppe gehören vor allem die Elemente Aluminium, Silizium, Phosphor, Titan, Vanadin, Chrom, Molybdän, Tantal, Wolfram.

Aus dem Schema in Abb. 22 ist ihre Wirkung zu ersehen. An der Ordinate des reinen Eisens treten wieder die Haltepunkte 1529° , 1401° , 900° in Erscheinung. Je mehr aber jetzt nach rechts der Legierungsgehalt steigt, desto mehr nähern sich die beiden Umwandlungslinien A_3 und A_4 und vereinigen sich schließlich, so daß das Gamma-Feld halbkreisförmig abgeschlossen wird. Die höher legierten Stähle rechts vom Gamma-Feld sind ferritisch. Sie unterliegen vom Schmelzpunkt bis herab zur Lufttemperatur keiner Umwandlung.

C. Einteilung der Stähle nach ihrem Gefüge.

Nach dem Gefüge können wir die Stähle einteilen in perlitische, martensitische, austenitische, ferritische und ledeburitische.

Zu den perlitischen Stählen sind die Kohlenstoffstähle und die niedriglegierten Stähle zu rechnen. Perlitisch im eigentlichen Sinne sind nur jene Stähle, die mit Perlitkristallen gerade gesättigt sind, so daß neben den Perlitkristallen weder ein Karbidschalenwerk noch reine Eisenkristalle (Ferritkristalle) vorhanden sind. Als Beispiel kennen wir den reinen Kohlenstoffstahl mit 0,90% Kohlenstoff. Treten neben den Perlitkristallen auch reine Eisenkristalle auf, dann spricht man von unterperlitischen, untereutektoiden oder auch ferritisch-perlitischen Stählen. Ist der Kohlenstoffgehalt höher, so daß das Karbidschalenwerk erscheint, dann haben wir die überperlitischen oder übereutektoiden Stähle vor uns. Es liegen also die gleichen Verhältnisse vor, die wir schon beim Eisen-Kohlenstoff-Diagramm besprochen haben, nur daß durch Legierungszusatz die Grenzen verschoben werden.

Die martensitischen Stähle weisen ohne Wärmebehandlung bei Lufttemperatur das Härtegefüge auf. Sie sind hart und spröde und lassen sich schwer bearbeiten. Sie haben daher auch kaum eine Verwendung gefunden.

Die austenitischen Stähle haben bei Raumtemperatur das einheitliche Gefüge der festen Lösung, das keinerlei Ausscheidungen aufweist. Sie besitzen nur niedrige Streckgrenze, Festigkeit und Härte, dafür aber hohe Dehnung, Zähigkeit und Einschnürung. Sie sind schwer bearbeitbar. Ferner sind sie unmagnetisch.

Je nach der Art ihrer Legierung werden die austenitischen Stähle verwendet:

- a) als Verschleißstähle (Mangan-Hartstahl),
- b) als antimagnetische Apparateile (z. B. Kompaßgehäuse),
- c) als rost- und säurebeständige Sonderstähle.

Darüber wird später noch gesprochen werden.

Die austenitischen Stähle lassen sich nicht härten, da ja die Gamma-Alpha-Umwandlung fehlt. Aus diesem Grunde hat auch ein Glühen keinen Zweck. Man schreckt sie aber ab, wodurch das Austenitgefüge schön ausgebildet wird.

Werden die austenitischen Stähle kalt verformt, dann fällt mehr oder weniger Martensit aus, womit eine gewisse Härteannahme und Magnetisierbarkeit verbunden ist.

Die ferritischen Stähle. Aus Abb. 22 haben wir ersehen, daß einige Stähle, bei denen ein gewisser Gehalt an bestimmten Legierungselementen überschritten wird, vom Schmelzpunkt bis zur Raumtemperatur herab keinerlei Umwandlung erleiden, d. h. sie behalten über diesen ganzen Temperaturbereich das raumzentrierte Gitter bei. Wir nennen sie ferritische Stähle. Sie lassen sich weder härten, noch kann man sie durch Glühen beeinflussen. Sind ferritische Stähle durch längeres Halten auf hohen Temperaturen grobkörnig geworden, dann können sie also nur mehr durch Warmverformung (Schmieden usw.) auf feines Korn gebracht werden. Dabei werden die Kristalle, wie aus Abschnitt 7 Bc her bekannt ist, zertrümmert, und die Trümmer wachsen bei der hohen Schmiedetemperatur sofort wieder zu ganzen Kristallen normaler Größe aus. Diese einzige mögliche Art der Kornverfeinerung bei den ferritischen Stählen kann aber nur selten angewandt werden; für fertige Teile kommt sie natürlich nicht in Frage.

Zur Kornvergrößerung neigen vor allem die ferritischen Chromstähle.

Steigt der Kohlenstoffgehalt über den Punkt *E* im Diagramm nach rechts weiter an, dann erscheinen als neuer Gefügebestand-

teil grobe Karbidkörner, die in die Grundmasse eingebettet sind und dem Stahl eine ganz besondere Härte verleihen. Solche Stähle nennen wir Ledeburitstähle. Je mehr der Kohlenstoffgehalt zunimmt, um so größer wird die Menge der Karbidkörner und um so widerstandsfester wird der Stahl gegen Abnutzung. Ledeburitstähle werden verwendet für Zieheisen, für Schnitt- und Pressenteile, als Riffel- und Schnellarbeitsstähle, kurz für Werkzeuge, bei denen es auf besonders hohe Härte ankommt.

Die Ledeburitstähle lassen sich schwer schmieden.

9. Kohlenstoffstähle.

Die praktisch in Verwendung stehenden Kohlenstoffstähle haben Kohlenstoffgehalte von etwa 0,10 bis 1,50%. Unter 0,50% C gebraucht man sie als Baustähle, darüber als Werkzeugstähle.

a) **Werkzeugstähle.** Diese werden in 4 bis 6 Härteabstufungen hergestellt. Üblich und durchaus auskömmlich sind die vier Härtegrade:

„weich“	C = etwa 0,65%,
„zäh“	C = „ 0,85 bis 90%,
„zähhart“ und „mittelhart“	C = „ 0,9 bis 1,20%,
„hart“	C = „ 1,40 bis 1,50%.

Manche Edelstahlwerke teilen den gleichen Bereich in sechs Stufen ein, so daß die Reihe etwa mit „sehr weich“ beginnt und etwa mit „hochhart“ beschlossen wird.

Während der Kohlenstoffgehalt nur auf die Härte des Stahles Einfluß hat, ist für die Güte der Reinheitsgrad ausschlaggebend. Als Verunreinigungen, die teils durch den Herstellungsprozeß bedingt, teils aber schon in den Rohstoffen enthalten sind, kommen in Frage: Silizium, Mangan, Schwefel, Phosphor (Si, Mn, S, P). Die Edelstahlwerke liefern daher in den obengenannten Härtegraden meistens drei (manchmal sogar vier) Güteklassen von Kohlenstoffstählen: eine gute Primaqualität, eine besonders reine Extraqualität und eine entsprechend geminderte dritte (bzw. vierte) Qualität. Die beiden ersten Sorten werden meistens im Elektroofen erschmolzen, die dritte (und vierte) im Siemens-Martin-Ofen. Die in der Thomasbirne erzeugten Stähle kommen als hochwertige Werkzeugstähle nicht in Betracht.

Zahlentafel 1.

Flußstahl geschmiedet oder gewalzt unlegiert
Einsatz- und Vergütungsstahl nach DIN 1661

(2. Ausgabe Juni 1929.)

Bezeichnung für ausgeglühten Vergütungsstahl mit 0,35% mittlerem Kohlenstoffgehalt:

Vergütungsstahl St C 35.61 DIN 1661 ausgeglüht

Einheitsgewicht für die Gewichtsberechnung 7,85 kg/dm³.

Der Werkstoff wird geschmiedet oder vorgewalzt zum Schmieden oder fertiggewalzt (fertiggewalzt im allgemeinen unter 50 mm Dicke), gegebenenfalls mit nachfolgender spanabhebender Bearbeitung, verwendet.

Gewalzt wird dieser Werkstoff nur mit Rund-, Vierkant-, Sechskant- und Flachquerschnitt geliefert bis herunter zu 8 mm Dicke, fertiggewalzt mit den Maßtoleranzen, Prüfungs- und Abnahmevorschriften nach DIN 1612, vorgewalzt mit Toleranzen, die von Fall zu Fall zu vereinbaren sind.

Einsatzstahl.

Reinheitsgrad: Schwefel- und Phosphorgehalt nicht mehr als je 0,04%, zusammen jedoch nicht mehr als 0,07%.

Die mechanischen Eigenschaften gelten für den ausgeglühten (normalgeglühten) Zustand.

Markenbezeichnung	Zugversuch nach DIN 1605				Kohlenstoffgehalt C %	Mangangehalt Mn höchstens %	Siliziumgehalt Si höchstens %
	Zugfestigkeit σ_B im Mittel kg/mm ²	Bruchdehnung mindestens 1 %		Streckgrenze σ_s mindestens kg/mm ²			
		am kurzen Normalstab oder Proportionalstab δ_5	am langen Normalstab oder langen Proportionalstab δ_{10}				
St C 10.61	38	30	25	21	0,06 bis 0,13	0,5	0,35
St C 16.61	42	28	23	23	0,11 bis 0,18	0,4	0,35

Nach dem Einsetzen hat der Werkstoff höhere Festigkeit, auch im Kern.

Vergütungsstahl.

Reinheitsgrad: Schwefel- und Phosphorgehalt nicht mehr als je 0,04%, zusammen jedoch nicht mehr als 0,07%.

Marken- bezeichnung	Zustand	Zugversuch nach DIN 1605						Kohlen- stoff- gehalt C ≈ %	Mangan- gehalt Mn höchstens %	Silizium- gehalt Si höchstens %
		Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²		Bruchdehnung mindestens 1 %		Streckgrenze σ_B mindestens kg/mm ²				
		am kurzen Normalstab oder kurzen Proportionalstab δ_5	am langen Normalstab oder langen Proportionalstab δ_{10}	am kurzen Normalstab oder kurzen Proportionalstab δ_5	am langen Normalstab oder langen Proportionalstab δ_{10}	mindestens kg/mm ²	mindestens kg/mm ²			
St C 25.16	ausgeglüht	42 bis 50	27	22	24	0,25	0,8	0,35		
	vergütet	47 bis 55	24	20	28					
St C 35.61	ausgeglüht	50 bis 60	23	19	28	0,35	0,8	0,35		
	vergütet	55 bis 65	22	18	33					
St C 45.61	ausgeglüht	60 bis 70	19	16	34	0,45	0,8	0,35		
	vergütet	65 bis 75	18	15	39					
St C 60.61	ausgeglüht	70 bis 85	15	13	40	0,60	0,8	0,35		
	vergütet	75 bis 90	14	12	45					

Die unter „vergütet“ aufgeführten Werte der mechanischen Eigenschaften liefern einen Maßstab für die Vergütungsfähigkeit des Stahles. Sie werden durch Abschrecken aus 30° bis 50° C oberhalb des oberen Umwandlungspunktes mit darauffolgendem Anlassen bis auf etwa 600° C erreicht. Indessen wird gewöhnlich weniger hoch angelassen, und die erreichbaren Zahlenwerte sind andere, besonders liegen die Werte der Streckgrenze und Zugfestigkeit höher.

Da sich nur Stücke bis etwa 40 mm Dicke bis in den Kern durchhärten und dementsprechend auch nur solche gleichmäßig vergüten lassen, so ist bei dickeren Stücken die Probeentnahmestelle mit der Vergüterei zu vereinbaren.

¹ Bei dem im Auslande zum Teil üblichen kleineren Maßlängenverhältnis werden die Dehnungswerte entsprechend höher.

Durch Puddeln oder Paketieren hergestellter Werkstoff ist in vorstehenden Aufstellungen nicht enthalten.

Durch Pressen, Ziehen, Schlagen u. dgl. kalt gereckter Werkstoff fällt nicht unter diese Normen.

Unter „Ausglühen“ (Normalglühen) ist hier ein gleichmäßiges Erhitzen auf eine Temperatur kurz oberhalb des oberen Umwandlungspunktes mit folgendem Erkaltenlassen in ruhiger Luft zu verstehen.

Die mechanischen Eigenschaften gelten in der Faserichtung.

Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften erfolgt nach DIN 1602 usw.

Über die Ausführung der chemischen Prüfung sind besondere Vereinbarungen zwischen Besteller und Lieferer zu treffen. Es wird empfohlen, in strittigen Fällen sich an die vom Chemikerausschuß des Vereins deutscher Eisenhüttenleute ausgearbeiteten Analyseverfahren zu halten.

Die Prüfung der Werte der mechanischen Eigenschaften im vergüteten Zustand erfolgt an einem Zerreißstab, der aus dem bereits vergüteten Stück kalt herauszunehmen ist.

Für die Anwendung der Normen siehe auch Erläuterungsblatt DIN 1606.

Der Verwendungszweck ist in Sonderfällen anzugeben.

Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Verlag GmbH., Berlin SW 19, erhältlich ist.

Als Anhalt für die Verwendung der im Elektroofen erzeugten Werkzeugstähle diene die nachfolgende Übersicht, die natürlich nicht Anspruch auf Vollständigkeit machen kann:

Härtegrad „hart“ für Werkzeuge hoher Härte und Schnitt-haltigkeit: Rasiermesser, Dreh-, Hobel- und Stoßmesser (bei geringer Schnittgeschwindigkeit und Werkzeugkühlung), Fräser, Mühlpicken, Ziehmatrizen usw.

Härtegrad „mittelhart“ für Werkzeuge mit höherer Härte und Zähigkeit: Fräser, Gewindebohrer, Stempel, Matrizen, Schnitte und Stanzen, Zirkularmesser, Scherenmesser, Markierstempel, Abkratwerkzeuge usw.

Härtegrad „zäh“ für Werkzeuge mit guter Härte und besonderer Zähigkeit: Meißel, Lochstempel, Dorne und Einsätze, zähe Gewindebohrer, Steinbohrer usw.

Härtegrad „weich“ für Werkzeuge mit genügender Härte und außerordentlicher Zähigkeit: Gesenke, Schrotmeißel, Hämmer, Hammerkerne usw.

b) Die Baustähle werden verwendet: als Vergütungsstähle mit etwa 0,30 bis 0,50% C, als Einsatzstähle mit etwa 0,10 bis 0,20% C.

Für die billigeren Siemens-Martinstähle hat der Normenaus-schuß eine allgemeingültige Normung durchgeführt, die aus Zahlentafel 1 ersichtlich ist.

10. Manganstähle.

Mangan (Mn) findet sich in jedem Stahl. Es ist ein vorzüg-liches Desoxydationsmittel und bei der Stahlerzeugung unent-behrlich. Die Grenze, unterhalb welcher man einen Stahl noch nicht als manganlegiert ansprechen kann, ist mit etwa 0,8% Mn anzunehmen. (Bei den unlegierten Elektrostählen wird der Man-gangehalt 0,45% nicht übersteigen.)

Mangan erweitert das Gamma-Feld und macht den Stahl bei höheren Gehalten austenitisch.

Mangan bewirkt eine Vergrößerung des Kornes. Manganstähle sind empfindlich in der Wärmebehandlung, vor allem beim Schmieden und Härten.

Durch Mangan wird die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit wesentlich verringert, weshalb schon verhältnismäßig niedrig-legierte Manganstähle durchhärten.

Die Manganstähle werden eingeteilt in perlitische, martensitische und austenitische. Abb. 23 bringt die Einteilung nach Guillet, die aber nur einen grundsätzlichen und ungefähren Wert hat. Mit den tatsächlichen Verhältnissen deckt sie sich nicht ganz. Auch gilt die Einteilung nur für Luftabkühlung — durch Abschrecken werden Stähle austenitisch, die nach Guillet martensitisch sind.

Für eine Verwendung eignen sich nur die perlitischen und die austenitischen Manganstähle. Die martensitische Gruppe scheidet wegen der schwierigen Bearbeitbarkeit aus. Die Legierungsgehalte der gebräuchlichen Stähle sind:

a) Perlitische Stähle: C = etwa 0,25 bis 1,0%, Mn = etwa 0,80 bis 2,0%.

b) Austenitische Stähle: C = etwa 0,90 bis 1,3%, Mn = etwa 10 bis 14%.

Die perlitischen Stähle werden wegen ihrer guten Vergütbarkeit vor allem als Baustähle und Federstähle verwendet, aber auch als Werkzeugstähle für Warmgesenke, Schmiedewerkzeuge

u. dgl. und bei höherem Kohlenstoffgehalt (bis etwa 1%) für Schnitte, Schneideisen, Gewindebohrer usw.

Der austenitische Manganstahl mit 12 bis 14% Mangan ist ein vorzüglicher Verschleißstahl. Seinen Namen „Mangan-Hartstahl“ führt er jedoch zu Unrecht, denn er ist weder besonders hart, noch läßt er sich härten. Im Gegenteil wird er durch Abschrecken sogar weicher und zäher. Im rohen Zustande besitzt er nämlich teilweise martensitisches oder troostitisches Gefüge, durch das Abschrecken aus 1000° erhält er aber reines und dauerhaftes austenitisches Gefüge. Nach dieser einfachen Wärmebehandlung hat der hochprozentige Manganstahl eine Festigkeit von etwa 100 kg/mm² und eine Dehnung von über 40%, dagegen eine ganz unverhältnismäßig niedrige Streckgrenze. Auch die Brinellhärte ist im Verhältnis zur Zerreißfestigkeit als sehr niedrig anzu-

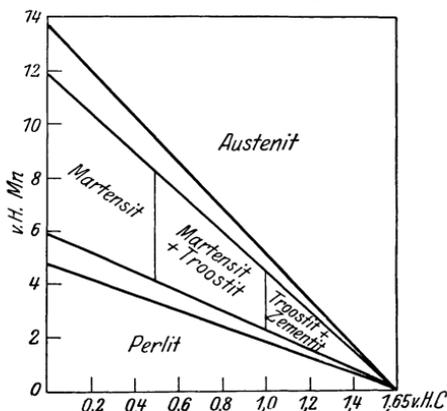


Abb. 23. Einteilung der Manganstähle.
Nach Guillet.

sprechen. Während sie bei den perlitisch-martensitischen Stählen ungefähr dreimal so hoch ist wie die Zerreiβfestigkeit, ist bei den austenitischen Stählen und insbesondere beim Mangan-Hartstahl das Verhältniß ganz anders und eine Umrechnungsmöglichkeit nicht mehr gegeben. Daher ist in diesem Falle auch die Prüfung mit der Brinellpresse nicht geeignet.

Erwärmt man abgeschreckten und dadurch rein austenitisch gewordenen Mangan-Hartstahl auf 500 bis 600°, dann tritt teilweise wieder Martensit auf — der Stahl wird härter und auch magnetisch.

In noch weit größerem Ausmaße verfestigt sich Mangan-Hartstahl bei Kaltbearbeitung; die außerordentliche Verfestigungsfähigkeit dieses Stahles ist geradezu als die Ursache seines hohen Verschleißwiderstandes anzusprechen. Wir kennen die Kalthärtung schon vom Abschnitt 7 B c her. Sie tritt auf, wenn Stahl — im besonderen Mangan-Hartstahl — in kaltem Zustande gezogen, gehämmert oder einer ähnlichen Bearbeitung unterworfen wird, und zwar nur an der Oberfläche der kalt bearbeiteten Stelle. So wird, um nur ein Beispiel herauszugreifen, bei einem Schläger aus Mangan-Hartstahl, wie solche in den bekannten Schlägermühlen zum Zerkleinern von Gestein und dgl. verwendet werden, nur die sog. Schlagbahn durch den Gebrauch verfestigt, mit welcher die eigentliche Schlagarbeit geleistet wird, während der ganze übrige Schläger zäh und damit bruchsicher bleibt. Gerade die Schlagbahn ist es aber, wo der Verschleiß auftritt. Der Schläger schafft sich also bei der Arbeit selbst, und zwar gerade an der richtigen Stelle, die notwendige große Verschleißhärte. Natürlich wird durch die weitere Arbeit auch die so verfestigte Schlagbahn angegriffen und, wenn auch langsamer, abgenützt. Im gleichen Maße aber, in dem der Verschleiß fortschreitet, geht auch die Oberflächenverfestigung mit. Nach Vorgesagtem wird Mangan-Hartstahl nur dann als Verschleißstahl restlos entsprechen, wenn die Vorbedingungen für Kalthärtung gegeben sind. Bei rein schmirgelnder Beanspruchung — etwa als Werkstoff für die Düsen von Sandstrahlgebläsen — ist Mangan-Hartstahl ungeeignet. Dagegen bewährt er sich für Baggerbolzen, Baggerbüchsen, Brechbacken, Schwalbungen (Brikkettformpressen), Schienen, Kreuzungen, Weichen u. dgl. ausgezeichnet.

Ein Stahl, der gegen Abnutzung widerstandsfest ist, wird selbstverständlich auch jeder Bearbeitung großen Widerstand entgegenzusetzen. Mangan-Hartstahl läßt sich nur durch Schleifen oder mittels Karbidschneidmetallen bearbeiten. Bleche können mit Herzbohrern aus gutem Schnellstahl noch gebohrt werden.

11. Nickelstähle.

Das Legierungselement Nickel (Ni) setzt die Umwandlungspunkte A_1 und A_3 wesentlich herab und erweitert somit das Gamma-Feld im Diagramm. Da Nickel keine Karbide bildet, erstreckt sich sein Einfluß nur auf die Grundmasse des Stahles.

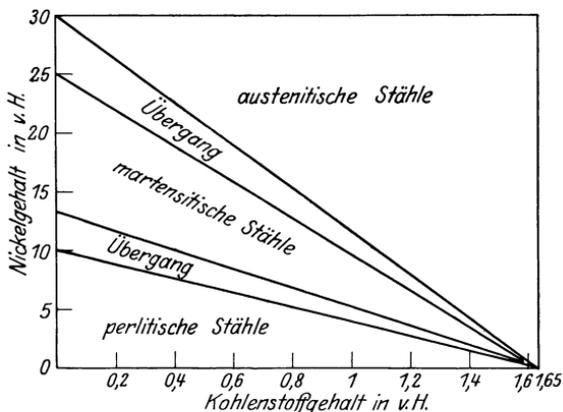


Abb. 24. Einteilung der Nickelstähle. Nach Guillet.

Auf das Korn übt Nickel eine verfeinernde Wirkung aus, womit eine größere Zähigkeit bei gleicher Festigkeit verbunden ist. Die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit wird durch Nickel stark erniedrigt. Nickelstähle härten daher tiefer ein oder überhaupt durch und sind aus diesem Grunde gute Vergütungsstähle.

Ebenso wie die Manganstähle teilt man auch die Nickelstähle nach ihrem Kohlenstoffgehalt in perlitische, martensitische und austenitische ein (s. Abb. 24).

Die perlitischen Stähle werden vor allem als Baustähle verwendet, und zwar mit Nickelgehalten von etwa 1,5, 3 und 5%. Mit Kohlenstoffgehalten unter 0,10% werden sie im Einsatz gehärtet, für die Vergütbarkeit sind mindestens 0,25 bis 0,45% Kohlenstoff erforderlich.

Die Nickeleinsatzstähle nimmt man für Zahnräder, Achs-schenkel, Bolzen usw., also für Teile, die eine harte Oberfläche und gleichzeitig einen sehr zähen Kern haben müssen.

Die Vergütungsstähle kommen in Betracht für alle Arten von Wellen und Achsen im Automobil- und Maschinenbau, für Pleuelstangen, Ventile usw.

Als Werkzeugstähle dürften reine Nickelstähle kaum Anwendung finden.

Die austenitischen Nickelstähle sind Sondergebieten vorbehalten. Einer Wärmebehandlung werden sie nicht unterzogen. Der 25proz. Nickelstahl dient als unmagnetischer Baustoff, z. B. für Gehäuse von Kompassen, für Kappenringe usw. Der 36proz. Nickelstahl, auch Invarstahl (invariabilis = unveränderlich) benannt, zeichnet sich durch geringste Längenausdehnung bei Temperaturveränderungen unter 100° aus. Er eignet sich daher besonders für Meßbänder, Normalmaße, Uhrenpendel u. ä.

Noch höher-prozentige Nickelstähle haben auch als Widerstandsdrähte größere Bedeutung gefunden.

Wegen der ähnlichen Wirkung von Nickel und Mangan hat man Nickelstählen auch Mangan zugesetzt und dadurch manche Prozente des teuren Nickels gespart.

12. Chromstähle.

Das Chrom (Cr) gehört zur Gruppe jener Grundstoffe, die das Gamma-Gebiet verengen und abschnüren. Abb. 25 stellt das Eisen-Chrom-Diagramm dar, das dem Schema in Abb. 22 sehr ähnelt. Wie man sieht, erstreckt sich das Gamma-Gebiet nur bis zu einem Chromgehalt von etwa 13%. Bei dieser Konzentration vereinigen sich die Umwandlungslinien A_4 und A_3 und schließen das Gamma-Feld nach rechts ab. Darüber hinaus, d. h. bei Chromgehalten über 13%, gibt es keine Umwandlung mehr und vom Schmelzpunkt bis zur Lufttemperatur herab erscheint nur der Ferritkristall.

Bei den Chromstählen finden wir folgende Gruppen:

- a) perlitisch-martensitische Gruppe,
- b) ferritische Gruppe (ohne Umwandlung),
- c) halbferritische Gruppe, bei welcher das Gefüge nur teilweise eine Umwandlung erfährt.

Die erstgenannte perlitisch-martensitische Gruppe läßt sich nach dem Kohlenstoffgehalt unterteilen in:

- a) untereutektoide (unterperlitische) Stähle,
- b) übereutektoide (überperlitische) Stähle und
- c) ledeburitische Stähle.

Abb. 26 zeigt die Lage der drei Gruppen in Hinsicht auf die Zusammensetzung. Die linke der beiden schief ansteigenden Grenzlinien gibt den Ort des Punktes *S* für die verschiedenen Chromgehalte an. Wir sehen, daß dieser Perlitpunkt mit steigendem Chromgehalt stark nach links gerückt wird. Danach ist ein Stahl mit 0,20% Kohlenstoff und 12% Chrom schon überperlitisch. Auch der Punkt *E* wird mit steigendem Chromgehalt wesentlich nach links zu niedrigeren Kohlenstoffgehalten abgerückt, wie die rechte der beiden Grenzlinien zeigt, so daß ein Stahl mit 12% Chrom schon bei einem Kohlenstoffgehalt von nur 0,80% ledeburitisch ist.

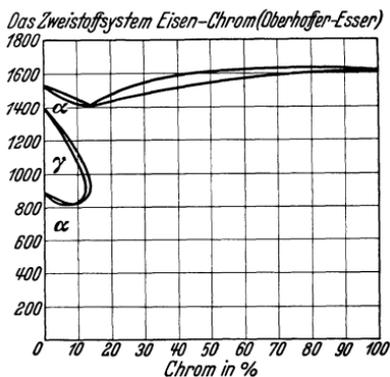


Abb. 25. Eisen-Chrom-Diagramm.

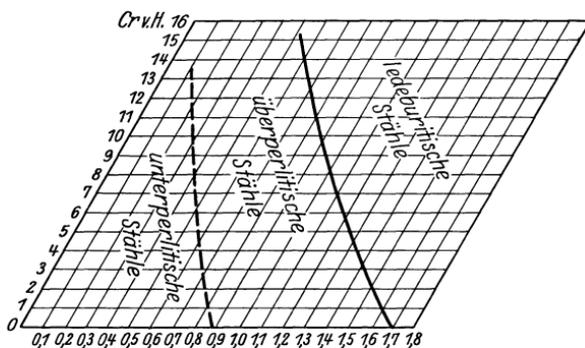


Abb. 26. Einteilung der Chromstähle nach der Löslichkeitslinie des Kohlenstoffs.

Chrom wirkt stark karbidbildend. Daher wird durch Chrom die Festigkeit und Härte sowie die Streckgrenze bedeutend erhöht, womit natürlich auch hohe Verschleißfestigkeit und Schneidkraft verbunden ist.

Chrom gibt dem Stahl feineres Korn, erniedrigt die „kritische Abkühlungsgeschwindigkeit“ und wirkt daher „durchhärtend“.

Zusammensetzung		Verwendungszweck
C %	Cr %	
0,1 —0,2	0,4— 0,8	Einsatzstähle
0,1 —0,2	0,8— 2,0	„
0,2 —0,4	1,5	Federn
0,3 —0,5	1,0— 2,0	Preßluft-Arbeitswerkzeuge
0,2 —0,4	0,7— 1,5	Vergütungsstähle
0,8 —1,1	0,5— 2,0	Kaltwalzen, Sägeblätter, Hammerkerne, Kaltschlagwerkzeuge
0,6 —0,8	0,5— 0,8	Gesenkstahl
0,9 —1,1	0,3— 0,5	Kaltschlagwerkzeuge mit stärkerer Ein- härtung
0,85—1,0	1,0— 1,3	Kugeln
1,0 —1,1	1,3— 1,8	Kugellager, Exzenter, Daumen, Nocken, Schnitte, Walzen
1,0 —1,2	1,0— 3,0	Dauermagnete
1,2 —1,5	1,5— 2,0	Meßwerkzeuge, Gewindebohrer, Rössel, Fräserfeilen
1,8 —2,5	2,0— 2,5	Zieheisen, Preßformteile für Warmwerk- betriebe
1,2 —1,5	0,2— 0,7	Rasiermesser und Rasierklingen, Ziehringe, Dreh- und Hobelmesser
0,1 —0,2	5,0—12,0	Hochdruckgefäße für die chemische Indu- strie
0,1 —0,2 bis 0,12	0,2—0,5 V	Vergütungsfähiger rostbeständiger Stahl
	13,0—16,0	
0,3 —0,7	16,0—20,0	Nicht vergütungsfähiges rostbeständ. Eisen
	13,0—17,0	Gut härtbarer rostbeständiger Stahl
1,5 —2,5	9,0—14,0	Schnitte, Zieheisen, Prägestempel, Kaliber- ringe, Gewindewalzbacken, Hammersättel, Gewindebohrer
	16,0—20,0	Warmwalzstopfen, Formzeuge für Brikett- pressen
0,1 —0,4	12,0—30,0	Zunderbeständige Legierungen
1,0 —2,0	25,0—30,0	Korrosionsbeständige Gußlegierungen
	2,5—1,0 Si	
3—5	30—35	Legierung für Auftragschweißung
	5—8 Mn	

Reine Chromstähle werden bei uns weniger als Baustähle verwendet, dagegen weitgehend als Werkzeugstähle wegen ihrer guten Härbarkeit. Dabei geht man mit dem Chromgehalt bis 13% und unter Umständen noch darüber.

Stähle mit mindestens 13% Chrom und nicht über 0,60% Kohlenstoff sind rostbeständig. Darüber wird in Abschnitt 25 noch gesprochen.

Besondere Bedeutung hat der sehr verschleißfeste ledeburitische Stahl mit 13% Chrom und etwa 2,2% Kohlenstoff als Sonderstahl für Schnitte mit höheren Leistungen gewonnen. Er zeichnet sich zudem durch geringen Verzug beim Härten aus.

Chrom verbessert die magnetischen Eigenschaften, weshalb Chromstähle (mit Chrom bis 3%) gute Eignung für Dauermagnete besitzen.

Höher gekohlte Chromstähle werden bis zu einem Gehalt von 1% Chrom in Wasser und darüber in Öl gehärtet, soweit sie nicht Lufthärter sind.

Stähle mit höherem Chromgehalt müssen vor dem Abschrecken längere Zeit auf Härtetemperatur gehalten werden, damit alle Chromkarbide in Lösung gehen.

Hochprozentige Chromstähle sind schwierig zu schmieden und zu walzen und müssen mit Sorgfalt erhitzt werden.

Die nebenstehende Übersicht über die Chromstähle hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Verwendung wurde dem vorzüglichen Buch von Dr.-Ing. Franz Rapatz: Die Edelmetalle. 2. Aufl. (Berlin: Julius Springer 1934) entnommen.

Die Chromstähle müssen stets gut weich geglüht werden, damit sie noch wirtschaftlich gedreht, gehobelt oder einer ähnlichen Kaltbearbeitung unterzogen werden können.

13. Chrom-Nickelstähle.

Es ist uns bereits bekannt, daß Nickel den Stahl zäh macht und seine Durchhärtung steigert, während Chrom außerdem stark karbidbildend wirkt und damit dem Stahl sehr hohe Härte gibt. Es ist daher ohne weiteres verständlich, daß ein Chrom-Nickelstahl noch verbesserte Eigenschaften besitzt gegenüber einem Stahl, der nur mit einem der beiden Grundstoffe Chrom und Nickel legiert ist.

Nach dem Gefüge unterscheidet man bei den Chrom-Nickelstählen folgende vier Hauptgruppen:

1. die ferritisch-perlitische,
2. die martensitische (und troosto-sorbitische),
3. die austenitisch-martensitische und
4. die austenitische Gruppe.

Zahlentafel 2.

Nickel- und Chromnickelstahl nach DIN 1662
für mechanisch hoch beanspruchte Teile
(2. Ausgabe Juni 1930.)

In der Markenbezeichnung bedeutet:

E = Einsatzstahl
C = Chrom
w = weich

V = Vergütungsstahl
N = Nickel
h = hart

Reinheitsgrad: Phosphor und Schwefel nicht mehr als je 0,035%, zusammen nicht mehr als 0,06%¹.

Markenbezeichnung	geglüht		gehärtet bzw. vergütet			Chemische Zusammensetzung in Proz.					
	Brinellhärte H	Zugfestigkeit kg/mm ² höchstens	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Streckgrenze σ_s in Proz. der Zugfestigkeit mindestens	Bruchdehnung ³ in Proz.		Kohlenstoff C	Nickel Ni	Chrom Cr	Mangan Mn	Silizium Si höchstens
					d_5	d_{10}					

Einsatzstähle.

EN 15	162	55	60 bis 80 Wasser	65	20 bis 10	15 bis 8	0,10 bis 0,17	1,5 ± 0,25	höchstens 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 25	206	70	80 bis 100 Öl 90 bis 110 Wasser	70 Öl 75 Wasser	20 bis 14 Öl 16 bis 10 Wasser	14 bis 10 Öl 12 bis 7 Wasser	0,10 bis 0,17	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 35	220	75	90 bis 120 Öl	75	16 bis 9	12 bis 6	0,10 bis 0,17	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 45	240	83	120 bis 140 Öl	75	14 bis 7	10 bis 5	0,10 bis 0,17	4,5 ± 0,25	1,1 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35

Vergütungsstähle.

VCN 15 w	206	70	65	24 bis 18	16 bis 13	0,25 bis 0,32	1,5 ± 0,25	0,5 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 15 h	206	70	70	22 bis 16	15 bis 12	über 0,32 bis 0,40	1,5 ± 0,25	0,5 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 25 w	220	75	70	20 bis 14	14 bis 10	0,25 bis 0,32	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 25 h	220	75	70	16 bis 10	12 bis 8	über 0,32 bis 0,40	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 35 w	235	80	75	20 bis 14	14 bis 10	0,20 bis 0,27	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 35 h	235	80	75	16 bis 10	12 bis 8	über 0,27 bis 0,35	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35
VCN 45	265	90	80	15 bis 6	10 bis 6	0,30 bis 0,40	4,5 ± 0,25	1,3 ± 0,2	0,4 bis 0,8	0,35

¹ Bei saurem Stahl sind je nach Vereinbarung höhere Gehalte an Phosphor und Schwefel zulässig.

² Berechnet aus der Brinellhärte $H \cdot 0,34$; maßgebend ist der Zugversuch.

³ Die angegebenen Dehnungswerte sind Mindestwerte, wobei der niedrigste Dehnungswert dem höchsten Zugfestigkeitswert entspricht. Zwischenwerte werden durch Interpolation ermittelt.

⁴ Der Stahl VCN 45 kann durch Lutthärtung auf eine Festigkeit von etwa 160 kg/mm² gebracht werden.

Als Sonderstahl für ausbohrbare im Einsatz gehärtete Spindeln kommt ein Stahl mit folgenden Richtwerten in Frage:

$$C = 0,10 \text{ bis } 0,17 \%$$

$$Ni = 3,5 \pm 0,25 \%$$

$$Cr = \text{höchstens } 0,1 \%$$

Bei geringen Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung sind die mechanischen Eigenschaften für die Abnahme maßgebend.

Die aufgeführten mechanischen Eigenschaften gelten für die Prüfung eines mitteldicken Rundstabes (60 mm Durchmesser) in der Faserrichtung.

Die Prüfung erfolgt nach DIN 1602 bis 1605. Die Probeentnahme erfolgt nach Vereinbarung (tunlichst aus der Randzone).

Richtlinien für Verwendung und Behandlung der einzelnen Stähle siehe DIN 1662 Beiblätter . . .

Arbeitsgemeinschaft der Eisen verarbeitenden Industrie
Fachnormenausschuß der Kraftfahrtindustrie Fachnormenausschuß für Luftfahrt
Verein deutscher Werkzeugmaschinenfabriken Edelmetall-Verband

Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Verlag GmbH., Berlin SW 19, erhältlich ist.

Abb. 27 gibt eine Übersicht über diese Gruppen nach ihren Legierungsgehalten.

Neben der vierten Gruppe, in welche die in einem besonderen Abschnitt zu besprechenden rost-, säure- und hitzebeständigen Stähle gehören, haben nur die Stähle der Gruppe I Bedeutung. Zu ihnen gehören vor allem die Baustähle, die sich wieder in

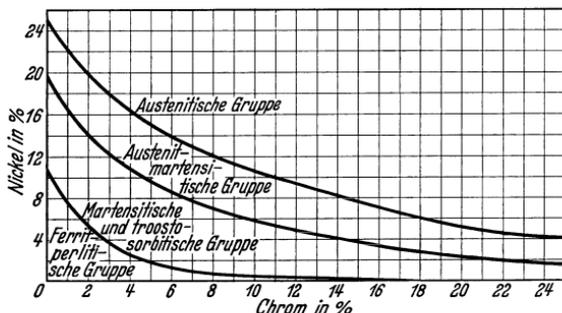


Abb. 27. Gefügeschau der Chrom-Nickelstähle.

zwei Untergruppen, in die Einsatz- und die Vergütungsstähle, scheiden. Der Deutsche Normenausschuß hat die Baustähle unter DIN 1662 genormt (s. beigegebene Zahlentafel 2).

Der Stahl VCN 45 dieser Norm mit einem Kohlenstoffgehalt an der oberen Grenze wird auch als Werkzeugstahl verwendet, und zwar als Sonderstahl für Warmgesenke und Stanzen.

Legiert man dem in Abschnitt 11 besprochenen 36proz. Nickelstahl, dem Invarstahl, noch ungefähr 12% Chrom zu, so erhält man einen Stahl, der eine noch größere Längenbeständigkeit bei Temperaturveränderungen besitzt. Darüber hinaus bleibt auch der Elastizitätsmodul beständig, weshalb man diesen Stahl Elinvarstahl genannt hat (*élasticité invariable*).

Die Chrom-Nickelstähle verlangen Vorsicht und Sorgfalt bei der Wärmebehandlung.

14. Chrom-Manganstähle.

Chrom-Manganstähle stehen als Werkzeugstähle, seit einiger Zeit aber auch als Baustähle in Verwendung.

Als Baustähle sind sie herangezogen worden, um die teureren Chrom-Nickelstähle zu ersetzen. Da Mangan, wie bereits bekannt,

auf Stahl eine ähnliche Wirkung ausübt wie Nickel, war diese Legierungsvertretung eigentlich selbstverständlich. Mit Chrom-Manganstählen sind denn auch tatsächlich durch Vergütung ungefähr gleiche Festigkeitswerte zu erreichen wie bei den Chrom-Nickelstählen, die Dehnung bleibt allerdings etwas zurück.

Die Chrom-Manganstähle sind überhitzungsempfindlich, weshalb die für die verschiedenen Marken vorgeschriebenen Temperaturen bei der Wärmebehandlung genau eingehalten werden müssen. Diesen Nachteil kann man übrigens durch einen geringen Nickelzusatz zum Teil aufheben.

Als Werkzeugstahl ist vor allem der Stahl mit etwa 0,9% Kohlenstoff, 1,0% Mangan und 0,5 bis 1,0% Chrom zu nennen. Er ist Ölhärter und zeichnet sich durch besondere Maßbeständigkeit aus. Verwendet wird er für Gewindebohrer, Reibahlen, Stehbolzenbohrer, Schnitte u. a. Durch Zulegieren von etwa 2% Wolfram wird dieser Stahl noch beachtlich verbessert.

Höher legierte Chrom-Manganstähle besitzen auch gute Beständigkeit gegen Rost- und Säureangriff bei gewöhnlichen wie auch bei hohen Temperaturen und werden in einem besonderen Abschnitt noch besprochen werden (Abschnitt 25).

15. Siliziumstähle.

Silizium (Si) ist gleich dem Mangan in jedem Stahl enthalten, da schon die Eisenerze je nach ihrer Zusammensetzung eine entsprechende Menge davon mitbringen. Auch bei der Stahlherstellung selbst wird von den feuerfesten Ofenauskleidungen her Silizium in die Schmelze aufgenommen. Aber erst solche Stähle werden Siliziumstähle genannt, die einen Siliziumgehalt von mehr als 0,40% besitzen.

Silizium ist kein Metall, sondern ein sog. Metalloid, wie es z. B. auch Schwefel und Phosphor sind. Während aber diese auf den Stahl eine nachteilige Wirkung ausüben, ist der Einfluß des Siliziums ähnlich jenem von Metallen.

Silizium verengt den Gamma-Bereich und schnürt ihn ab, so daß Stähle mit höheren Silizium- und niedrigen Kohlenstoffgehalten ferritisch sind, d. h. keine Umwandlung erfahren. Ähnliche Stähle haben wir schon unter den Chromstählen gefunden.

Durch Silizium werden Festigkeit und Streckgrenze des Stahles erhöht, die Dehnung dagegen herabgesetzt.

Silizium verringert in größerem Ausmaße die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit, weshalb die Siliziumstähle durchhärten.

Silizium macht den Stahl bei höheren Gehalten grobkörnig.

Einen besonderen Einfluß hat Silizium auf die Art der Ausscheidung des Kohlenstoffes beim Abkühlen des Stahles aus der festen Lösung. Bei den Siliziumstählen scheidet sich nämlich unter bestimmten Bedingungen der Kohlenstoff zum Teil nicht als Karbid aus, sondern ungebunden in der Form von Graphit (Temperkohle). Das Gefüge zeigt dann Ablagerungen feinsten Graphitschuppehen. Solcher Stahl ist schwarzbrüchig.

Die Siliziumstähle werden hauptsächlich als Vergütungsbaustähle und als Federstähle verwendet, letztere mit Gehalten von etwa 1 bis 2% Silizium und 0,40 bis 0,50% Kohlenstoff. Während der 2proz. Mangan-Federstahl eine bessere Härtebarkeit besitzt, zeichnet sich der 2proz. Silizium-Federstahl durch geringere Härteempfindlichkeit und durch höhere Anlaßbeständigkeit aus, d. h. er setzt den härtemindernden Einflüssen der Anlaßtemperaturen größeren Widerstand entgegen. Diese Vorzüge der beiden Stähle sind in dem auch häufig erzeugten Federstahl mit etwa 1% Mangan und 1% Silizium vereinigt (Mn-Si-Stahl).

Gute Federstähle sind ferner Chrom-Siliziumstähle mit etwa 0,5 bis 1,5% Silizium und etwa 0,5 bis 1,0% Chrom.

Besondere Bedeutung hat ein Chrom-Wolfram-Siliziumstahl mit etwa 0,35 bis 0,55% Kohlenstoff, 0,5 bis 1,2% Silizium, 0,6 bis 1,2% Chrom und 1,0 bis 3,0% Wolfram. Seine Anwendung ist vielseitig. Man nimmt ihn für Warm-, aber auch für Kaltarbeit: für Stempel, Scherenmesser, für Preßluftmeißel, Nietwerkzeuge u. a. m.

Stähle mit höherem Siliziumgehalt (etwa 14%) sind widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse (s. Abschnitt 25), aber nicht mehr schmiedbar.

Schließlich sind noch die Siliziumstähle für Dynamobleche zu erwähnen mit Kohlenstoffgehalten von höchstens 0,10% und Siliziumgehalten bis etwa 4,0%. Diese Legierungen eignen sich vorzüglich für Wechselstrommagnetisierung, weil sie den Magnetismus rasch aufnehmen und wieder abgeben.

16. Kobaltstähle.

Im Gegensatz zu den anderen Grundstoffen übt das Kobalt auf das Gefüge keinen großen Einfluß aus. Die Kobaltstähle sind bis zu hohen Legierungsgehalten perlitisch. Die Umwandlungspunkte dieser Stähle entsprechen ungefähr jenen der reinen Kohlenstoffstähle. Man hat daher das Kobalt als ideales Verdünnungsmittel für Eisen bezeichnet.

Kobalt wirkt der Grobkornbildung entgegen. Die Kobaltstähle sind daher in hohem Maße unempfindlich gegen Überhitzung.

Kobalt beeinflusst sehr günstig die magnetischen Eigenschaften des Stahles. Für Dauermagnete werden Stähle mit Kobaltgehalten zwischen 5 und 40% verwendet.

Eine besondere Bedeutung hat Kobalt als Zusatzstoff für die mehrfach legierten Schnellstähle gefunden. Darüber hören wir noch im Abschnitt 26.

Reine Kobaltstähle ohne Zusatz anderer Legierungselemente werden praktisch kaum verwendet.

17. Wolframstähle.

Wolfram (W) wirkt im Stahl stark karbidbildend und damit härtesteigernd. Es treten mehrere Arten von Wolframkarbiden auf, vor allem das wichtige Doppelkarbid $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, dem die Wolframstähle ihre hohe Schneidkraft verdanken. Nicht erwünscht ist das einfache Wolframkarbid WC, das sich aber nur unter besonderen Umständen, z. B. durch zu langes Glühen, ausbildet.

In welcher Weise die Punkte *S* und *E* durch Wolframzusatz verschoben werden, ist aus Abb. 28 zu ersehen. Je mehr also der Wolframgehalt steigt, desto mehr sinkt der Kohlenstoffgehalt des Perlitpunktes und des Punktes *E*.

Dagegen werden die Haltepunkte durch Wolfram nicht stark verändert.

Auch die Erniedrigung der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit durch Wolframzusatz ist gering. Wolframstähle härten daher wenig ein und lassen sich bis zu höheren Gehalten in Wasser abschrecken, ohne zu reißen.

Wolfram verfeinert das Korn des Stahles.

Da Wolfram die Dehnung wenig herabsetzt, sind die Wolframstähle zäher als z. B. die Chromstähle.

Wolfram verleiht dem Stahl vorzügliche magnetische Eigenschaften (5 bis 6% W).

Je höher der Wolframgehalt eines Stahles ist, desto mehr muß auch der Kohlenstoffgehalt steigen. Andernfalls würde der ganze vorhandene Kohlenstoff durch das Wolfram zu Karbid abgebunden und die Grundmasse kohlenstofffrei werden. Damit würde aber ein solcher Stahl seine Härte verlieren, denn ohne Kohlenstoff in der Grundmasse gibt es natürlich keine Umwandlungshärtung.

Wolframstähle neigen wenig zu Grobkornbildung und sind deshalb nicht überhitzungsempfindlich.

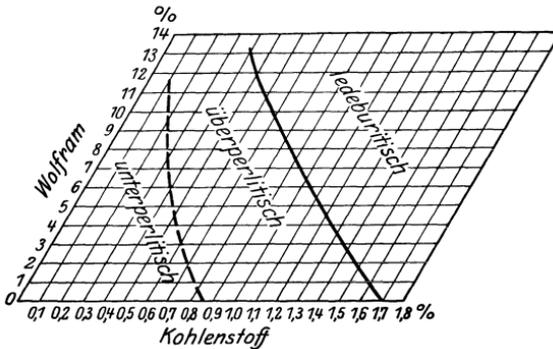


Abb. 28. Verschiebung der Punkte S und E im Diagramm durch Wolfram.

Besonders wichtig ist die Eigenschaft des Wolframs, den Stahl anlaßbeständig zu machen. Wolframstähle können bei entsprechenden Gehalten nach dem Härten auf höhere Temperaturen erwärmt werden, ohne daß ihre Härte nachläßt. Damit wird Wolfram zu einem wichtigen Legierungselement für die Warmarbeits- und vor allem auch für die Schnellarbeitsstähle. Zu erklären ist das Wesen der Anlaßbeständigkeit durch Ausscheidungsvorgänge. Im Abschnitt 7 Bd haben wir uns mit diesem Fragenbereich schon beschäftigt. Wir haben gesehen, daß gewisse Stoffe bei höheren Temperaturen — etwa auch bei den Härtetemperaturen — in feste Lösung gehen und durch schroffes Abschrecken auch bei Lufttemperatur in Lösung bleiben. Durch Erwärmen auf entsprechende niedrige Anlaßtemperaturen tritt dann nachträglich die Ausscheidung in feinst verteilter Form auf, womit eine Härteannahme verbunden ist. Solche Stähle können daher

unter Umständen durch Anlassen an Härte noch gewinnen, während z. B. Kohlenstoffstähle schon bei verhältnismäßig geringer Erwärmung in der Härte beträchtlich abfallen, weshalb sie für Warmarbeit nicht geeignet sind.

Reine Wolframstähle werden als Werkzeugstähle verwendet, und zwar vor allem für schneidende Werkzeuge wegen ihrer schon erwähnten besonderen Schneidkraft. Dagegen eignen sie sich nicht als Baustähle, wenn man von dem Sondergebiet der Magnetstähle absieht.

Als Anwendungsbeispiele seien genannt:

der bekannte 1proz. Wolframstahl für Spiralbohrer, Gewindebohrer u. dgl., der auch viel in gezogener Ausführung als sog. wolframlegierter Silberstahl verkauft wird;

der Gewehrlaufstahl mit etwa 2% Wolfram;

der 6proz. Magnetstahl;

der 8- bis 10proz. hochwertige Warmarbeitsstahl für Matrizen, Gesenke usw.;

ferner die sog. Riffelstähle mit etwa 1,0 bis 1,4% Kohlenstoff und etwa 3,0 bis 24,0% Wolfram.

Dem an vorletzter Stelle genannten Sonderstahl für Warmmatrizen werden meistens auch noch etwa 2% Chrom zugesetzt, wie denn überhaupt das Wolfram noch häufiger in mehrfach legierten Stählen vertreten ist als in reinen Wolframstählen.

18. Molybdänstähle.

Das Molybdän (Mo) ruft im Stahl ähnliche Wirkungen hervor wie das Wolfram, nur in noch stärkerem Ausmaße. So werden die Punkte *S* und *E* im Diagramm durch dieses Element noch rascher und weiter nach links zu niedrigeren Kohlenstoffgehalten abgerückt. Abb. 29 zeigt zum Vergleich der Wirkungen von Chrom, Wolfram und Molybdän die Verschiebungen des Punktes *E* — des Beginns der Ledeburitbildung — durch diese drei Grundstoffe. Auch die Karbidbildung wird durch Molybdän stärker gefördert.

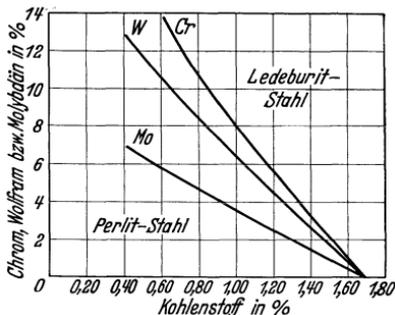


Abb. 29. Verschiebung des Punktes *E* im Diagramm durch Chrom, Wolfram und Molybdän.

Zahlentafel 3.

Chrom- und Chrom-Molybdänstähle nach DIN 1663.

In der Markenbezeichnung bedeuten:

die Buchstaben: E = Einsatzstahl

C = Chrom

die Zahlen: a) bei den Einsatzstählen:

den Mindesthundertsatz an Chrom · 100

b) bei den Vergütungsstählen:

die erste Ziffer den ungefähren Chromgehalt in %,

die folgenden beiden Ziffern den mittleren Hundertsatz an Kohlenstoff · 100

Ferner bedeuten: W = Wasserhärtung, Ö = Ölhärtung

Reinheitsgrad: Phosphor und Schwefel nicht mehr als je 0,035 %,

zusammen nicht mehr als 0,06 %¹

V = Vergütungsstahl

Mo = Molybdän

Marken- bezeichnung ²	Anlieferungs- zustand A ³		Anlieferungs- zustand B ⁴		Anlieferungs- bzw. Verwendungszustand C ⁵			Gehalt in %					
	Brinellhärte H_n kg/mm ² höchstens	Eindruck- durch- messer d mm	Brinell- härte H_n kg/mm ²	Zug- festigkeit ⁶ σ_B kg/mm ²	Streck- grenze σ_F in % der Zugfestig- keit σ_B mindestens	Bruchdehnung in %		Kohlen- stoff C	Chrom Cr	Molybdän Mo	Mangan Mn	Sil- zium Si	höch- stens
						δ_5	δ_{10}						
EC 30	170	5,2 bis 4,6	131 bis 170	55 bis 70 W	65	20 bis 14	15 bis 10	0,10 bis 0,16	0,3 bis 0,5	—	0,4 bis 0,6	0,35	
		5,0 bis 4,4	143 bis 187			18 bis 12	14 bis 9						0,12 bis 0,18
EC Mo 80	207	4,6 bis 4,2	170 bis 207	90 bis 110 Ö	70	16 bis 10	12 bis 8	0,13 bis 0,17	0,8 bis 1,2	0,20 bis 0,30	0,7 bis 1	0,35	
		4,5 bis 4,1	179 bis 217			13 bis 7	9 bis 5						0,17 bis 0,22

Einsatzstähle

Vergütungsstähle

VCMo 125	217	4,5 bis 4,1	179 bis 217	65 bis 80 W oder Ö	65	23 bis 17	16 bis 12	0,22 bis 0,29	0,9 bis 1,2	0,15 bis 0,25	0,5 bis 0,8	0,35
VC 135	217	4,5 bis 4,1	179 bis 217	75 bis 90 W oder Ö	65	16 bis 10	12 bis 8	0,30 bis 0,37	0,9 bis 1,2	—	0,5 bis 0,8	0,35
VCMo 135	217	4,5 bis 4,1	179 bis 217	80 bis 100 W oder Ö	70	16 bis 10	12 bis 8	0,30 bis 0,37	0,9 bis 1,2	0,15 bis 0,25	0,5 bis 0,8	0,35
VCMo 140	217	4,5 bis 4,1	179 bis 217	95 bis 110 Ö	75	15 bis 9	10 bis 6	0,38 bis 0,45	0,9 bis 1,2	0,15 bis 0,25	0,5 bis 0,8	0,35
VCMo 240 ⁷	229	4,4 bis 4,0	187 bis 229	110 bis 130 Ö	78	13 bis 8	9 bis 5	0,38 bis 0,45	1,6 bis 1,9	0,30 bis 0,40	0,5 bis 0,8	0,35

¹ Bei saurem Stahl sind je nach Vereinbarung höhere Gehalte an Phosphor und Schwefel zulässig.

² Gewünschten Anlieferungszustand bei Bestellung angeben, z. B. VC Mo 140 Anlieferungszustand B.

³ Anlieferungszustand A: Diese Werte entsprechen dem geglätteten Zustand.

⁴ Anlieferungszustand B: Diese Werte entsprechen einer Behandlung zur Erzielung günstigen Verhaltens bei der spanabhebenden Bearbeitung (Vermeidung des Schmierens).

⁵ Anlieferungs- bzw. Verwendungszustand C: Diese Werte entsprechen dem gehärteten bzw. vergüteten Zustand.

⁶ Maßgebend ist der Zugversuch. Als Annäherung genügt die Bestimmung der Brinellhärte, wobei $H = \frac{\sigma_B}{0,35}$ ist.

⁷ Enthält etwa 0,2% Vanadin.

Bei geringen Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung sind die dem Anlieferungszustand entsprechenden mechanischen Eigenschaften für die Abnahme maßgebend.

Die aufgeführten mechanischen Eigenschaften gelten

bei Einsatzstahl für die Prüfung eines Rundstabes von etwa 30 mm Durchmesser,

bei Vergütungsstahl für die Prüfung eines Rundstabes von etwa 60 mm Durchmesser in Faserrichtung.

Prüfung nach DIN 1602 und 1605 Blatt 1 bis 3.

Probenahme bei Vergütungsstahl aus der Randzone, deren Höhe $\frac{1}{3}$ des Durchmessers oder der Kantenlänge beträgt (bezogen auf 60 mm Dicke).

Behandlung und Leistung der einzelnen Stähle siehe DIN 1663 Beiblatt 1 bis 9 (in Bearbeitung).

Fachnormenausschuß der Krafffahrindustrie Edelstahl-Verband

Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Verlag GmbH., Berlin SW 19, erhältlich ist

Molybdän erhöht die Festigkeit und die Streckgrenze des Stahles und vermindert seine Dehnung und Einschnürung. Dabei bleibt aber doch eine gewisse Zähigkeit erhalten.

Molybdän erhöht die Anlaßbeständigkeit und unterdrückt die Anlaßsprödigkeit.

Molybdän verbessert die Dauerfestigkeit des Stahles.

Ähnlich wie die Wolframstähle sind auch die Molybdänstähle nicht überhitzungsempfindlich.

Reine Molybdänstähle werden jedoch wenig verwendet, es sei denn als Baustähle wegen der erwähnten erhöhten Dauerfestigkeit. Vielfach legiert man wenigstens Chrom hinzu. Das ist wirtschaftlicher, weil Chrom billiger ist als Molybdän, außerdem härten solche Stähle besser durch. Gegen stoßweise Beanspruchung erweisen sie sich als sehr widerstandsfähig. Mehr und mehr kommen Chrom-Nickel-Molybdänstähle als Baustähle in Verwendung für Gebiete, auf denen besondere Anforderungen gestellt werden, wie z. B. im Flugzeug-, Automobil- und Dieselmotorenbau. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die bekannten Vergütungsbaustähle VCN 15, VCN 35 und VCN 45 mit Molybdänzusatz. Aber auch die inzwischen genormten (DIN 1663) nickelfreien Chrom-Molybdänstähle (s. Zahlentafel 3) haben wesentlich an Bedeutung gewonnen und die Chrom-Nickelstähle in Deutschland zum großen Teil verdrängt.

Ein Stahl mit etwa 0,60% Mangan, 1,0% Chrom und 0,25% Molybdän ist als guter ölhärtbarer Zahnradstahl anzusprechen. Zahnräder aus diesem Ölhärter sind zwar nicht ganz so leistungsfähig wie im Einsatz gehärtete, sie lassen sich aber dafür viel einfacher und billiger erzeugen.

Molybdän verbessert die magnetischen Eigenschaften des Stahles.

Molybdän spielt auch bei den Härtungserscheinungen durch Ausscheidungsvorgänge (s. Abschnitt 7Bd) eine nicht unwesentliche Rolle.

Der Einfluß des Molybdäns auf die Säurebeständigkeit sowie sein Wert für die Schnellarbeitsstähle wird in den betreffenden Abschnitten besonders besprochen.

19. Vanadinstähle.

Das Vanadin (V) ist in seiner Wirkung auf den Stahl noch stärker als das Molybdän. Vor allem ist die Karbidbildung be-

trächtlich. Mit steigendem Vanadengehalt muß daher auch der Kohlenstoff zunehmen, weil sonst schon bei verhältnismäßig geringen Zusätzen von Vanadin zu viel Kohlenstoff aus der Grundmasse abgezogen und zu Karbid gebunden wird, wodurch der Stahl seine Härbarkeit verliert.

Vanadin erhöht den Umwandlungspunkt A_3 , womit eine Erhöhung der Temperaturen für das Normalglühen wie auch für das Härten verbunden ist. Bei größeren Legierungsgehalten wird das Gamma-Gebiet ganz unterdrückt.

Besonders hervorzuheben ist die Eigenschaft des Vanadins, den Stahl gegen Überhitzung unempfindlich zu machen.

Das Vanadin erhöht die Festigkeit und die Streckgrenze, wobei aber die Dehnung wider Erwarten nicht herabgesetzt wird.

Vanadin verbessert die Warmbeständigkeit der Stähle.

Vanadin gilt als ausgezeichnetes Desoxydationsmittel.

Vanadin macht den Stahl widerstandsfest gegen schlagende und stoßende Beanspruchung.

Vanadinstähle besitzen gute Schmitthaltigkeit.

Reine Vanadinstähle sind wenig im Gebrauch, es werden meistens noch andere Legierungselemente zugesetzt. Am besten wird Vanadin durch Chrom ergänzt.

Ein guter Feder- und Baustahl für Vergütung ist der Stahl mit etwa 0,5% Kohlenstoff, 0,9% Mangan, 1,2% Chrom und 0,15% Vanadin.

Da Vanadin den Stahl warmbeständig macht, setzt man dem im Abschnitt 18 angeführten Warmarbeitsstahl mit 8 bis 10% Wolfram (und 2% Chrom) meistens noch etwa 0,4 bis 1,0% Vanadin zu.

Ein wichtiger Zusatzstoff ist Vanadin auch für die Schnellarbeitsstähle.

20. Aluminium im Stahl.

Aluminium (Al) ist in seinem Verhalten ähnlich dem Silizium. Gleich diesem begünstigt es vor allem die Ausscheidung des Kohlenstoffs in Form von Graphit, und zwar in noch stärkerer Weise.

Bei höheren Gehalten macht es den Stahl grobkörnig.

Das Gamma-Gebiet wird durch Aluminium abgeschnürt.

Wegen seiner Verwandtschaft zum Sauerstoff ist das Aluminium ein wichtiges Desoxydationsmittel bei der Stahlherstellung.

Es wird der Schmelze zugesetzt und bindet den Sauerstoff in einer unschädlichen Form ab.

Eine größere Verwandtschaft hat Aluminium auch zum Stickstoff. Aus diesem Grunde wird es den noch besonders zu besprechenden Nitrier- oder Verstickungsstählen zugesetzt, bei denen es das Eindringen des Stickstoffes in den Stahl begünstigt.

Ein besonderes Anwendungsgebiet für Aluminium ist das „Alitieren“ von Gegenständen aus gewöhnlichem Flußeisen. Die betreffenden Teile werden in Aluminiumpulver verpackt und auf Temperaturen über 1000° erhitzt. Dabei dringt das Aluminium in die Oberfläche des Eisens ein (ähnlich wie der Kohlenstoff bei der Einsatzhärtung). Derweise behandelte Gegenstände sind widerstandsfest gegen Oxydation bei hohen Temperaturen. An der Oberfläche bildet sich nämlich ein Aluminiumoxyd und diese Haut schützt das Eisen vor weiterer Verzunderung.

Aber auch als Legierungselement erhöht Aluminium, die Zunder- und Hitzebeständigkeit des Stahles.

21. Kupfer im Stahl.

Das Kupfer (Cu) erhöht die Festigkeit und die Streckgrenze des Stahles, die Dehnung dagegen wird vermindert.

Der bekannte Hochbaustahl St 52 hat Kupfergehalte von etwa 0,4 bis 0,8%.

Kupfer verbessert die Rostbeständigkeit, weshalb es manchmal den rostbeständigen Chromstählen noch zugesetzt wird.

Niedriggekohlte Stähle mit Kupferzusätzen eignen sich für Ausscheidungshärtung.

22. Der Stickstoff.

Der Stickstoff (N) übt auf den Stahl einen schädlichen Einfluß aus. Vor allem macht er ihn hart und spröde. Schon bei der Herstellung des Stahles macht er sich unangenehm bemerkbar, indem er die Bildung von Gasblasen begünstigt.

Die Wirkungen dieses Grundstoffes lassen sich aber auch nutzbringend auswerten. Man kann den Stickstoff in die Oberfläche geeigneter Stähle diffundieren lassen und auf diese Weise eine Oberflächenhärtung durchführen. Man nennt den Vorgang *Nitrieren* oder *Versticken*. Dabei bilden sich in der Oberfläche des

Stahles Nitridverbindungen von außerordentlich hoher Härte. Ein Abschrecken, wie es bei der Einsatzhärtung notwendig ist, entfällt bei der Nitrierhärtung, weshalb nitrierte Teile verzugsfrei bleiben. Die nitrierte Oberfläche ist bis etwa 500° härtebeständig.

Leider hat das Nitrieren auch seine Nachteile. Vor allem läßt sich die Stärke der Härteschicht nicht so regulieren wie bei der Einsatzhärtung, und über eine Tiefe von 1 mm kommt man überhaupt kaum hinaus.

Auch sind nicht alle Stähle für die Verstickung geeignet. Es mußten vielmehr Sonderstähle geschaffen werden, die mit Grundstoffen legiert sind, welche eine größere Verwandtschaft zum Stickstoff haben (wie z. B. Chrom, Silizium, Aluminium) und sein Eindringen in die Stahloberfläche begünstigen.

Der Vorgang beim Nitrieren ist kurz folgender: Die auf Fertigmaß bearbeiteten Teile werden in einem besonderen Ofen auf etwa 500° erhitzt und bei dieser Temperatur während einer Dauer von 1 bis 4 Tagen einem Ammoniakstrom ausgesetzt. Ammoniak ist eine Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff. Bei der angegebenen hohen Temperatur löst sich diese chemische Verbindung, und der freigewordene Stickstoff dringt in die Oberfläche der zu härtenden Gegenstände ein. Wenn dann die Teile nach der angegebenen Zeit aus dem Ofen genommen werden, sind sie bereits fertig gehärtet.

23. Der Sauerstoff.

Ähnlich wie Stickstoff ist auch Sauerstoff (O) für den Stahl schädlich. Dies gilt besonders für die Verbindung FeO , für das Eisenoxyd. Wenn man bei der Stahlerzeugung aber dem Schmelzbad Legierungselemente zusetzt, die eine größere Verwandtschaft zum Sauerstoff haben, dann wird er durch diese — es handelt sich vor allem um Mangan, Vanadin und Aluminium — gebunden und unschädlich gemacht. Man nennt das Desoxydieren. Schlecht desoxydierter Stahl ist härteempfindlich.

So wie Stickstoff macht auch Sauerstoff den Stahl hart und spröde und vermindert seine Zähigkeit. Diese Erscheinungen sind hier wie dort auf Ausscheidungsvorgänge zurückzuführen. Sie werden durch Kaltverformung gefördert. Meistens tritt das Spröderwerden erst nach längerem Lagern ein; es wird dann mit „Altern“ bezeichnet.

24. Andere Grundstoffe im Stahl.

Stahl kann noch eine ganze Reihe anderer Grundstoffe enthalten, auf die in diesem Zusammenhange jedoch nicht näher eingegangen zu werden braucht.

Kurz zu erwähnen wären vielleicht noch die Elemente Titan, Bor und Beryllium, die bestimmt eine gesteigerte Rolle spielen werden, wenn erst einmal die jetzt noch in den Kinderschuhen steckende Ausscheidungshärtung besser durchgebildet und allgemeiner angewendet sein wird.

Zirkon ist ein gutes Desoxydations- und Entstickungsmittel.

Die Elemente Titan und Tantal, auch Niob, haben eine besondere Bedeutung auf dem Gebiete der rost- und säurebeständigen Stähle gefunden. Darüber wird im folgenden Abschnitt noch gesprochen.

25. Rost-, säure- und hitzebeständige Stähle.

Mancher Leser wird sich schon die Frage gestellt haben: „Was ist eigentlich Korrosion?“ oder: „Warum rostet Eisen, warum rostet aber nicht der sog. rostsichere¹ Stahl?“

Auf die Frage nach dem Wesen der Korrosion antwortet der „Reichsausschuß für Metallschutz“ mit den Worten: „Korrosion ist die Zerstörung eines festen Körpers, die durch unbeabsichtigte chemische und elektrochemische Angriffe von der Oberfläche ausgeht.“

Die häufigste Art solcher Zerstörung bei Eisen und Stahl ist das Rosten, d. h. der Angriff durch Sauerstoff (O) und Feuchtigkeit. Der Sauerstoff der Luft vereinigt sich mit dem Eisen und Wasserstoff zu einer chemischen Verbindung, dem Eisenhydroxyd. Die zu dieser Verbindung notwendigen Eisenmengen entnimmt er der Oberfläche des angegriffenen Eisenstückes. Je länger dieser chemische Prozeß andauert, desto mehr Eisen wird verbraucht, desto weiter schreitet die Zerstörung fort. In ähnlicher Weise kann das Eisen auch durch andere Stoffe, durch Säuren, Laugen und sonstige chemische Lösungen angegriffen und zerstört werden.

¹ Man spreche doch nicht immer von „rostfrei“ Stahl! Jeder beliebige Stahl ist rostfrei — frei von Rost, so lange er eben nicht angerostet ist.

Der rein chemische Angriff kann durch elektrochemische Vorgänge unterstützt und gefördert sein. Um das besser zu verstehen, machen wir einen kleinen Abstecher in die Elektrizitätslehre:

Jeder Stoff und vor allem jedes Metall hat sein besonderes elektrisches Potential. Diesen Ausdruck übersetzen wir für unsere Zwecke am besten mit „elektrische Wirksamkeit“. Das Potential ist ein Maß für das elektrische Verhalten der Stoffe. Man kann die Stoffe nach der Größe ihres elektrischen Potentials steigend ordnen und erhält damit die „elektrische Spannungsreihe“. Den ersten Versuch zur Aufstellung einer solchen Spannungsreihe hat schon Galvani vor rund 130 Jahren gemacht. Zwischen Stoffen verschiedenen Potentials besteht eine „Potentialdifferenz“ — in guter deutscher Sprache: ein Spannungsunterschied, der nach Ausgleich strebt. Der Spannungsunterschied zwischen zwei Stoffen ist um so größer, je weiter sie in der Spannungsreihe auseinanderliegen.

Dieses Prinzip wird im „galvanischen Element“ praktisch ausgewertet. Jedermann kennt es von der Hausklingel her: In ein mit einer bestimmten Säurelösung gefülltes Gefäß werden als Enden eines geschlossenen Leitungskreises zwei Platten aus verschiedenen Metallen, also mit verschiedenem elektrischen Potential — mit verschiedener elektrischer Wirksamkeit — so gestellt, daß sie einander nicht berühren. Durch den Potentialunterschied der beiden Metalle wird nun ein elektrischer Strom erzeugt, der von der Platte des höheren Potentials durch die leitende Flüssigkeit hinweg zur Platte des niedrigeren Potentials und sodann durch den Leitungsdraht zur ersten Platte zurückfließt. Auf diese Weise entsteht der Betriebsstrom für die Klingel. Durch die Arbeitsleistung tritt in der kleinen Elektrizitätsfabrik natürlich ein Verschleiß auf: Die Säurelösung wird verbraucht, aber auch die stärker beanspruchte Metallplatte wird angefressen und muß nach einiger Zeit erneuert werden. Es wird dies die Platte aus dem weniger edlen Metall sein, d. h. aus dem Metall mit dem geringeren elektrischen Potential.

Genau der gleiche Vorgang spielt sich ab, wenn sonstwie zwei Metalle verschiedenen Potentials zusammenkommen und gleichzeitig vielleicht auch noch dazu feucht werden. Es bildet sich automatisch ein unbeabsichtigtes, ja unerwünschtes winziges galvanisches Element, ein Lokalelement, wobei wieder das weniger

edle Metall angegriffen und mit der Zeit zerstört wird. Die elektrischen Ströme, die dabei entstehen und die Zerstörung herbeiführen, sind natürlich, dem Größenausmaß des Elements entsprechend, verschwindend klein, so daß wir sie nicht ohne weiteres feststellen können; ihre Wirkung macht sich aber leider nur zu gut bemerkbar. Dabei ist es noch nicht einmal notwendig, daß zwei verschiedene Metalle zusammengebracht werden, wie es z. B. beim Löten von Eisen mit Zinn der Fall ist. Auch schon verschiedene Gefügebestandteile in einem und demselben Metall, in erster Linie im Stahl, können unterschiedliches elektrisches Potential besitzen und damit den Anlaß zur Bildung von galvanischen Elementen, damit aber auch gleichzeitig den Anlaß zur Zerstörung geben. Wir haben ja in der Gefügelehre gesehen, daß gerade beim Stahl sehr verschiedenartige Gefügeformen und Gefügebestandteile (weicher Ferrit, hartes Eisenkarbid usw.) auftreten, und die damit verbundene elektrochemische Wirkung ist es nun, die den Rostangriff wesentlich unterstützt.

Will man rostbeständige Stähle schaffen, so wird man nach dem Vorgesagten das Rosten von zwei Seiten her bekämpfen müssen: Man wird einerseits den Angriff von außen abwehren, andererseits aber im Stahl selbst alle Vorbedingungen unterdrücken, die für die Bildung von Lokalelementen (galvanischen Elementen) günstig sind, d. h. man wird ein möglichst gleichartiges Gefüge herbeiführen, wie es z. B. das Härtegefüge oder auch das austenitische Gefüge ist.

Um den Angriff von außen zu bekämpfen, kann man den Stahl mit geeigneten Grundstoffen legieren, von denen der wichtigste und wirksamste das Chrom ist.

Die Wirkung dieses Elements soll durch folgende Überlegungen verständlich werden: Chrom ist weniger edel als Eisen; es wird durch den Sauerstoff rascher angegriffen als das Eisen. Der Sauerstoff der Luft wird sich daher beim rostbeständigen Stahl nicht mit den Eisenatomen, sondern mit den Chromatomen verbinden, zu Chromoxyd. Über die ganze Oberfläche des rostbeständigen Stahles wird sich dadurch eine hauchdünne Schichte dieses Chromoxydes — ein Oxydfilm — legen und den Stahl darunter vor einem weiteren Angriff durch Sauerstoff schützen. Dieser Oxydfilm ist jedoch so dünn, daß er für unser Auge unsichtbar bleibt.

Wenn sich diese Schutzdecke leicht und ohne Unterbrechung ausbilden soll, dann muß die Oberfläche des Stahles unbedingt frei von allem Zunder und anderen Verunreinigungen sein. Darüber hinaus muß sie auch möglichst glatt sein. Daher ist vor allem bei Gegenständen aus Chromstählen ein Polieren des Stahles erforderlich; bei den Chrom-Nickelstählen wird jedoch in den meisten Fällen ein Blankbeizen genügen.

Um seiner Aufgabe gerecht zu werden, muß das Chrom aber in ausreichendem Maße, d. h. in Mengen von wenigstens 13% vorhanden und gleichmäßig über den ganzen Stahl verteilt sein. Bei einem Stahl mit höherem Kohlenstoffgehalt ist die Chromverteilung aber gewöhnlich keine gleichmäßige. Der Kohlenstoff wird vielmehr größere Mengen von Chrom zu Chromkarbid abbinden. Dadurch wird aber der Grundmasse Chrom entzogen, der Chromgehalt der Grundmasse wird unter 13% sinken und der Stahl wird damit seine Rostbeständigkeit verlieren. Abgesehen davon besteht dann der Stahl aber auch aus zweierlei Gefügebestandteilen: aus der chromärmeren Grundmasse und den Chromkarbiden, so daß sich in der geschilderten Weise Lokalelemente bilden und das Rosten unterstützen.

Bleibt der Kohlenstoffgehalt unter 0,60%, dann kann man die Karbidbildung unterbinden, indem man den Stahl härtet. Man erhält damit das einheitliche Martensitgefüge, und das Chrom bleibt gleichmäßig im Stahl verteilt. Bei einem Stahl mit höherem Kohlenstoffgehalt ist dagegen eine Rostbeständigkeit nicht mehr gegeben. Solcher Stahl besitzt infolge des hohen Chromgehaltes bereits freie Karbide, die beim Härten nicht mehr in Lösung gebracht werden können. Die Folgen davon sind: Anreicherung von Chrom in den ungelösten Karbiden und Chromentzug aus der Grundmasse, die nun nicht mehr rostbeständig ist; ferner die Bildung von Lokalelementen. Aus diesem Grunde ist z. B. der im Abschnitt 12 beschriebene hochverschleißfeste Ledeburitstahl mit 13% Chrom und 2,2% Kohlenstoff nicht rostbeständig.

Bei den korrosionsbeständigen Sonderstählen, die in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung gewonnen haben, sind vor allem zwei Hauptgruppen zu unterscheiden:

- a) die Chromstähle mit mindestens 13% Chrom,
- b) die austenitischen Chrom-Nickelstähle.

Daneben haben sich noch andere Legierungen eingeführt, die für einige Anwendungsgebiete sehr gute Eignung besitzen, in erster Linie die Chrom-Manganstähle und die Chrom-Siliziumstähle.

Die korrosionsbeständigen Chromstähle müssen, wie schon gesagt, in der Grundmasse wenigstens 13% Chrom aufweisen und dürfen im allgemeinen nicht mehr als 0,60% Kohlenstoff besitzen. Um in Ausnahmefällen den Stahl auch bei höherem Kohlenstoffgehalt beständig zu erhalten, muß man den Chromgehalt steigern. Je tiefer der Kohlenstoff gehalten wird, desto besser ist die Beständigkeit, denn um so weniger Karbide können sich bilden. Die höher gekohlten Arten, d. h. auch schon die Stähle mit etwa 0,30 bis 0,60% Kohlenstoff, müssen gehärtet werden, damit die Karbidbildung unterdrückt wird. Bei den Stählen mit nur etwa 0,15% Kohlenstoff und darunter ist das Härten nicht mehr unbedingt notwendig, da solche geringe Mengen nicht mehr wesentlich Chrom aus der Grundmasse herausziehen und zu Karbid abbinden können.

Im allgemeinen werden heute folgende nichtrostende Chromstähle erzeugt:

1. Der härtbare Messerstahl mit 13 bis 15% Cr und etwa 0,50% C.

2. Der vergütbare Baustahl mit 13 bis 16% Cr und etwa 0,30% C für Konstruktionsteile im Maschinenbau.

3. Der vergütbare Stahl mit 13 bis 15% Cr und etwa 0,12% C für ähnliche Zwecke wie 2., ferner für Löffel und Gabeln.

4. Der halbferritische Stahl mit 14,5 bis 16% Cr und etwa 0,10% C. Sein Gefüge ist eine Mischform; zum Teil ist es ferritisch (nicht härtbares Delta-Eisen), zum Teil ist es härtbar. Als Ganzes nimmt dieser Stahl nur in beschränktem Maße Härte an. Er wird hauptsächlich in der Besteckindustrie für Löffel und Gabeln verwendet.

5. Der ferritische, nicht härtbare, dafür aber am besten beständige Chromstahl mit 17 bis 22% Cr und 0,05 bis höchstens 0,12% C. Er wird für Verkleidungen usw. verwendet. Er ist sehr gut tiefziehbar und besonders auch gegen die Angriffe von Salpetersäure widerstandsfest. Die Eigenschaften der ferritischen Stähle wurden im Abschnitt 8 C beschrieben. Hier sei nur daran erinnert, daß diese Stähle zu Grobkornbildung neigen. Wegen

der fehlenden Umwandlung kann aber das grobe (spröde) Korn nur durch Warmverformung (Kornzertrümmerung) verfeinert werden, was aber in den seltensten Fällen möglich ist. Wie sollte man z. B. einen Behälter, der aus Blechen zusammengeschweißt und an den Schweißstellen durch die hohe Schweißhitze grobkörnig geworden ist, noch weiter verformen?

Die korrosionsbeständigen Chromstähle, mit Ausnahme der ferritischen und halferritischen, müssen nach einer Warmverformung langsam und sorgfältig — am besten im erkaltenden Ofen oder unter Asche — abgekühlt werden, da sie sonst ungleichmäßig hart werden und infolge der auftretenden Spannungen leicht reißen. Aus diesem Grunde ist auch ein Schweißen nach Möglichkeit zu vermeiden oder vorteilhaft mit austenitischen Schweißdrähten durchzuführen. Es nimmt dann das zähe austenitische Schweißgut die Spannungen auf und das Reißen wird vermieden.

Eine wesentliche Verbesserung der Beständigkeit der Chromstähle in allgemeiner Hinsicht wird durch Zulegieren von Nickel erzielt. Im besonderen macht Nickel den Stahl gegen nicht-oxydierende Säuren (z. B. Salzsäure) beständiger. Schon ein Zusatz von nur 2% dieses Grundstoffes spielt eine nicht unwesentliche Rolle. Ein solcher Stahl zeichnet sich z. B. durch bessere Beständigkeit gegen den Angriff von Seewasser aus.

Die korrosionsbeständigen Chrom-Nickelstähle im eigentlichen Sinne sind aber die Legierungen mit mindestens 18% Chrom und 8% Nickel bei geringen Kohlenstoffgehalten. Diese Stähle haben das einheitliche und gleichartige Gefüge des Austenits, wobei der Legierungsgehalt vollständig gelöst ist, so daß sich keine chromarmen Höfe und keine Lokalelemente bilden können. Dies trifft allerdings nur dann wirklich zu, wenn die Stähle aus hohen Temperaturen (etwa 1100 bis 1150°) abgeschreckt sind. Nur dann wird die Karbidbildung gänzlich unterdrückt. Bei dem hohen Gehalt an Chrom, das die Karbidausbildung, wie bekannt, sehr fördert, ist dies ohne weiteres verständlich. Werden diese Stähle nach dem Abschrecken nochmals erwärmt, so scheiden sich, vor allem bei Temperaturen zwischen 600 und 800°, wieder Karbide aus und lagern sich in feinsten Form zwischen die einzelnen Kristalle ab. Damit ist natürlich wieder ein Chromentzug aus der Grundmasse verbunden, der die Beständigkeit vermindert.

Außerdem verlieren die Kristalle untereinander den festen Zusammenhang, den sie im Austenitgefüge hatten (Abb. 30).

In diesem Zustande ist der Stahl gegen Rost- und Säureangriffe wenig widerstandsfest, und es tritt die sog. „interkristalline Korrosion“ auf (inter = zwischen), die Kristalle fallen buchstäblich auseinander. An den betreffenden Stellen wird der Stahl mürbe und brüchig; dünne Bleche, bei denen diese Korrosion durch und durch geht, kann man zwischen den Fingern zerreiben. Geht man mit der Temperatur noch höher, dann lösen sich diese

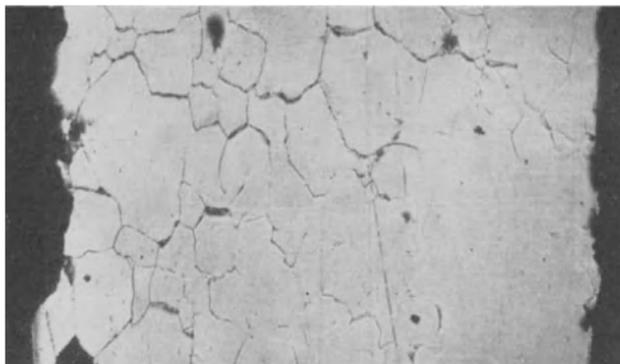


Abb. 30. Interkristalline Korrosion.

Ausscheidungen allmählich wieder auf, bis wir bei 1100° aufs neue das gleichartige austenitische Gefüge vor uns haben, das wir dann durch Abschrecken festhalten können.

Die korrosionsbeständigen Chrom-Nickelstähle müssen demnach in abgeschrecktem Zustande verwendet werden, wie sie auch schon von den Stahlwerken zur Lieferung kommen. Eine Erwärmung auf 600 bis 800° muß beim Verbraucher unbedingt vermieden bleiben oder der Stahl muß nachträglich aus 1100° abgeschreckt werden, was häufig nicht möglich sein wird.

In vielen Fällen wird nun eine Erwärmung nicht zu umgehen sein. Das trifft vor allem für Teile zu, die geschweißt werden. An den Schweißstellen treten außerordentlich hohe Temperaturen auf, die von der Schweiße weg mit der Entfernung abnehmen und schließlich auf Raumtemperatur sinken. Bei diesem allmählich verlaufenden Wärmeabfall von der Schweißhitze auf Raumtemperatur muß es natürlich in einem gewissen Abstand von

der Schweißstelle immer irgendwo einen parallel zur Schweißnaht laufenden Bereich geben, in dem die Temperatur gerade 600 bis 800° beträgt. Hier fallen die Karbide aus, und hier tritt dann bei einem chemischen Angriff auch die „interkristalline Korrosion“ auf. Große geschweißte Behälter kann man aber nach dem Schweißen nicht mehr glühen und abschrecken. Selbst wenn die Einrichtungen dafür ausreichen sollten, wird sich eine solche Wärmebehandlung dennoch verbieten, weil die betreffenden Gegenstände dadurch einen stärkeren Verzug erleiden.

Die Metallurgen haben auch hier Abhilfe geschaffen. Sie haben den Chrom-Nickelstählen noch weitere Legierungselemente zugesetzt, und zwar solche, die eine größere Verwandtschaft zum Kohlenstoff aufweisen. Derartige Grundstoffe sind: Tantal, Niob, Titan usw. Sind solche Elemente im Stahl anwesend, dann verbindet sich der Kohlenstoff mit ihnen, das Chrom dagegen bleibt ungebunden und seiner Bestimmung erhalten. Diese Tantal-, Niob-, Titankarbide sind außerdem im Austenit der Chrom-Nickelstähle nicht löslich. Sie können daher auch nicht bei den kritischen Temperaturen von 600 bis 800° in der schädlichen Form ausgeschieden werden. Die interkristalline Korrosion ist damit wirksam unterbunden, die Stähle sind „schweißfest“ geworden¹ (Abb. 31).

Eine weitere Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit der Chrom-Nickelstähle wird durch die Grundstoffe Molybdän und Kupfer erzielt. Molybdän wirkt vor allem den Angriffen von Salzsäure, Schwefelsäure und schwefliger Säure entgegen. Kupfer dagegen verbessert den Widerstand gegen Rosten, indem es auf der Oberfläche des Stahles einen dünnen, unsichtbaren Niederschlag — eine ergänzende Schutzschicht — bildet.

Die vorhin beschriebene „interkristalline Korrosion“ kann man auch dadurch einschränken — wenn auch nicht ganz unterdrücken —, daß man den Kohlenstoffgehalt möglichst tief — etwa bei 0,04 bis 0,08% — hält. Das ist leicht zu verstehen, denn der Kohlenstoff ist es ja, der die Karbide bildet, welche

¹ Diese Stähle werden manchmal auch als „schweißbar“ bezeichnet. Das ist aber unrichtig und gibt zu Mißverständnissen Anlaß. Auch die anderen Qualitäten ohne den angegebenen Legierungszusatz sind verhältnismäßig gut schweißbar, nur daß bei ihnen nachher die interkristalline Korrosion auftritt, wenn sie einem chemischen Angriff ausgesetzt werden.

dann interkristallin ausgeschieden werden. Am besten wäre es natürlich, den Kohlenstoff ganz fernzuhalten, was sich aber praktisch nicht durchführen läßt.

Aus dem gleichen Grunde sind auch die verschiedenen Sonderweicheisen (wie Armco-Eisen usw.) ohne jeden Legierungsgehalt

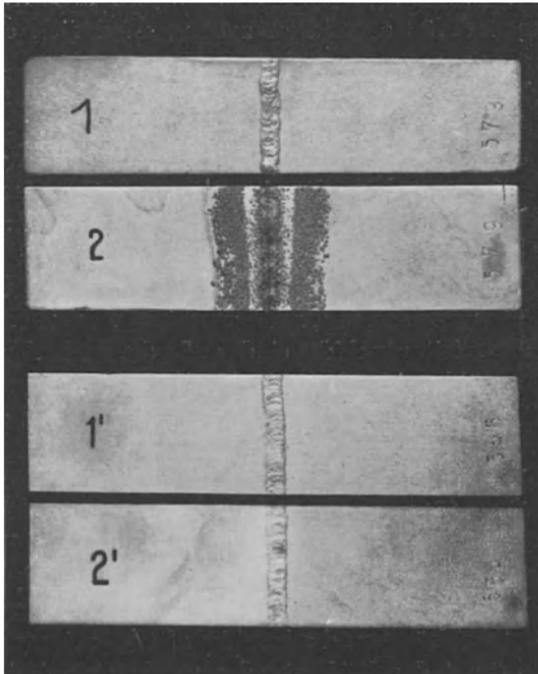


Abb. 31. Geschweißte Chrom-Nickelstähle, nicht abgeschreckt.

Teilbild 1 und 2: Stahl mit 18% Cr und 8% Ni vor und nach der Einwirkung einer Lösung von Kupfersulfat + 10% Schwefelsäure; Teilbild 1' und 2': „Schweißfeste“ Parallelqualität vor und nach der Einwirkung der gleichen Säurelösung.

— höchstens mit einem geringen Kupferzusatz — weit rostbeständiger als die gewöhnlichen Stähle. Den korrosionsbeständigen Stählen stehen sie allerdings weit nach.

Die „schweißfesten“ Stähle haben leider auch Nachteile: Vor allem eignen sie sich weniger für Hochglanzpolitur. Auch ist ihre Tiefziehfähigkeit geringer.

Der bekannteste und am häufigsten verwendete korrosionsbeständige Chrom-Nickelstahl ist wohl der Stahl mit 18% Chrom,

8% Nickel und 0,10% Kohlenstoff, sowie die schweißste Gegenqualität hierzu mit dem entsprechenden Legierungszusatz für die Abbindung des Kohlenstoffes. Zahlreich sind die Verwendungsmöglichkeiten im Haushalt, in der chemischen Industrie (Ausnahme: Salpetersäure-Industrie), in Molkerei- und Brauereibetrieben und immer häufiger auch in der Architektur.

Eine ansehnliche Steigerung der Beständigkeit erfahren die beiden genannten Parallelqualitäten durch Zusatz von etwa 2% Molybdän. Als Anwendungsgebiete für die so verbesserten Stähle seien Färbereien und Bleichereien sowie die Sprengstoff- und die Zellstoff-Industrie angeführt.

Werden außer den 2% Molybdän auch noch etwa 2% Kupfer zulegiert, dann erhält man Stähle, die hoch gesteigerter Beanspruchung gewachsen sind, wie sie z. B. in Beizereien und auch in Färbereien auftritt.

Für Tiefziehzwecke eignet sich sehr gut ein Stahl mit etwa 12% Chrom, 12% Nickel und 0,10% Kohlenstoff. Seine Säurebeständigkeit ist allerdings etwas geringer, und er wird hauptsächlich als rostsicherer Stahl verwendet.

Zu erwähnen wäre noch, daß die korrosionsbeständigen Chrom-Nickelstähle als austenitische Stähle unmagnetisch sowie ferner nicht härtbar sind. Für Messer sind sie daher nicht zu gebrauchen.

Da Mangan, wie wir wissen, auf den Stahl eine ähnliche Wirkung ausübt wie Nickel, ergab es sich von selbst, korrosionsbeständige Stähle zu schaffen, bei denen das Nickel durch Mangan ersetzt ist. Bei den Chrom-Manganstählen wurden die Legierungsgehalte ähnlich angesetzt wie bei den Chrom-Nickelstählen, also z. B. mit etwa 18 bis 20% Chrom, 8% Mangan und 0,10% Kohlenstoff. Man erzeugt aber auch Stähle im umgekehrten Legierungsverhältnis, also mit etwa 18% Mangan und 9% Chrom. Die Chrom-Manganstähle sind in vielen Fällen ein vollwertiger Ersatz für die Chrom-Nickelstähle. Sie sind auch schweißbar. Manchmal wird allerdings die etwas schwerere Verarbeitbarkeit empfunden. In Deutschland haben die Chrom-Manganstähle jedenfalls eine Zukunft.

Schließlich wären noch die korrosionsbeständigen Siliziumstähle zu erwähnen. Ihre Wirkung beruht darauf, daß sich auf der Oberfläche der mit Silizium legierten Qualitäten bei einem chemischen Angriff eine dünne Schutzschicht aus Kieselsäure

ausbildet — ein ganz ähnlicher Vorgang also, wie er bei den chromhaltigen Stählen in Form des Chromoxydfilms auftritt. Es handelt sich dabei in der Hauptsache um Siliziumgehalte von etwa 12 bis 15%. Diese Legierungen sind jedoch nicht schmiedbar.

Wir haben uns bis jetzt nur mit der Korrosion bei Raumtemperatur beschäftigt. Ähnliche Verhältnisse liegen aber auch bei höheren Temperaturen von etwa 600 bis 1300° vor, nur daß die Oxydation hierbei rascher fortschreitet. Es werden sich daher die bisher besprochenen rost- und säurebeständigen Stähle in gewissem Ausmaße auch als hitzebeständig erweisen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß diese — wie man sie auch nennt — „feuerfesten“ Sonderstähle nicht nur zunderfest, d. h. korrosionsbeständig zu sein brauchen, sondern überdies eine große Warmfestigkeit und auch einen genügenden Verschleißwiderstand besitzen müssen, wenn sie wirklich als hitzebeständige Stähle brauchbar sein sollen.

Unlegierter Stahl wird bei höheren Temperaturen durch Verzunderung (Oxydation) rasch zerstört. Diese Zerstörung schreitet bei solchen Stählen aus dem Grunde so schnell fort, weil der sich bildende Zunder immer sofort abspringt und die Stahloberfläche daher dauernd weiteren Angriffen schutzlos ausgesetzt ist. Soll ein Stahl hitzebeständig sein, dann muß der erste Zunder, der nun einmal nicht zu vermeiden ist, erhalten bleiben und als schützende Decke fest an der Oberfläche haften. Diese Wirkung wird wieder in erster Linie durch Chromzusatz erzielt. Es bildet sich auch bei hohen Temperaturen eine feste Schichte von Chromoxyden, die das darunterliegende Material vor weiterer Korrosion bewahrt.

Die Wirkung des Chroms in den hitzebeständigen Stählen verstärkt man häufig durch Zugabe von Silizium.

Die Verwendung der Chrom- und Chrom-Siliziumstähle als hitzebeständige Stähle ist wegen ihrer Neigung zu Grobkornbildung ziemlich eingeschränkt. Auch genügt bei höheren Anforderungen ihre Warmfestigkeit nicht.

Der Wert des Aluminiums für die Erzielung von Zunderbeständigkeit wurde schon im Abschnitt 20 erwähnt. Wie dort ausgeführt, wird durch dieses Metall ebenfalls eine schützende Oberflächendecke gebildet, die aber meistens künstlich durch das besprochene „Alitieren“ erzielt wird.

Die Sicromalstähle haben Chromgehalte von 6 bis 20%, Siliziumgehalte von 1 bis 3% und Aluminiumgehalte von 1 bis 5%. Bei hohen Temperaturen werden auch sie spröde.

Rapatz gibt in seinem schon zitierten Buch „Die Edelmstähle“ folgende Übersicht über die gebräuchlichsten hitzebeständigen Stähle:

Stahl Nr.	Chemische Zusammensetzung in Proz.					Anwendbar bei Temperaturen bis zu
	C	Si	Cr	Ni	Al	
1	0,10	0,5	6	—	1	750°
2	0,15	1,0	14	—	—	800°
3	0,10	1,0	15	—	—	850°
4	0,10	1,0	19	—	—	850°
5	0,45	3,0	10	—	—	900°
6	0,4	1,0	22	—	—	1000° als Guß 900° als Stabst.
7	0,6	1,5	30	—	—	1200° als Guß 1100° als Stabst.
8	0,35	1,0	22	20	—	1150°

Die Beurteilung, welcher rost-, säure- oder hitzebeständige Stahl für einen bestimmten Fall am besten geeignet ist, hängt oft von vielen Begleitumständen ab. Man wird daher immer am besten fahren, wenn man vor Verwendung solcher Stähle den Rat eines erfahrenen Edelmstahlwerkes einholt.

26. Die Schnellarbeitsstähle.

Was die Erfindung der Schnellarbeitsstähle für die Entwicklung von Industrie und Technik bedeutet, davon macht sich der Nichttechniker meistens nicht einmal annähernd eine Vorstellung. Wollte man heute die Schnellarbeitsstähle aus unseren Fabriken nehmen, so würden damit gleichzeitig alle unsere modernen und hochleistungsfähigen Dreh- und Bohrmaschinen überflüssig werden, ja ganze Industriezweige zum Erlahmen kommen — der Stand der Technik würde um Jahrzehnte zurückgeschraubt.

Die Eigenart des Schnellarbeitsstahles wird schon durch seinen Namen angedeutet: man kann mit diesem Stahl schneller als mit anderen Werkzeugstählen arbeiten, d. h. drehen, bohren, fräsen. Diese Möglichkeit ergibt sich nicht so sehr aus der größeren Härte des Schnellstahles. Ein gut gehärteter Kohlenstoffstahl mit

höherem Kohlenstoffgehalt steht bei Raumtemperatur einem gehärteten Schnellstahl in der Härte keinesfalls nach. Der große Unterschied liegt darin, daß der gehärtete Kohlenstoffstahl beim Erwärmen (Anlassen) schon bei etwa 250° weich wird und damit seine Schneidfähigkeit verliert, während der Schnellarbeitsstahl nach richtiger Wärmebehandlung bis nahezu 700° seine volle Härte und Schneidkraft behält. Diese Eigenschaften werden durch das Anlassen sogar noch gesteigert. Das hervorstechende Merkmal des Schnellarbeitsstahles ist somit seine außergewöhnlich hohe Anlaßbeständigkeit.

Die hohe Anlaßbeständigkeit, die den Schnellarbeitsstahl über alle anderen Stähle heraushebt, ist aber gerade für die Dreh- und Bohrarbeit von besonderer Bedeutung. Beim Zerspanen von Metallen und anderen harten Stoffen in kaltem Zustande tritt infolge der Reibung eine oft beträchtliche Erwärmung des Werkzeuges auf, wodurch die Schneiden schnell weich, stumpf und unbrauchbar werden. Die Höhe der Erwärmung hängt vorwiegend von der sog. Schnittgeschwindigkeit ab. Je schneller gedreht oder gebohrt wird, desto schneller werden die Schneiden weich und stumpf. Vor der Erfindung der Schnelldrehstähle mußte man darauf bedacht sein, das Drehmesser nicht zu warm werden zu lassen; man mußte langsam schneiden und durfte nur ganz dünne Schichten von dem zu bearbeitenden Werkstück abtragen, mit anderen Worten: man mußte die Schnittgeschwindigkeit und die Spantiefe möglichst gering halten. Das war ein recht zeitraubendes und unwirtschaftliches Arbeiten.

Mit der Erfindung der Schnellarbeitsstähle wurde das anders. Jetzt konnten die großen, leistungsfähigen Maschinen gebaut werden, die auch das letzte aus dem neuen Stahl herausholten. Bei dem modernen Arbeitstempo nimmt der Meißel oft eine ganz bedeutende Eigenwärme an, die sich bis zur Dunkelrotgluthitze steigern kann, aber trotzdem „steht“ er, d. h. die Schneide bleibt hart und scharf.

Die hohe Anlaßbeständigkeit der Schnellarbeitsstähle wird durch entsprechendes Legieren mit geeigneten Grundstoffen erzielt. Alle Schnellstähle sind hoch und mehrfach legierte Stähle mit ledeburitischem Gefüge.

Der Kohlenstoffgehalt bewegt sich bei diesen Stählen im allgemeinen zwischen 0,65 und 0,90%.

Das wichtigste Legierungselement ist für den Schnellstahl zweifellos das Wolfram. Es ist in Verbindung mit Chrom der eigentliche Träger der Rotgluthärte und macht den Stahl erst zum Schnellstahl. Wenigstens 12% dieses Grundstoffes sind dazu notwendig; gute Schnellarbeitsstähle haben aber meist einen weit aus höheren Gehalt — etwa 18 bis 20%. Das Wolfram bildet im Stahl verschiedene Verbindungen, von denen die wichtigste ein hartes Doppelkarbid ist, dessen Härte fast an jene des Diamanten heranreicht.

Chrom wird den Schnellstählen im Ausmaße von etwa 4 bis 5% beigegeben. Es unterstützt das Wolfram in seinem Einfluß und erhöht wesentlich die Härte und Schnittleistung. Auch verfeinert es, ähnlich dem Wolfram, das Gefüge des Stahles.

Molybdän übt im Schnellarbeitsstahl eine ähnliche Wirkung wie Wolfram und Chrom aus. Man hat daher im Weltkrieg als Ersatz für die mit Wolfram legierten Stähle Molybdänschnellarbeitsstähle hergestellt, die den Wolframstählen in der Leistung kaum nachstanden. Die Molybdänstähle sind aber schwieriger zu schmieden, sie werden leicht überhitzt und sind somit sehr empfindlich bei der Wärmebehandlung. Man ist daher nach dem Kriege von den Molybdänstählen wieder abgekommen. Ganz verzichtet man im Schnellstahl aber auch heute nicht auf dieses Element, weil es die Härte und die Schnittleistung erhöht. Üblich sind jetzt Molybdänzusätze von 0,5 bis 2,0%.

Vanadin wird den Schnelldrehstählen in Mengen von etwa 0,50 bis 4,0% beigegeben. Es steigert ganz wesentlich die Leistungen. Zu berücksichtigen ist jedoch, daß Vanadin fast ausschließlich an den Kohlenstoff gebunden wird, weshalb es notwendig ist, mit steigendem Vanadiningehalt auch den Kohlenstoffgehalt zu erhöhen. Das hat in neuerer Zeit zu der Herstellung von Schnellarbeitsstählen mit Legierungen von etwa 1,2% Kohlenstoff und über 3% Vanadin geführt.

Eine ganz außerordentliche Steigerung der Leistungen des Schnellstahles hat man durch Zusatz von Kobalt erzielt. Nach Oertel und Grützner (Die Schnelldrehstähle, Verlag Stahleisen 1931) steigt die Leistung eines 18proz. Wolframstahles bei einem Kobaltzusatz von 5% um 100%, bei einem Zusatz von 10% Co um etwa 200% und bei einem Zusatz von 15% um etwa 400% gegenüber einem kobaltfreiem Stahl, verglichen bei der Bearbei-

tung von Chrom-Nickel-Baustahl mit 85 kg/mm^2 Festigkeit. Mit kobaltlegierten Schnellstählen kann man sogar Manganhartstahl bearbeiten, was mit anderen Stählen nicht möglich ist. Je höher der Kobaltgehalt steigt, desto spröder wird der Stahl. Dieser Wirkung arbeitet jedoch Vanadin entgegen. Man wird daher in den Kobaltschnelldrehstählen immer einen entsprechenden Vanadinzusatz finden. Wichtig ist, daß Kobalt den Härtebereich erweitert (d. h. die Härtung durch weniger eng gezogene Hitzegrenzen erleichtert) und die Härtetemperatur erniedrigt.

Die Leistung der Schnelldrehstähle hängt jedoch nicht allein von der Legierung ab, auch die richtige Wärmebehandlung spielt eine große Rolle. In der Härtung unterscheiden sich die Schnellstähle auffallend dadurch von anderen Stählen, daß sie aus wesentlich höheren Temperaturen gehärtet werden müssen.

Wie uns vom Eisen-Kohlenstoff-Diagramm her bekannt ist, weisen die ledeburitischen Kohlenstoffstähle drei Arten von Karbid auf: das Plattenkarbid innerhalb der einzelnen Perlitkristalle, ferner das Schalenkarbid, das die Perlitkristalle umschließt, und schließlich die eingestreuten ledeburitischen Karbidkörner. Das Plattenkarbid löst sich beim Perlitpunkt auf, das Schalenkarbid bei den höheren Temperaturen im Bereich bis zu den Grenzlinien $S-E$ und $E-C$ im Diagramm. Das Ledeburitkarbid dagegen kann im Stahl im festen Zustande überhaupt nicht gelöst werden — es geht erst im flüssigen Stahl, d. h. in der Schmelze auf. Diese Zustände und Veränderungen sind im großen und ganzen auf die Schnellarbeitsstähle übertragbar, wenngleich bei diesen infolge der Anwesenheit größerer Mengen von Legierungselementen die Verhältnisse doch anders liegen und vor allem andere Karbide auftreten, die viel schwerer löslich sind als die reinen Eisenkarbide.

Um die größtmögliche Härte und Anlaßbeständigkeit zu erreichen, ist es notwendig, den Schnelldrehstahl für das Härten auf so hohe Temperaturen zu erwärmen, daß die unterledeburitischen Sonderkarbide alle in Lösung gehen. Dazu braucht man Temperaturen von 1250 bis 1300° , die von der Schmelztemperatur nicht mehr weit entfernt sind. Um die für die verschiedenen Qualitäten vorgeschriebenen Härtetemperaturen genau einhalten zu können, verläßt man sich beim Härten der Schnellstähle nicht

auf bloße Schätzung auf Grund der Glühfarbe, wie dies bei anderen Stählen vielfach ausreicht, sondern man bedient sich genau registrierender Meßwerkzeuge.

Im derart gehärteten Zustande ist das Gefüge des Schnellstahles nicht so gleichartig wie etwa bei mittelharten Kohlenstoffstählen. Neben der martensitischen Grundmasse, der Trägerin der Spannungshärte, ist auch ein austenitischer Anteil festzustellen, der die Umwandlung nicht mitgemacht hat, sondern in beständiger Form erhalten geblieben ist. Darüber hinaus sind noch die ledeburitischen Körner vorhanden, die selbst bei der hohen Härtungstemperatur nicht in Lösung gekommen waren und die jetzt in der Meißelschneide wie aufgesetzte Schneidzähne wirken.

Wird der richtig gehärtete Schnelldrehstahl auf 550 bis 600° angelassen, so wird er, wie schon erwähnt, nicht weich, es tritt im Gegenteil eine weitere Steigerung der Härte ein. Das ist auf zweierlei Umstände zurückzuführen: Einerseits treten Ausscheidungsvorgänge auf, mit denen, wie wir wissen, immer eine Härtezunahme verbunden ist; andererseits zerfällt der oben erwähnte, beim Härten zurückgebliebene Restaustenit und wandelt sich in Martensit um. Einen ähnlichen Vorgang haben wir bei der Besprechung des Mangan-Hartstahles im Abschnitt 10 kennengelernt. Durch dieses härtesteigernde Anlassen erhöht sich die Härte des Schnellstahles noch um etwa 50 bis 80 Brinelleinheiten, aber nur dann, wenn die

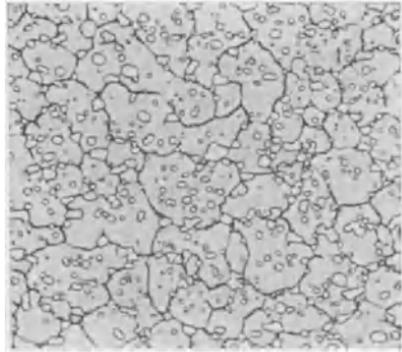


Abb. 32. Richtiges Härtegefüge eines Schnellarbeitsstahles bei etwa 1300° Härtetemperatur.



Abb. 33. Gefüge eines richtig gehärteten und auf etwa 600° angelassenen Schnellarbeitsstahles.

vorangegangene Härtung bei den angegebenen hohen Temperaturen durchgeführt wurde. War die Härtetemperatur niedriger, dann läßt auch die härtesteigernde Wirkung des Anlassens nach, wie aus Abb. 34 ersichtlich ist.

Das Härten des Schnellstahles stellt eines der schwierigsten Kapitel in der ganzen Wärmebehandlung der Edelmetalle dar, und

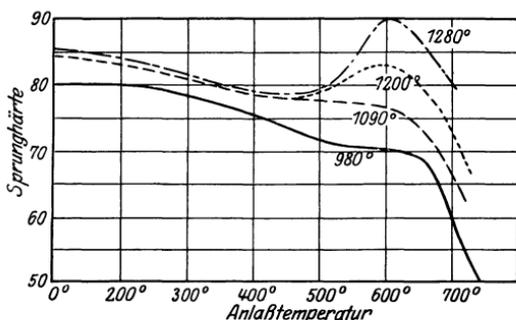


Abb. 34. Härteverlauf von gehärtetem Schnellstahl beim Anlassen.

es ist nicht möglich, im Rahmen dieses Buches darauf näher einzugehen¹.

Wegen des hohen Preises der Schnelldrehstähle werden die Werkzeuge vielfach aus billigem Siemens-Martinstahl angefertigt, und auf diese „Halter“ wird dann die arbeitende Schneide aus Schnellstahl in Form eines Plättchens aufgelegt (aufgelötet oder aufgeschweißt).

27. Die Schneidmetalle.

Die unter vorstehendem Sammelnamen zusammengefaßten Legierungen sind keine Stähle mehr. Ihre Besprechung fügt sich aber doch gut in den Rahmen dieses Buches, da sie sozusagen eine Fortsetzung der Schnellarbeitsstähle darstellen, deren höchstlegierte Arten sie in ihren Leistungen noch überbieten.

Grundsätzlich sind zwei Hauptgruppen von Schneidmetallen zu unterscheiden:

- a) die Stellite,
- b) die Hartmetalle (Karbidschneidmetalle).

¹ Wer sich darüber unterrichten will, dem stehen eine Reihe guter Spezialwerke zur Verfügung. Vor allem sei in dem Zusammenhange auf das Buch „Das Härten des Stahles“ von Rapatz-Reiser, Leipzig 1932, hingewiesen.

Bei den ersteren handelt es sich um Legierungen des Kobalts mit Chrom, Wolfram und ähnlichen Elementen; die Hartmetalle dagegen bestehen in der Hauptsache aus Karbiden einiger besonders geeigneter Grundstoffe, wie z. B. des Wolframs, des Titans, des Tantals oder des Molybdäns.

a) Die **Stellite** sind aus Amerika zu uns gekommen und haben von dort auch ihren Sammelnamen mitgebracht. Als deutsche Erzeugnisse haben sie bei den verschiedenen Herstellerfirmen besondere Markenbezeichnungen erhalten, wie Celsit (Böhler), Pericit (Krupp), Akrit (Deutsche Edelstahlwerke).

Die Stellite sind gegossene Legierungen, die etwa zur Hälfte aus Kobalt bestehen, während sich die andere Hälfte aus verschiedenen Elementen — Chrom, Molybdän, Tantal u. a. — zusammensetzt. Auch Kohlenstoff ist meistens mit etwa 1,5 bis 3,0% vertreten.

Die Stellite lassen sich nicht schmieden, sie müssen gleich in die endgültige Form gegossen werden. Wegen ihres Gußgefüges sind sie sehr spröde. Sie werden daher nicht als Vollmesser verwendet, sondern auf Halterstähle in Plättchenform aufgelötet.

Aber nicht nur für Dreh- und Hobelzwecke lassen sich die Stellite gebrauchen; man kann sie auch z. B. auf Erdbohrmeißel mittels Schmelzschweißung auftropfen. Ferner eignen sie sich wegen ihres besonderen Abnutzungswiderstandes zum Panzern von Verschleißteilen. In Verbindung mit ihrem Verschleißwiderstand wird auch ihre ausgezeichnete Warmhärte ausgenützt bei Maschinenteilen, die hoher Erwärmung ausgesetzt sind (Ventilsitze!).

Alle Stellite sind naturhart und bedürfen keiner Wärmebehandlung.

Erwähnenswert ist vielleicht noch, daß die Stellite auch korrosionsbeständig sind.

b) Die **Hartmetalle** werden in zwei Ausführungen hergestellt, als Guß- sowie als Sintermetalle.

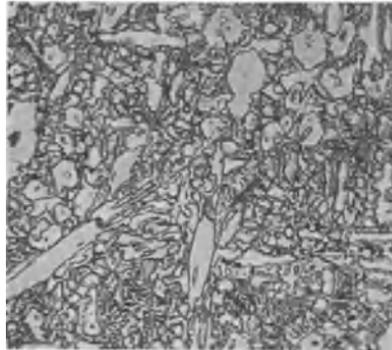


Abb. 35. Gegossene Stellit-Hartlegierung.

Die gegossenen Hartmetalle haben wegen ihrer besonderen Sprödigkeit nur eine beschränkte Verwendung gefunden, etwa als Drahtziehwerkzeuge u. dgl., aber nicht für Werkzeuge zu spanabhebender Bearbeitung.

Für die gesinterten Hartmetalle dagegen ergeben sich vielseitige Anwendungsmöglichkeiten. Das Herstellungsverfahren, das „Sintern“, besteht im wesentlichen darin, daß man das betreffende Karbid, das den Hauptbestandteil des Hartmetalles bilden soll, durch Feinmahlen auf geeignete Korngröße bringt und das so erhaltene Pulver mittels eines zähen Hilfsmetalle,

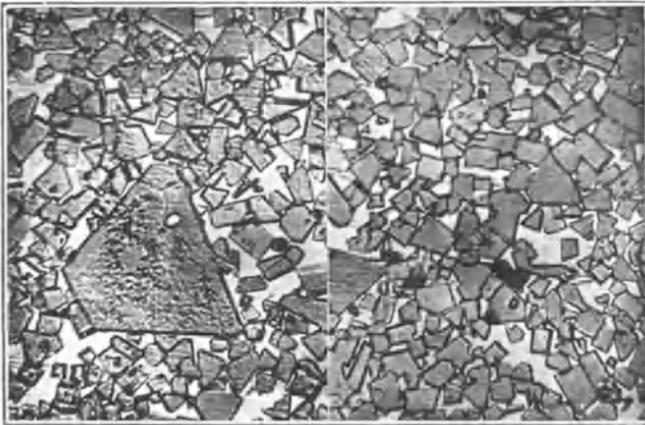


Abb. 36. Gefüge eines gesinterten Karbidschneidmetalles.

z. B. Kobalt oder Nickel, bei bestimmten hohen Temperaturen durch Erhitzen unter Luftabschluß zusammenbacken läßt und solcherart verkittet. Danach wird die Masse auch schon in die endgültige Form gepreßt.

Ebenso wie die Stellite werden auch die Hartmetalle als Schneidplättchen auf Halterstähle aufgelötet und ohne jede Wärmebehandlung in Gebrauch genommen.

Mit den Sintermetallen kann man bei kleinen Abweichungen in der Zusammensetzung die verschiedenartigsten Stoffe bearbeiten, wie z. B. Stahl, Mangan-Hartstahl, Grauguß, Hartguß, Leichtmetalle, Kunstharze, Hartgummi, keramische Stoffe, ja sogar Glas. Dabei kann mit größter Schnittgeschwindigkeit gearbeitet werden.

Die gesinterten Hartmetalle haben in den letzten Jahren — trotz des wesentlich höheren Preises — wegen ihrer besonderen Wirtschaftlichkeit eine außerordentlich große und rasche Verbreitung gefunden. Sie erfordern nur eine besondere Sorgfalt beim Schleifen, wofür Spezienschleifmaschinen verwendet werden müssen.

28. Prüfung der Stähle.

Obwohl der Edelstahl auf dem ganzen Herstellungsgang nach jedem Erzeugungsabschnitt bereits einer strengen Teilprüfung unterworfen worden ist, muß er vor der Ablieferung noch eine Gesamtprüfung über sich ergehen lassen. Es wird dabei festgestellt, ob er wirklich die Eigenschaften besitzt, die seine künftige Verwendung verlangt; ferner wird nochmals untersucht, ob sich nicht Fehler eingeschlichen haben, die sich im Gebrauch ungünstig auswirken könnten.

Bei der chemischen Prüfung wird festgestellt, ob die vorgeschriebene Zusammensetzung eingehalten worden ist und ob die nun einmal nicht ganz zu vermeidenden Verunreinigungen durch Schwefel, Phosphor usw. innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Die Zusammensetzung allein ist für die Güte des Stahles allerdings nicht ausschlaggebend. Jeder Verbraucher weiß, daß sich Stähle verschiedener Herkunft trotz praktisch gleicher Zusammensetzung recht verschieden verhalten können.

Nach der chemischen Prüfung werden Bruch- und Härteproben gemacht.

Hieran wird sich eine genaue Prüfung des Gefüges anschließen. Dazu werden kleine Probestücke aus dem Stahl herausgeschnitten, geschliffen, poliert und geätzt. Bei der nachfolgenden Untersuchung unter dem Mikroskop wird die Korngröße (Grobkörnigkeit) beurteilt, und es lassen sich auch Fehler, wie Seigerungen, Aufkohlung oder Entkohlung des Randes, Lunker, Risse und Blasen, genau erkennen.

Eine *Seigerung* liegt vor, wenn sich beim Erstarren des Stahles aus der Schmelze einzelne Bestandteile, vor allem Schwefel und Phosphor, aber auch Mangan und Kohlenstoff ungleichmäßig ausgeschieden und verteilt haben, wozu noch Schlackeneinschlüsse kommen können. Als *Lunker* bezeichnet man Hohlräume, die sich ebenfalls beim Erstarren durch das Schrumpfen des Stahles

in seinem Innern bilden. Durch geeignete Maßnahmen beim Gießen können die Lunker nach oben in den sog. „verlorenen Kopf“ verlegt werden, der vor dem Auswalzen des Blockes entfernt wird. Sind Lunker im Block zurückgeblieben, dann werden sie durch das Walzen und Schmieden gestreckt und machen den Stahl unbrauchbar. Treten diese Fehler nicht schon während der Bearbeitung zutage, dann machen sie sich längstens beim Härten unangenehm bemerkbar — die damit behafteten Stücke reißen. *Blasen* sind ähnliche Hohlräume, die aber durch Gase verursacht werden, die im flüssigen Stahl gelöst sind oder sich in der Schmelze neu bilden.

Werden schlackenhaltige Blöcke ausgewalzt, dann strecken sich die Schlackenteile mit und bilden im Stahl ein zeilenartiges Gefüge. Solcher Stahl ist in der Querrichtung nicht so zäh wie in der Längsrichtung und daher wenigerwertig. Ausnahmsweise kann Faserbildung aber auch erwünscht sein, wie z. B. im Federstahl, wo die Faserstruktur die Bruchgefahr der Feder vermindert.

In dem Zusammenhange sollen noch kurz einige Eigenschaften des Stahles besprochen werden, die der Fachmann mit Rot-, Schwarz-, Blaubrüchigkeit bezeichnet. Ein Stahl ist rotbrüchig, wenn er beim Schmieden oder Walzen in der Rotgluthitze, d. h. in dem Hitzebereich zwischen 700 und 900°, leicht reißt. Dabei treten hauptsächlich Querrisse auf. Verantwortlich dürfte für diese Erscheinung die Anwesenheit von Schwefel, Sauerstoff oder Arsen zu machen sein. Von Schwarzbruch spricht man, wenn in kohlenstoffreicheren Stählen die Bruchfläche teilweise ein mattschwärzliches, schuppig „marmoriertes“ Aussehen hat. An diesen Stellen nimmt der Stahl keine Härte an. Die Ursache dafür ist, daß sich in diesem Stahl der Kohlenstoff nicht als Karbid abgeschieden hat, sondern in ungebundener Form, d. h. als reiner Kohlenstoff. Diese Erscheinung tritt besonders dann auf, wenn höhergekohlter Stahl zu langsam abgekühlt wird. Die Blaubrüchigkeit ist eine gesteigerte Verminderung der Zähigkeit zwischen 300 und 500°. In diesem Temperaturbereich besitzt jeder Stahl sein Höchstmaß an Sprödigkeit, weshalb hierbei jede Formveränderung durch Schmieden, Biegen, Bördeln usw. nach Möglichkeit vermieden werden soll, weil sonst leicht Brüche auftreten. Dabei laufen die Bruchflächen blau an, woher die Erscheinung den Namen hat.

Bei der Endprüfung wird aber, wie schon erwähnt, nicht nur nach Fehlern gesucht, es werden vielmehr auch die geforderten Eigenschaften des Stahles genau gemessen. In der Hauptsache handelt es sich dabei um die Festigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Einschnürung und Kerbzähigkeit bei den Baustählen, sowie um die Härte bei den Werkzeugstählen.

Eine Reihe von physikalischen Werten erhält man durch den Zugversuch (Zerreißprobe). Aus dem zu prüfenden Stahl wird eine Probe herausgeschnitten und daraus der „Zerreißstab“ angefertigt (Abb. 37). Der mittlere Teil des Stabes, in dem er bei der Prüfung reißt, hat einen Durchmesser (d) von 20 mm; die Meßlänge beträgt den zehnfachen Durchmesser ($l = 10d = 200$ mm) oder auch nur den fnfachen ($l = 5d = 100$ mm). Über die vorgesehene Meßlänge hinaus nimmt die Stärke des Probestabes gegen die Enden hin zu. Man erreicht dadurch, daß der Stab auch wirklich innerhalb der schwächeren Meßlänge reißt. Der Zerreißstab wird in die „Zerreißmaschine“ eingespannt und langsam belastet. Die Zunahme der Belastung kann man an dem eingeschalteten Manometer verfolgen, das dann beim Reien des Stahles stehenbleibt.

Die *Elastizitätsgrenze* ist jene höchste Belastung, bei welcher der Stab nach der Entspannung wieder seine ursprüngliche Form annimmt. Zur Bestimmung dieses Wertes wird der Stab so oft einer fortschreitend höheren Belastung ausgesetzt und nachfolgend wieder entspannt, bis eine bleibende Dehnung festzustellen ist.

Die *Proportionalitätsgrenze* ist jene Belastungsgrenze, bei welcher die Dehnung nicht mehr im gleichen Verhältnis zur Belastung zunimmt.

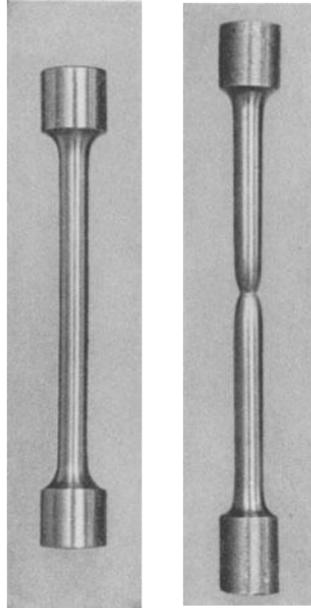


Abb. 37 a.

Abb. 37 b.

Abb. 37 a u. b. Zerreißstab vor und nach dem Zerreiversuch.

Die *Fließ-* oder *Streckgrenze* ist die Belastung, bei welcher die Dehnung des Stabes erheblich zunimmt, ohne daß weiter belastet wird. Nach Überschreiten der Streckgrenze tritt eine dauernde Verformung (Fließen) des Werkstoffes bis zum Bruch ein.

Bei weiterer Belastung reißt der Prüfstab schließlich. Das Manometer zeigt dann die *Zerreiß-* oder *Bruchfestigkeit* des Stabes an.

Die *Dehnung* des Stabes gibt an, in welchem Ausmaße (um wieviel Prozente) die ursprüngliche Meßlänge bis zum Zerreißen des Stabes zugenommen hat.

Beim Belastungsvorgang dehnt sich der Zerreißstab nicht gleichmäßig über die ganze Länge aus (Ausnahme: Mangan-Hartstahl). Es tritt vielmehr mit zunehmender Belastung kurz vor dem Bruch an einer Stelle eine stärkere Querschnittsabnahme ein, wo dann der Stab auch reißt. Das Verhältnis zwischen dem ursprünglichen Stabquerschnitt und dem verminderten Querschnitt an der Bruchstelle bezeichnet man als die *Einschnürung* oder *Kontraktion*. Der Wert wird ebenfalls in Prozenten ausgedrückt.

Die *Kerbzähigkeit* ist die in Meterkilogramm angegebene Schlagarbeit, die einen eingekerbten Flachstab, der bei der Prüfung nur an den Enden aufliegt, durchzuschlagen vermag, bezogen auf einen Querschnitt von 1 cm^2 .

Ein Bau- oder Maschinenstahl kann bei wechselnder Beanspruchung nach längerer Betriebsdauer brechen, auch wenn die höchste Beanspruchung weit unter der Zerreißfestigkeit liegt. Man spricht dann von einer Ermüdung des Stabes. Es bilden sich dabei zuerst feine Querrisse, die von der Oberfläche ausgehen, sich nach und nach vergrößern und schließlich zum Dauerbruch führen. Mit *Dauerfestigkeit* wird jene größte Beanspruchung bezeichnet, die der Stahl bei dauerndem Belastungswechsel erträgt, ohne zu brechen.

Als *Härte* kann man den Widerstand angeben, den ein Körper einem von außen eindringenden zweiten Körper, etwa der Spitze eines Diamanten u. dgl., entgegensetzt. Bei Stahl kann man zur Messung dieses Wertes die Brinellpresse oder den Rockwell-Härteprüfer verwenden. In der Brinellpresse wird eine harte Stahlkugel in den zu prüfenden Gegenstand gepreßt. Je größer bei einem ganz genau festgelegten Druck der Kugeleindruck ausfällt,

desto weicher ist der Stahl. Der Durchmesser des Eindruckes wird mittels eines kleinen Mikroskopes ermittelt und mit einer zugehörigen Tabelle verglichen, die für jeden möglichen Eindruck die Brinellzahl angibt. Da der Widerstand gegen das Eindringen der Brinellkugel auf die gleiche Ursache zurückzuführen ist wie der Widerstand gegen das Zerreißen auf der Zerreißmaschine, wird man auch auf ein bestimmtes Verhältnis zwischen Zerreißfestigkeit und Brinellhärte schließen dürfen. Ein solches Verhältnis ist tatsächlich vorhanden, und zwar beträgt die Zerreißfestigkeit etwa ein Drittel der Brinellzahl. Eine Abart des Brinellversuchs ist die Feststellung der Rockwellhärte. Man bedient sich dabei des Rockwell-Härteprüfers, bei dem eine Diamantspitze (bei hartem Stahl) oder eine kleine hochharte Stahlkugel in den Stahl gepreßt wird. An der mit dem Apparat verbundenen Meßuhr kann man die Rockwell-Härtezahls sofort ablesen. Dieses Prüfverfahren eignet sich besonders für gehärtete Stähle.

Shore geht bei seiner Härteprüfung von anderen Gedankengängen aus. In einer Glasröhre, die mit Teilstrichen versehen ist, läßt er aus einer bestimmten Höhe eine gehärtete Kugel oder ein Hämmerchen auf den zu prüfenden Stahl niederfallen und gibt die Höhe des Rückpralls der Kugel an. Der Apparat heißt *Skleroskop* und man spricht von der *Rückprall-* oder *Skleroskop-härte* des Stahles.

Es sind noch andere Methoden zur Prüfung der physikalischen Eigenschaften des Stahles in Gebrauch, die aber im allgemeinen doch nicht die Bedeutung der oben angegebenen Verfahren gefunden haben.

29. Schlußwort.

Hat der Leser diese kleine „Einführung in die Stahlkunde“ ernsthaft durchgearbeitet, dann darf er wohl von sich behaupten, eine allgemeine Kenntnis des Wesens von „Stahl und Eisen“ zu besitzen. Was ist aber Sinn und Zweck solchen Wissens?

Nun, der geistig regsame Mensch wird sich in unserem technischen Zeitalter schon ohne bestimmte Nebenabsichten eben auch mit technischen Dingen befassen, genau so wie er sich etwa über geschichtliche Fragen oder über die Grundbegriffe der Astronomie unterrichtet, um seiner Zeit gerecht zu werden. Er wird

gern auch eine technisch richtige Vorstellung von „Stahl“ gewinnen wollen.

Dem im Stahlfach tätigen Kaufmann werden darüber hinaus Kenntnisse, wie sie das vorliegende Buch vermitteln will, auch zu einer wertvollen praktischen Hilfe im täglichen Berufsleben werden. Mancher mag allerdings solches Fachwissen überhaupt als überflüssig befinden — vielleicht auch in der Ansicht, daß seine technischen Beurteilungen von einem „zünftigen“ Techniker ja doch niemals für voll genommen würden. Natürlich werden solche Kenntnisse nicht ausreichen, technische Streitfragen mit eingehenden wissenschaftlichen Begründungen zu entscheiden, ein Nutzen ist aber doch unbestreitbar vorhanden. So wird der theoretisch vorgebildete Stahlverkäufer sicherlich manche Anfragen seiner Kunden ohne vorherige — meist schriftliche — Rückfrage bei technischen Stellen erledigen können. Oder ein wirklich notwendiger Schriftwechsel wird auf ein erträgliches Maß beschränkt bleiben. Auch die Arbeit des Technikers kann erleichtert werden, wenn sich der Kaufmann der Schwierigkeiten bewußt ist, die bei der Wahl des richtigen Werkstoffes für einen bestimmten Verwendungszweck manchmal auftreten, oder wenn er in bestimmten Fällen den Besteller schon bei der ersten „unverbindlichen“ Anfrage dazu veranlaßt, alle wichtigen Angaben über die beabsichtigte Verarbeitungsart, Wärmebehandlung usw. zu machen.

Für den rein theoretisch interessierten Laien wird das im Rahmen dieses Buches Gebrachte genügen. Der im Stahlfach arbeitende Kaufmann wird aber vielleicht auf dieser Stufe nicht stehenbleiben wollen. Ihm seien im folgenden einige Winke gegeben.

Zur Vertiefung und Verfestigung des Erworbenen greife der Weiterstrebende zu dem schon mehrmals angeführten Werk von Dr.-Ing. F. Rapatz „Die Edelmehlstähle“ (1934). Es ist zwar nicht für Kaufleute geschrieben, wird aber für jeden lesbar sein, der sich durch das vorliegende Einführungsbuch schon eine Grundlage geschaffen hat.

Eine mehr praktische Unterweisung gibt der gleiche Verfasser in seinem auch bereits genannten Werk „Das Härten des Stahles“ (Rapatz-Reiser, 1932). Es ist hauptsächlich der Wärmebehandlung gewidmet und in erster Linie für die Stahlverbraucher bestimmt.

Als weitere grundlegende Werke seien genannt: Houdremont: Sonderstahlkunde, Berlin: Julius Springer 1935, und Oberhoffer: Das technische Eisen, Berlin: Julius Springer 1936. Beide Werke behandeln den Stoff sehr ausführlich.

Mancher wird ein fachliches Nachschlagswerk besitzen wollen, um bei der Arbeit auftretende Fragen rasch beantworten zu können. Ihm sei das „Werkstoff-Handbuch“ empfohlen, das der Verein deutscher Eisenhüttenleute in Düsseldorf herausgibt. In einer größeren Anzahl kurzer Einzelarbeiten namhafter Verfasser wird das ganze weite Gebiet des Stahles gründlich bearbeitet. Die einzelnen Abhandlungen sind in der Form des Ringbuches lose zusammengefaßt und können leicht durch neue Blätter ersetzt werden, wenn die eine oder andere Darstellung durch den Fortschritt in Wissenschaft und Betrieb überholt ist. Für wenig Geld liefert dann der Verlag „Stahleisen“ die umgearbeiteten Abschnitte nach, so daß das „Handbuch“ immer neuzeitlich bleibt und den letzten Erkenntnissen entspricht.

Auch das Lesen von Fachzeitschriften, vor allem der ausgezeichneten Wochenschrift „Stahl und Eisen“, sollte der im Stahlfach tätige Kaufmann nicht unterlassen. Zwar sind auch die Fachzeitschriften in erster Linie für den Fachmann geschrieben, doch wird auch der Kaufmann aus ihnen manche wertvolle Anregung schöpfen können. Im übrigen ist es ja nicht nötig, wahllos alles zu lesen, was in den Heften gebracht wird. Eine umfangreiche Abhandlung z. B. über Ofenauskleidungen wird dem Stahlverkäufer natürlich kaum etwas sagen.

Mit diesen kurzen Hinweisen verabschiedet sich der Verfasser von seiner Arbeit und ihren Lesern. Er gibt sich der Hoffnung hin, daß das Buch auf die im Titel gestellte Frage „Was ist Stahl?“ dem Nichttechniker in leichtverständlicher Fassung eine befriedigende Antwort gibt und damit seinen Zweck erfüllt.

Namen- und Sachverzeichnis.

- Abkühlungsgeschwindigkeit 32.
Abschrecken 20, 27, 32, 41, 47, 54, 61, 67.
Abszisse 10.
Akrit 79.
Alitieren 60, 72.
Alpha-Eisen 6, 11, 12, 20, 33.
Altern 61.
Aluminium 35, 59, 61, 72.
Ammoniak 61.
Anlassen 23, 31, 74.
—, härtesteigerndes 78.
Anlaßbeständigkeit 52, 54, 74, 76.
Anlaßfarben 24.
Anlaßsprödigkeit 58.
Anlaßtemperaturen 24.
Armco-Eisen 1, 70.
Arsen 82.
Atome 3, 5, 19, 21, 32.
Atomphysik 3.
Aufkohlen 25.
Ausscheidungshärtung (Aushärtung) 20, 29, 54, 58, 60, 61, 62.
Austenit 12, 13, 15.
Austenitgitter 12.
Austenitische Stähle 33, 36.
Austenitkristalle 12, 14, 16.
- Bariumkarbonat als Einsatzmittel 25.
Baustähle 31, 37, 40, 41, 43, 50, 58, 59.
Beryllium 30, 62.
Beta-Eisen 11.
Blasen im Stahl 82.
Blaubruchigkeit 82.
Böhler 79.
Bor 62.
- Brennerhärtung 27.
Brinellhärte 41, 85.
Brinellpresse 29, 42, 84.
Brinellzahl 85.
Bruchfestigkeit 84.
Bruchproben 81.
- Celsit 79.
Chrom 1, 35, 44, 47, 51, 52, 58, 59, 64, 75, 79.
Chrom-Karbid 65.
Chrom-Manganstähle 50, 66, 71.
Chrom-Molybdänstähle 56, 58.
Chrom-Nickelstähle 47, 58, 65, 70.
Chrom-Nickel-Molybdänstähle 58.
Chrom-Oxyd 64, 72.
Chrom-Siliziumstahl 52, 66, 72.
Chromstähle 44, 51, 53, 65, 72.
Chrom-Wolfram-Siliziumstahl 52.
- Dauerbruch 84.
Dauerfestigkeit 58, 84.
Dehnung 36, 41, 51, 52, 53, 58, 59, 60, 83.
Delta-Eisen 6, 12, 33, 65.
Desoxydationsmittel 59, 61, 62.
Desoxydieren 61.
Deutsche Edelmetallwerke 28, 79.
Deutscher Normenausschuß 40, 50.
Doppelduro 28.
Durchhärtung 32, 40, 43, 46, 47, 52.
Durferrit 26.
- Edelstähle (Begriffserklärung) 1.
Einsatzhärtung 25.
Einsatzstähle 38, 48, 50, 56.
Einschnürung 36, 58, 83.
Eisen 1, 6, 10.

- Eisenhüttenleute, Verein deutscher 87.
 Elektrooefen 37, 40.
 Eisenhydroxyd (Rost) 62.
 Eisen-Karbid 2, 7, 8, 12, 17.
 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 9, 16, 26, 34.
 Eisenkristalle 6, 28, 29.
 Eisen-Oxyd 61.
 Elastizitätsgrenze 83.
 Elastizitätsmodul 50.
 Elektrolyse 1.
 Element, galvanisches 63.
 Elinvarstahl 50.
 Entkohlung 22.
 Ermüdung des Stahles 84.
 Eutektoider Stahl 10.
- Faserbildung 82.
 Federstähle 41, 52, 59.
 Ferrit 6, 8.
 Ferritische Stähle 34, 35, 36, 51, 66.
 Ferritisch-perlitische Stähle 35, 47.
 Ferrit-Kristall 8, 10, 14, 16.
 Feste Lösung 13, 23, 30, 32, 33, 52, 54.
 Festigkeit 31, 36, 41, 43, 45, 52, 58, 59, 60, 83.
 Flächenzentriert 5.
 Fließgrenze 84.
- Galvani 63.
 Gamma-Eisen 6, 11, 20.
 Gasblasen 60.
 Gefüge 35.
 —, Prüfung des 81.
 Gesättigte Lösung 29.
 Gewehrlaufstahl 55.
 Gitterspannungen 20.
 Gleitflächen 29, 30.
 Glühen 18, 29, 36.
 Graphit 52, 59.
 Griesogen 27.
 Grobkörniger Stahl 19.
 Grobkornbildung 53, 54, 59, 66, 72.
 Grütznert (Oertel und) 75.
 Guillet 41, 43.
- Härtbarkeit 1, 46.
 —, Verlust der 54, 59.
 Härte 28, 36, 37, 45, 74, 84.
 Härtemaschine 27.
 Härten 19.
 — des Schnellstahls 76.
 Härtenspannungen 23.
 Härtetemperatur 22.
 Haltepunkt 11.
 Hardenit 21.
 Hartmetalle 78.
 Hitzebeständige Stähle 50, 62, 72.
 Hitzebeständigkeit 60, 72.
 Hochbaustahl 60.
 Homogenisieren 19.
 Houdremont 87.
- Interkristalline Korrosion 69.
 Invarstahl 44.
- Kalthärtung 20, 28, 42.
 Karbidschalenwerk 8, 15.
 Karbidschneidmetalle 43.
 Kerbzähigkeit 83.
 Kieselsäure 71.
 Knochenkohle als Einsatzmittel 25.
 Kobalt 35, 53, 75, 79, 80.
 Kobaltstähle 53.
 Körniger Zementit 18.
 Kohlenstoff 1, 6, 9, 30, 31.
 Kohlenstoffstahl 1, 17, 37.
 Kohlenwasserstoff 27.
 Kontraktion 84.
 Kornverfeinerung (s. auch Normalglühen) 26, 36.
 Kornvergrößerung 19, 26, 36.
 Korrosion 62.
 Kritische Abkühlungsgeschwindigkeit 21, 32, 43, 46, 52, 53.
 Krupp 79.
 Kupfer 30, 60, 69, 71.
- Längenbeständigkeit 44, 50.
 Ledeburitstähle 15, 34, 37, 45, 47.
 Lederkohle als Einsatzmittel 25.
 Legierte Stähle 32.
 Leuchtgas 27.

- Liquiduslinie 13.
 Lösungsvermögen 29, 30.
 Lokalelement 63.
 Lufthärter 32, 47.
 Lufthärtung 33.
 Lunker 81.

Magnetische Eigenschaften 47, 52,
 53, 54, 58.
 Magnetismus 11, 52.
 Magnetstahl 47, 55.
 Mangan 35, 37, **40, 44**, 50, 58, 59,
 61, 71.
 Manganfederstahl 52.
 Mangan-Hartstahl 36, **41**, 76, 80, 84.
 Mangan-Siliziumstahl 52.
 Manganstähle 40.
 Martensit 21.
 Martensitische Stähle 33, 35, 41, 43,
 47.
 Martensitpunkt 22.
 Massenstähle 1.
 Materie 3.
 Metallschutz, Reichsausschuß für 62.
 Mischkristall 13.
 Molybdän 30, 35, **55**, 58, 69, 71, 75,
 79.
 Molybdänstähle 55.

 Nickel 1, 35, **43**, 47, 67, 80.
 Nickelstähle 43.
 Niob 62, 69.
 Nitridverbindungen 61.
 Nitrieren 60.
 Nitrierstähle 60.
 Normalglühen (Normalisieren) **18**,
 59.
 Normenausschuß 40, 50.

Oberflächenentkohlung 22.
Oberflächenhärtung 25, 60.
 —, örtliche 27.
 Oberhoffer 87.
 Oertel (und Grützner) 75.
 Ordinaten 11.
 Oxydation 60, 72.
 Oxydfilm 64.
- Percit** 79.
 Perlit 7, 10.
 Perlitische Stähle 35, 41, 43, 53.
 Perlitkristall 7, 14, 23, 34.
 Perlitpunkt **14**, 16, 23, 45, 53.
 Phase 6.
 Phosphor 35, 37, 51.
 Potential, elektrisches 63.
 Potentialdifferenz 63.
 Proportionalitätsgrenze 83.

Rapatz 5, 47, 73, 78, 86.
 Raumgitter 4, 5, 12, 19, 32.
 Raumzentriert 5.
 Reichsausschuß für Metallschutz 62.
 Riffelstähle 55.
 Rockwellhärte 85.
 Rockwell-Härteprüfer 84.
 Röntgenstrahlen 4.
 Rostbeständige Stähle 36, **62**.
 Rostbeständigkeit 60.
 Rosten 62.
 Rotbrüchigkeit 82.
 Rückprallhärte 85.

Säurebeständige Stähle 36, 50, **62**.
 Sauerstoff 2, **61**, 62, 82.
 Schälzementit 8, 10, 15, 23.
 Schlacken 82.
 Schmelzpunkt 6, 13, 34.
 Schneidmetalle 78.
 Schnellarbeitstähle 54, 59, **73**.
 Schnittgeschwindigkeit 74, 80.
 Schwarzbruch 82.
 Schwarzbrüchig 52.
 Schwefel 37, 51, 82.
 „Schweißbar“ 69.
 Schweißfeste säurebeständige
 Chrom-Nickelstähle 69.
 Seigerung 81.
 Shore 85.
 Sicromalstähle 73.
 Siemens-Martinofen 37.
 Siemens-Martinistähle 40.
 Silizium 35, 37, **51**, 59, 72.
 Silizium-Federstahl 52.
 Siliziumstähle 51.

- Siliziumstähle, korrosionsbeständige 71.
- Sintermetalle 79.
- Sintern 80.
- Skleroskop 85.
- Soliduslinie 13.
- Sorbit 21.
- Spannungsfreiglühen 19.
- Spannungsreihe, elektrische 63.
- Stahl (Begriffserklärung) 1.
- Stellite 78.
- Stickstoff 60.
- Streckgrenze 36, 40, 45, 52, 58, 59, 60, 83.
- Stufenhärtung 24.
- Tantal** 35, 62, 69, 79.
- Temperkohle 52.
- Thermalhärtung 24.
- Thomasbirne 37.
- Titan 30, 35, 62, 69, 79.
- Troostit 22.
- Übereutektoide Stähle 10, 15, 23, 35, 45.
- Überhitzter Stahl 19.
- Überhitzung 26, 53, 59.
- Überperlitische Stähle 35, 45.
- Umkristallisation 19, 26.
- Umwandlung 6, 13.
- Umwandlungs-Härtbarkeit, Grenze der 22, 27.
- Umwandlungshärtung 20, 24.
- Untereutektoide Stähle 10, 14, 35, 45.
- Unterperlitische Stähle 35, 45.
- Vanadin** 1, 35 58, 61, 75.
- Vanadinstähle 58.
- Verbindung, chemische 2.
- Vergüten 31.
- Vergütungsstähle 38, 40, 49, 50, 57.
- Verschleiß 42.
- Verschleißhärte 42.
- Verschleißstahl 36, 41.
- Versticken 60.
- Verstückerstähle 60.
- Verunreinigungen im Stahl 37, 81.
- Verzunderung 60, 72.
- Wärmebehandlung 10, 17, 26.
- des Schnellstahles 76.
- Warmarbeitstähle 59.
- Warmbadhärtung 24.
- Warmbeständigkeit 59.
- Warmfestigkeit 72.
- Warmverformung 36, 67.
- Wasser 2.
- Wasserhärter 32.
- Wasserstoff 2, 61, 62.
- Weichglühen 17.
- Werkzeugstähle 2, 37, 41, 46, 50, 55.
- Widerstandsdrähte 44.
- Wolfram 1, 30, 35, 51, 52, 53, 75, 79.
- Wolframkarbid 53.
- Wolframstähle 53.
- Zähigkeit 31, 36, 43, 58, 82.
- Zeilenbildung 82.
- Zementationsmittel 25, 26.
- Zementit 2, 18.
- , körniger 18.
- Zerreißfestigkeit 41.
- Zerreißprobe (Zugversuch) 83.
- Zirkon 62.
- Zunder 72.
- Zunderbeständigkeit 60, 72.
- Zustands-Schaubild 9.
- Zwischenglühung 29.

Rostfreie Stähle. Berechtigte deutsche Bearbeitung der Schrift: „Stainless Iron and Steel“ von **J. H. G. Monypenny**, Sheffield. Von Dr.-Ing. **Rudolf Schäfer**. Mit 122 Textabbildungen. VIII, 342 Seiten. 1928.
Gebunden RM 24.30

Die Einsatzhärtung von Eisen und Stahl. Berechtigte deutsche Bearbeitung der Schrift: „The Case Hardening of Steel“ von **H. Brearley**, Sheffield. Von Dr.-Ing. **Rudolf Schäfer**. Mit 124 Textabbildungen. VIII, 250 Seiten. 1926.
Gebunden RM 17.55

Die Konstruktionsstähle und ihre Wärmebehandlung. Von Dr.-Ing. **Rudolf Schäfer**. Mit 205 Textabbildungen und einer Tafel. VIII, 370 Seiten. 1923.
Gebunden RM 13.50

Die Werkzeugstähle und ihre Wärmebehandlung. Berechtigte deutsche Bearbeitung der Schrift: „The Heat Treatment of Tool Steel“ von **H. Brearley**, Sheffield. Von Dr.-Ing. **Rudolf Schäfer**. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 226 Textabbildungen. X, 324 Seiten. 1922.
Gebunden RM 10.80

Die natürliche und künstliche Alterung des gehärteten Stahles. Physikalische und metallographische Untersuchungen von Dr.-Ing. **Andreas Weber**. Mit 105 Abbildungen im Text und auf 12 Tafeln. IV, 78 Seiten. 1926.
Gebunden RM 8.10

Über die Anlaßvorgänge in abgeschreckten Chrom- und Manganstählen. Von Dr.-Ing. **Hans Goerisch**. (Berichte aus dem Institut für Mechanische Technologie und Materialkunde der Technischen Hochschule zu Berlin, Heft 2.) Mit 27 Textabbildungen. IV, 36 Seiten. 1928. RM 3.24

Lehrbuch der Metallkunde, des Eisens und der Nichteisenmetalle. Von Prof. Dr. phil. **Franz Sauerwald**, Breslau. Mit 399 Textabbildungen. XVI, 462 Seiten. 1929.
Gebunden RM 26.10

Die Werkzeugstähle. Chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Anwendungsgebiete der handelsüblichen Werkzeugstähle. Von Ingenieur-Chemiker **Hugo Herbers**. (Werkstattbücher, Heft 50). Mit zahlreichen Tabellen. 60 Seiten. 1933. RM 2.—

Das Gußeisen. Seine Herstellung, Zusammensetzung, Eigenschaften und Verwendung. Von Oberingenieur **Chr. Gilles**. (Werkstattbücher Heft 19.) Zugleich zweite Auflage des zuerst von Joh. Mehrtens bearbeiteten Heftes. Mit 33 Abbildungen im Text. 48 Seiten. 1936. RM 2.—

Nichteisenmetalle. Von Dr.-Ing. **R. Hinzmann**.

Erster Teil: **Kupfer, Messing, Bronze, Rotguß**. Mit 53 Abbildungen im Text. 56 Seiten. 1931. RM 1.80

Zweiter Teil: **Leichtmetalle**. Mit 34 Abbildungen im Text und 12 Tabellen. 59 Seiten. 1934. RM 2.—

(*Werkstattbücher, Heft 45 und 53*)

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

Hilfsbuch für die praktische Werkstoffabnahme in der Metallindustrie. Von Dr. phil. **E. Damerow** und Dipl.-Ing. **A. Herr**. Mit 38 Abbildungen und 42 Zahlentafeln. IV, 80 Seiten. 1936. RM 9.60

Die praktische Werkstoffabnahme in der Metallindustrie. Von Dr. phil. **Ernst Damerow**, Vorsteher der Werkstoffprüfung der A. Borsig Maschinenbau-A.G. Mit 280 Textabbildungen und 9 Tafeln. VI, 207 Seiten. 1935. RM 16.50; gebunden RM 18.—

Riebensahm-Traeger, Werkstoffprüfung (Metalle). Zweite, erweiterte Auflage von Professor Dr.-Ing. **P. Riebensahm**, Berlin. (Werkstattbücher, H. 34.) Mit 97 Abbildungen im Text. 66 Seiten. 1936. RM 2.—

E. Preuß, Die praktische Nutzenanwendung der Prüfung des Eisens durch Ätzverfahren und mit Hilfe des Mikroskopes. Für Ingenieure, insbesondere Betriebsbeamte. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Bearbeitet von Professor Dr. **G. Berndt**, Dresden, und Professor Dr.-Ing. **M. v. Schwarz**, München. Mit 204 Figuren im Text und auf 1 Tafel. VIII, 198 Seiten. 1927. RM 7.02; gebunden RM 8.28

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

C.J. Smithells, Beimengungen und Verunreinigungen in Metallen. Ihr Einfluß auf Gefüge und Eigenschaften. Erweiterte deutsche Bearbeitung von Dr.-Ing. **W. Hessenbruch**, Heraeus Vakuumschmelze A.-G., Hanau/M. Mit 248 Textabb. VII, 246 Seiten. 1931. Gebunden RM 29.—

Die ferromagnetischen Legierungen und ihre gewerbliche Verwendung. Von Dipl.-Ing. **W. S. Messkin**. Umgearbeitet und erweitert von Regierungsrat Dr. phil. **A. Kussmann**. Mit 292 Textabbildungen. VIII, 418 Seiten. 1932. Gebunden RM 44.50

Die Theorie der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. Studien über das Erstarrungs- und Umwandlungsschaubild nebst einem Anhang: Kaltrecken und Glühen nach dem Kaltrecken. Von **E. Heyn** †. Herausgegeben von Professor Dipl.-Ing. **E. Wetzell**. Mit 103 Textabb. und 16 Tafeln. VIII, 185 Seiten. 1924. Gebunden RM 10.80

Stahl- und Temperguß. Ihre Herstellung, Zusammensetzung, Eigenschaften und Verwendung. Von Professor Dr. techn. **Erdmann Kothny**. (Werkstattbücher, Heft 24.) Mit 55 Figuren im Text und 23 Tabellen. 68 Seiten. 1926. RM 1.80

Moderne Stahlgießerei für Unterricht und Praxis. Von Geh. Berg-
rat Professor Dr.-Ing. e. h. **Bernhard Osann**, Clausthal. Mit 216 Text-
abbildungen. VIII, 261 Seiten. 1936. Gebunden RM 26.70
