

Das Mikroskop im Dienste der Untersuchung der Metalle.

Von

Privatdozent Dr. Alfons Leon.

Vortrag, gehalten den 20. November 1912.

Mit 13 Abbildungen im Texte.

Meine Damen und Herren!

Der Erste, der zur Untersuchung der Metalle das Mikroskop benützte, scheint Réaumur gewesen zu sein, der von 1683 bis 1757 lebte, als Jurist und Physiker, als Zoologe und Ingenieur bedeutende Erfolge erzielte und der das Weingeistthermometer mit der noch heute benützten Skala erfunden hat. In einem 1722 erschienenen Buche¹⁾ beschrieb Réaumur, wie Eisen unter dem Mikroskope aussieht, was er auch durch eine Zeichnung verdeutlichte. Zu brauchbaren Ergebnissen kam allerdings Réaumur nicht.

Mehr als hundert Jahre später (1863) studierte ein englischer Arzt namens Sorby mit Hilfe des Mikro-

¹⁾ 1722 Réaumur: „L'art de convertir le fer forgé en acier“. Réaumur hat sich besonders für die Härbarkeit des Eisens interessiert und auch bezüglich der Stahlbereitung sehr nützliche Untersuchungen durchgeführt. Er hat auch das sogenannte „Réaumursche Porzellan“ erfunden, welches man dadurch erhält, daß man Glas längere Zeit durch Erhitzen im weichen Zustand erhält, so daß es sich in eine undurchsichtige, kristallinische, steinartige Masse verwandelt, die nicht mehr so spröde ist wie Glas. (Erklärung siehe weiter unten über instabile und stabile Zustände.)

skops die Konstitution von Metallen und Legierungen zum ersten Male mit Erfolg.

1876 wies Münster in dem „Nyt Magazin for Naturvidenskaberne“ darauf hin, daß man an Metallschliffen mit der Lupe sehr häufig ungleichartige Teilchen bemerken könne.¹⁾ Obwohl diese Studie im Auszuge auch in der Berg- und Hüttenmännischen Zeitung (1877, S. 195—197, S. 210—212, S. 219—220) erschien, wurden die Untersuchungen Münster's ebensowenig wie die von Sorby weiter beachtet.

Erst als (ab 1874) Professor Martens in Berlin, unabhängig von Sorby und Münster, ähnliche Studien durchführte und (ab 1878) veröffentlichte,²⁾ erkannte

¹⁾ Seiner Zeit weit vorsehend, dachte Münster schon daran, die Beimengungen und Verunreinigungen der im Hochofen gewonnenen Metalle als im Metall gelöst zu betrachten. Vom Eutektikum wußte aber Münster nichts.

²⁾ 1878 Adolf Martens „Über die mikroskopische Untersuchung des Eisens“ und „Zur Mikrostruktur des Schmiedeeisens“.

Die Legierungen haben allerdings schon früher, etwa vom Jahre 1850 an, die Aufmerksamkeit von Physikern und Chemikern erregt. 1855—1860 führten Calvert und Johnson eingehende Untersuchungen an Legierungen, bezüglich der Volumsänderungen, Festigkeitseigenschaften (Härte) und des chemischen Verhaltens durch. Aber Martens erkannte als erster die ungeheure praktische Bedeutung der mikroskopischen Untersuchung des Kleingefüges.

Die Abkühlungsvorgänge wurden ab 1880 zum Studium der Konstitution der Legierungen systematisch herangezogen und diese Untersuchungen nahmen nach der

man die Bedeutung der von Sorby begonnenen Untersuchungen. Die Wissenschaft und die Technik waren reif für einen neuen Forschungszweig, dem man den Namen „Metallographie“, d. i. Metallbeschreibung gab, eine Bezeichnung, die im Laufe der Zeit mit der Entwicklung der Methoden der physikalischen Chemie eine allgemeinere Bedeutung erlangt hat und nicht nur die Metallbeschreibung, sondern alles umfaßt, was auf die Konstitution metallischer Stoffe überhaupt Bezug hat.

Wie intensiv auf diesem Gebiete derzeit gearbeitet wird, geht daraus hervor, daß in den letzten drei Jahren allein an 600 Abhandlungen aus dem Gebiete der Metallographie erschienen sind. Es dürfte derzeit im ganzen an 4000 metallographische Arbeiten geben. Über die Legierung Eisen-Nickel sind Monographien von der Größe dicker Bücher vorhanden. Über Meteoreisen, eine natürliche Eisen-Nickellegierung, besteht eine eigene Literatur. (Guertler.) — — —

Betrachtet man im Mikroskop eine glattpolierte

1890 erfolgten Einführung des Thermoelements durch Le Chatelier einen großen Aufschwung.

Das Wesen vom Eutektikum wurde 1884 von Gruthie dargelegt; von ihm rührt auch die Bezeichnung „eutektische Mischung“ her. Gruthie stellte fest, daß das Eutektikum keine chemische Verbindung sein könne, da seine Zusammensetzung nicht durch Vielfache der Atomgewichte der Bestandteile ausdrückbar ist, doch hat erst Charpy 1897 nachgewiesen, daß das Eutektikum aus zwei getrennten Bestandteilen zusammengesetzt ist. (Guertler.)

Metallfläche, so nimmt man wahr, daß sich diese für das unbewaffnete Auge manchmal vollkommen homogen aussehende Fläche aus einer Unzahl von ganz kleinen Elementen zusammensetzt. Die Metalle und Metallegierungen haben ein ähnliches Gefüge wie die Urgesteine, z. B. Granit, Porphyr, Basalt.

In früheren Zeiten hielt man die Metalle und Legierungen für homogene Körper, ähnlich den chemischen Verbindungen; erst verhältnismäßig spät wurde erkannt, daß diese Ansicht unrichtig sei.

Man kann beobachten, daß Metalle von ganz gleicher chemischer Zusammensetzung völlig verschiedene mikroskopische Strukturen besitzen können, denen dann auch verschiedene mechanische Eigenschaften entsprechen. Am bekanntesten ist die Tatsache, daß man Stahl durch einfaches „Abschrecken“ vom glühenden Zustande in kaltes Wasser glashart machen kann. Seine chemische Zusammensetzung hat sich dabei nicht geändert. Flüssiges Roheisen kann sowohl als graues als auch als Spiegelisen erkalten. Bei gleicher chemischer Zusammensetzung ist das Aussehen ein völlig verschiedenes.

Wie erklären sich nun diese verschiedenen physikalischen Eigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung? Da die Metalle und Legierungen durch Schmelzen gewonnen werden, so müssen wir uns mit den Erscheinungen beschäftigen, die beim Erstarren flüssiger Körper und Gemische vor sich gehen. —

Überläßt man einen erhitzten einheitlichen Stoff in einer kälteren Umgebung sich selbst, so wird er sich ab-

kühlen. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je höher seine Temperatur über der seiner Umgebung liegt, und sinkt mit

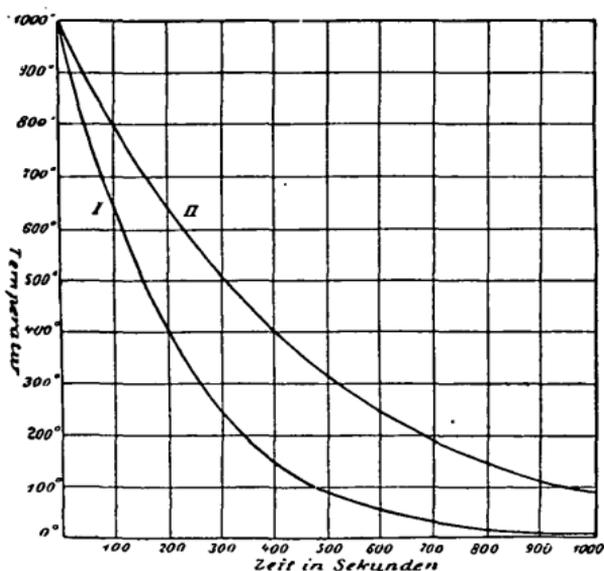


Fig. 1. Abkühlungskurven von einheitlichen Stoffen nach Newtons Gesetz.

Der Körper II hat die doppelte spezifische Wärme von der des Körpers I. Bei gleicher Oberflächenbeschaffenheit verhalten sich die Abkühlungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie die spezifischen Wärmen. (Ruer.)

dem Fortschreiten der Abkühlung immer mehr; z. B. Wasser von 90°C wird sich in einer Umgebung von 20°C rascher auf 80°C abkühlen als Wasser von 40°C bis auf 30°C .¹⁾ Fig. 1 zeigt die Abkühlungs-

¹⁾ Newton nahm an, daß die in gleichen Zeiten abgegebene Wärmemenge proportional ist der Differenz aus der jeweiligen Temperatur des Körpers, und der seiner

kurven zweier Metalle von der Temperatur von 1.000°C in einer Umgebung von 0°C .

Die Abkühlung macht aber stets dort halt, wo der Stoff eine Aggregatzustandsänderung durchmacht. Sobald z. B. Wasser in einer kälteren Umgebung die Temperatur von 0° angenommen hat, wird es so lange diese Temperatur behalten, bis die ganze Wassermasse zu Eis erstarrt ist, denn die beim Kristallisieren des Wassers abgegebene Wärmemenge deckt auf lange Zeit den Verlust an Wärme durch Abgabe an die Umgebung.

Und ebenso ist es bei der Erwärmung von Stoffen. Bringt man z. B. eine Eismasse in eine Umgebung von höherer Temperatur, so wird das Eis bei Erreichung von 0° so lange Zeit in gleicher Temperatur verharren, bis die gesamte Masse flüssig geworden ist. Die von der Umgebung aufgenommene Wärme wird einfach verbraucht, um das Eis zu schmelzen. Führt man weiter Wärme zu, so wird die Temperatur bis zum Siedepunkt zunehmen und dann so lange konstant bleiben, bis das gesamte Wasser in dampfförmigen Zustand übergegangen ist. Erst hernach vermag eine weiter zugeführte Wärmemenge eine Erhöhung der Temperatur zu bewirken.

Da also die Erhitzung des „einfachen Stoffes“ Wasser, sowohl bei 0° , als auch bei 100° auf einige Zeit unter-

Umgebung. Dieses Gesetz ist heute noch die Grundlage der Wärmetheorie und stimmt (mit Ausnahme der Verhältnisse bei sehr hohen Temperaturunterschieden) mit der Erfahrung gut überein.

brochen ist, so sagt man, der Stoff Wasser oder das „System“ Wasser besitzt zwei Haltepunkte.

Allen Aggregatzustandsänderungen entsprechen Haltepunkte, und zwar sind die Haltepunkte bei der Abkühlung im allgemeinen dieselben wie bei der Erwärmung; manchmal allerdings liegt der Haltepunkt bei der Abkühlung tiefer als der ihm entsprechende bei der Erwärmung. Den Temperaturunterschied zwischen beiden Haltepunkten nennt man Hysterese (Verspätung).

Es kann bei sehr vorsichtiger Wärmeabfuhr gelingen, einen Körper auch unterhalb derjenigen Temperatur flüssig zu erhalten, bei der er sonst erstarrt. Man nennt diesen Zustand den der Unterkühlung.

Die metallischen Stoffe sind jedoch nicht homogene Körper wie die chemische Verbindung Wasser; sie sind vielmehr Stoffgemische, die denselben Gesetzen gehorchen wie die wässerigen Lösungen der Salze.

Welches sind nun die Gesetze für die Abkühlung und Erstarrung der wässerigen Lösungen?

Nehmen wir z. B. an, wir stellen eine 5⁰/₀ige Lösung von Kochsalz im Wasser her; überläßt man diese Lösung einer fortschreitenden Abkühlung, so wird sie nicht bei 0⁰ C fest werden, sondern bis zu einer Temperatur von —3⁰ C vollkommen flüssig bleiben. Aber auch bei dieser Temperatur von —3⁰ C wird die Flüssigkeit nicht völlig fest werden. Es scheiden sich vielmehr bei abnehmender Temperatur Kristalle aus und erst bei —22⁰ C Kälte wird die ganze Lösung erstarrt sein.

Jeder Zusatz eines Salzes in Wasser erniedrigt seine Erstarrungstemperatur und das Gefrieren erfolgt nicht mehr bei einer und derselben Temperatur, sondern innerhalb eines Temperaturbereiches. Dies ist der Satz von der Erniedrigung der Erstarrungs-, beziehungsweise Schmelztemperatur.¹⁾

Überläßt man eine 10⁰/₀ige Kochsalzlösung der fortschreitenden Abkühlung, so bleibt sie bis -8°C völlig flüssig und beginnt dann zu erstarren. Völlig fest ist sie erst bei -22°C .

Beim Erstarren solcher Lösungen gefriert aber nicht das Stoffgemische als solches. Es findet vielmehr eine Entmischung statt. Eine 5⁰/₀ige Kochsalzlösung beginnt bei -3°C Eiskristalle und nicht Kristalle des Stoffgemisches abzuscheiden. Die zurückbleibende Lösung nimmt dadurch an Konzentration zu und dieser Konzentrationszunahme entspricht eine weitere Gefrierpunkts-erniedrigung. Bei der Temperatur von -22°C ist endlich die Kochsalzlösung für diese Temperatur gesättigt und enthält 23⁰/₀ Kochsalz. Eine weitere Konzentration ist bei dieser Temperatur nicht möglich. Die Lösung scheidet infolgedessen bei dieser Temperatur gleichzeitig Eis- und Kochsalzkristalle ab. Während dieses Vorganges bleibt die Konzentration konstant; es tritt daher keine weitere Gefrierpunktserniedrigung ein, Salz- und Eis-

¹⁾ Es sei nebenbei bemerkt, daß auch der Siedepunkt einer wässrigen Lösung ein anderer ist als der des reinen Lösungsmittels. Eine gesättigte Kochsalzlösung siedet bei zirka 108°C .

kristalle lagern sich nebeneinander und der bis zu -22°C noch flüssig gebliebene Teil der Lösung erstarrt nun bei gleichbleibender Temperatur.

Betrachtet man das Gefüge des so entstandenen festen Körpers, so entdeckt man größere Eiskristalle eingebettet in einem innigen Gemenge von ganz kleinen Eis- und Salzkristallen. Die bei der Erstarrungstemperatur von -22°C gesättigte Kochsalzlösung nennt man das Eutektikum des Systems Kochsalz-Wasser.

Man sagt, das „System Kochsalz“ ist im „System Wasser“ im flüssigen Zustande mischbar, d. h. lösbar, nicht aber im festen, weshalb sich beim Gefrieren Eis- und Kochsalzkristalle gleichzeitig, aber gesondert, abscheiden.

Verfolgen wir nun die Vorgänge beim Gefrieren einer wässrigen Lösung von 20% Kochsalz. Dieses „Zweistoffsystem“ bleibt vollkommen flüssig bis zu einer Temperatur von -18°C . Nun beginnt bei verzögerter Abkühlung die Ausscheidung von Eiskristallen, wobei sich die Lösung immer mehr konzentriert; wieder ist bei -22°C die Lösung gesättigt, d. h. sie verträgt keinen höheren Salzgehalt. Bei gleichbleibender Temperatur scheiden sich nun kleinste Eis- und Salzkristalle nebeneinander und gleichzeitig aus. Im Mikroskop zeigen sich einige wenige Eiskristalle in einem innigen Gemenge von Eis- und Salzkristallen.

Stellt man jedoch von Anfang an eine 23% ige Kochsalzlösung her, d. i. eine Lösung, die bei -22°C gesättigt ist, so bleibt sie bei der Abkühlung bis zur Temperatur von -22°C vollkommen flüssig, um dann

bei gleichbleibender Temperatur zu einem innigen Gemenge von Eis- und Salzkristallen zu erstarren. Wir haben es, wie man sagt, mit einem eutektischen Gemisch, mit dem Eutektikum des Zweistoffsystems Kochsalz-Wasser zu tun.

Es können jedoch die Verhältnisse auch so liegen, daß die Lösung von Anfang an mehr Kochsalz enthält, als es der Sättigung des Eutektikums bei der Temperatur von -22°C entspricht, denn bekanntlich sind bei höheren Temperaturen meist größere Konzentrationen möglich und wir können daher bei Zimmertemperatur Kochsalzlösungen herstellen, die mehr als 23% Kochsalz enthalten.¹⁾

Wasser vermag im heißen Zustande bis zu 29% Kochsalz aufzunehmen.

Eine 25% ige Kochsalzlösung z. B. wird vollkommen flüssig bleiben bis zu einer Temperatur von -10°C . Von da ab ist sie jedoch gesättigt und scheidet bei fortschreitender Abkühlung Salzkristalle ab. Der flüssig bleibende Teil der Lösung verliert dadurch an Konzentration bezüglich des Kochsalzes, d. h. er gewinnt an Konzentration bezüglich des Wassers. Bei -22°C ist — wie man sagen kann — das Kochsalz mit Wasser gesättigt; wir haben die Mutterlauge mit 23% Kochsalz und diese erstarrt bei gleichbleibender Temperatur. Im Mikroskop betrachtet, zeigt das Gefüge des gefrorenen

¹⁾ Es gibt jedoch auch Körper, die in der Kälte löslicher sind als in der Wärme.

Körpers vereinzelt größere Salzkristalle in einem innigen Gemenge von Eis- und Salzkristallen.

Die sogenannten untersättigten Salzlösungen, d. h. diejenigen, die mit Wasser übersättigt sind, nennt man hypoeutektisch, diejenigen, die bei der Abkühlung zunächst Salz abscheiden, hypereutektisch. Von allen Lösungen besitzt das Eutektikum den niedrigsten Erstarrungs- und Schmelzpunkt, es bildet sich nur in ganz bestimmten Gewichtsverhältnissen der Bestandteile. Erhitzt man eine erstarrte Lösung, so schmilzt zunächst die Mutterlauge und erst hernach die in ihr schwimmenden Kristalle.¹⁾

Eine Lösung von Kochsalz in Wasser besitzt daher für den Übergang in den festen Zustand stets zwei Haltepunkte. Der eine (untere) liegt für alle Konzentrationen bei -22°C ; der andere (obere) ist variabel²⁾ und nähert sich um so mehr dem unteren, je weniger die Konzentration der Lösung sich von jener des Eutektikums unterscheidet. (Fig. 2.)

¹⁾ Dies benützt man, um sogenannte „poröse Metalle“ herzustellen, indem man das zwischen den Metallen schmelzende Eutektikum durch Flüssigkeitsdruck oder durch den Druck verdichteter Kohlensäure austreibt. Man hofft, durch poröse Metalle große Fortschritte in der Akkumulatoren-technik zu erzielen. (Hannover, „Über die Herstellung poröser Metalle“. Zentralblatt der Hütten- und Walzwerke, 1912, Nr. 19.)

²⁾ Beim oberen Haltepunkt bleibt die Temperatur nicht einige Zeit konstant, wie dies beim unteren der Fall ist, es wird vielmehr nur die Temperaturabnahme verzögert.

Je mehr sich die Kochsalzlösung in ihrer Konzentration von einer 23⁰/₁₀igen unterscheidet, desto geringer ist die Menge der zurückbleibenden Mutterlauge im Verhältnis zur Masse jener Kristalle, die vor Erreichung der Temperatur von -22°C ausgeschieden werden, und

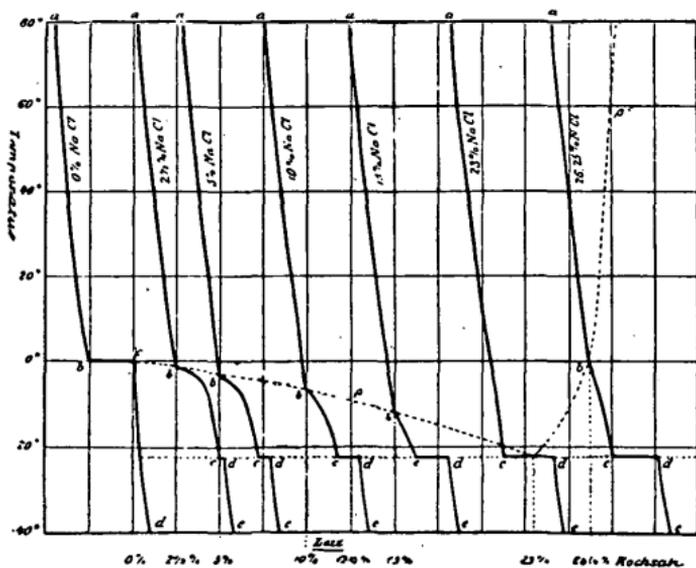


Fig. 2. Abkühlungskurven von Kochsalz-Wasserlösungen bei verschiedenen Konzentrationen. (Ruer.)

desto rascher kann unter sonst gleichen Umständen die Mutterlauge selbst erstarren. Das reine Wasser hat die Konzentration Null; dieses erstarrt bei 0°C völlig. Man kann auch hier annehmen, daß ein zweiter Haltepunkt bei -22°C existiert, nur ist die Menge der Mutterlauge gleich Null, so daß es auch keiner Zeit bedarf, diese Mutterlauge zur Erstarrung zu bringen.

Die Kochsalz-Wassergemische können in vier verschiedenen Zuständen (Phasen) bestehen: in einem völlig

flüssigen, oberhalb der oberen Haltepunkte, in einem völlig festen,¹⁾ unterhalb des unteren Haltepunktes, und in zwei teilweise festen und teilweise flüssigen Phasen zwischen den Haltepunkten. Untereutektische Lösungen bestehen im halbfesten Zustande aus Eiskristallen und Eutektikum, hypereutektische Lösungen aus Kochsalzkristallen und Eutektikum.

Es ist gebräuchlich und von großem Vorteil, alle Haltepunkte eines Systems in einem Schema graphisch zu vereinigen, so daß man aus dem Graphikon für jede Konzentration die Temperatur ablesen kann, bei der die Erstarrung beginnt und bei der sie beendet ist. Solche Graphika nennt man Erstarrungsbilder (Phasendiagramme).

Jedem System von zwei in irgend einem Temperaturbereich gegenseitig löslichen Körpern kommt ein derartiges Erstarrungs-, beziehungsweise Schmelzdiagramm zu. (Fig. 3.)

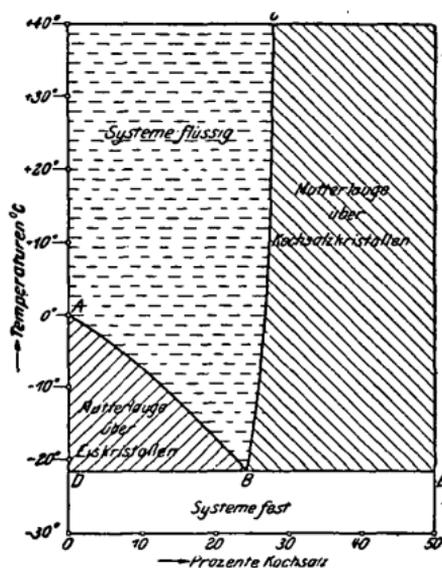


Fig. 3. Das „Zustandsbild“ des Systems Kochsalz-Wasser.

¹⁾ Lehmann unterscheidet noch kristallinisch-flüssige und amorph-flüssige Stadien.

In ähnlicher Art nun, wie Wasser Kochsalz löst, vermag ein Metall ein anderes in sich aufzunehmen. Schmilzt man z. B. Silber und Kupfer zusammen, so ergibt die Beobachtung, daß das Eutektikum dieses Systems aus 72% Silber und 28% Kupfer besteht, dem eine Erstarrungstemperatur von zirka 780°C entspricht. Sowohl die Erstarrungstemperatur des reinen Silbers als auch die des Kupfers liegt höher.

Hat nun eine Silber-Kupferschmelze weniger als 28% Cu, so werden bei sinkender Temperatur so lange Silberkriställchen ausgeschieden, bis bei 780°C die eutektische Zusammensetzung erreicht ist. Die weitere Wärmeabgabe bewirkt erst dann eine Temperaturabnahme, wenn die ganze Mischung erstarrt ist. Je weniger Kupfer in der Schmelze enthalten ist, auf einen desto größeren Temperaturbereich verteilt sich die Abscheidung der Silberkristalle.

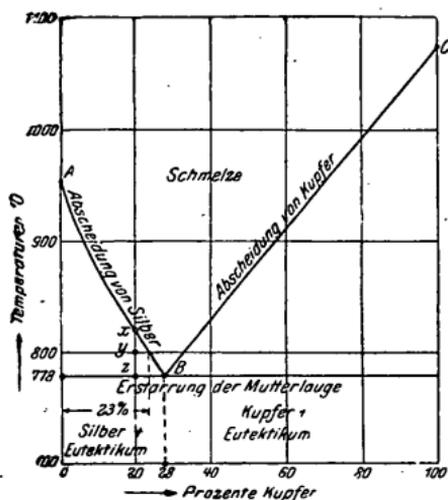


Fig. 4. Das „Zustandsbild“ des Systems Silber-Kupfer. (Wawrziniok.)

Enthält die Schmelze mehr als 28% Kupfer, so wird bei sinkender Temperatur so lange Kupfer ausgeschieden, bis wieder bei zirka 780°C die eutektische Zusammensetzung erreicht ist und die Mischung als einheitliches Ganzes erstarrt. (Fig. 4.) In Fig. 5 sind die Ge-

fugebilder zweier solcher Körper, die wir allgemein „Weiß“ und „Schwarz“ nennen wollen, schematisch dargestellt.

Aber es liegen nicht immer die Verhältnisse in der soeben beschriebenen Art: Es gibt Stoffe, die im flüssigen und festen Zustande

in beliebiger Menge ineinander löslich sind, die sich also bei der Erstarrung nicht ent-

mischen. Das System Silber-Gold z. B. hat einen einzigen Gefügebestandteil. Gold und Silber kristallisieren

aus der Schmelze nicht gesondert, sondern einheitlich als „Mischkristalle“.

Die erstarrte Masse erweist sich als homogen. Je nach der Zusammensetzung der Schmelze haben die „Mischkristalle“ eine

mehr gelbliche oder mehr weißliche Farbe. Gold schmilzt bei 1060°C , Silber bei 960° . Die Erstarrungstemperatur des Gemenges liegt zwischen den beiden Werten. Es gibt kein Eutektikum. Die Erstarrung des Gemenges findet bei konstanter Temperatur statt. (Fig. 6.)

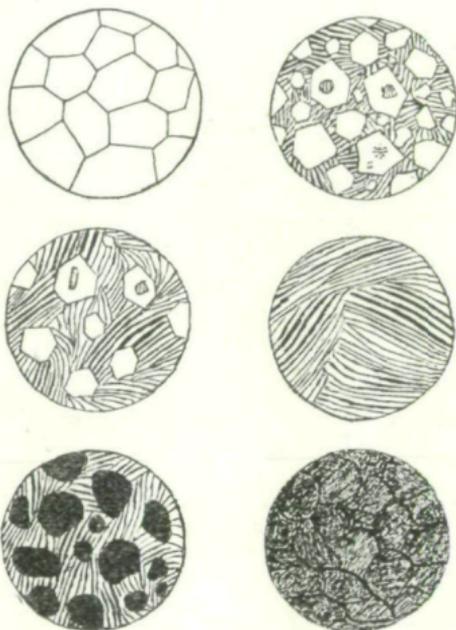


Fig. 5. Das System Schwarz-Weiß nach der Erstarrung.

a) der Körper Weiß; b) und c) Untereutektische Lösungen von Schwarz in Weiß; d) das Eutektikum; e) übereutektische Lösungen von Schwarz in Weiß; f) der Körper Schwarz. (Kuer.)

Ein etwas anderes Verhalten zeigt das System Gold-Platin. Auch hier scheiden sich bei gewissen Temperaturbereichen Mischkristalle ab, aber diese Mischkristalle haben nicht dieselbe Zusammensetzung wie die Schmelze,

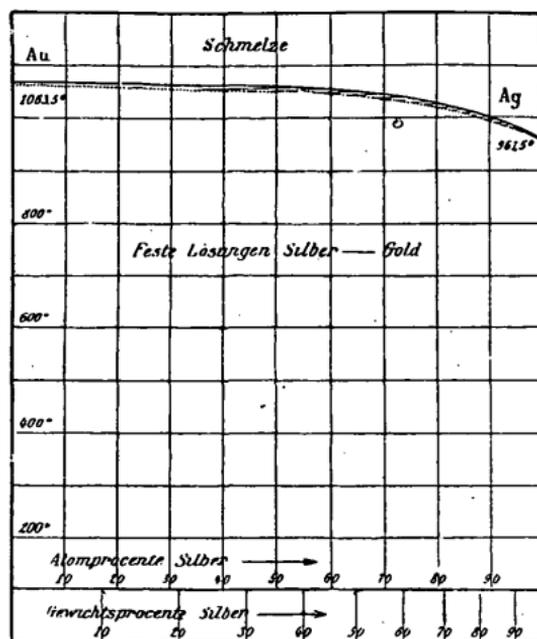


Fig. 6. Das System Silber-Gold. (Guertler.)

Die beiden Körper sind in beliebigen Verhältnissen sowohl im flüssigen, als auch im festen Zustand mischbar.

in der sie entstehen; sie enthalten mehr vom Stoff mit dem höheren Schmelzpunkt. Die zurückbleibende Schmelze zeigt das Bestreben, möglichst lange flüssig zu bleiben, und reichert sich daher mit jenem Bestandteil an, der den niedrigeren Schmelzpunkt hat. Aber die neu abgeschiedenen Mischkristalle enthalten prozentuell immer

mehr von dem Stoff, der leichter schmilzt, d. i. Gold und die zuerst gebildeten, platinreicheren Mischkristalle haben bei sinkender Temperatur die Fähigkeit, Gold durch Diffusion aufzunehmen, so daß ein Ausgleich im Platingehalte einerseits zwischen den Kristallen selbst, anderseits zwischen Kristallen und Flüssigkeit stattfindet. Die Erstarrung findet innerhalb eines Temperaturbereiches statt. Im festen Zustand ist jedoch die ganze Legierung wieder homogen. (Fig. 7.)

Diese beiden Fälle der völligen Mischbarkeit der Stoffe im flüssigen und festen Zustande sind jedoch bei den in der technischen Praxis gebrauchten Legierungen selten.

Es müssen nicht immer zwei Metalle sein, die sich gegenseitig lösen. Im System Kupfer-Sauerstoff ist der Sauerstoff nicht als solcher in Kupfer gelöst, sondern

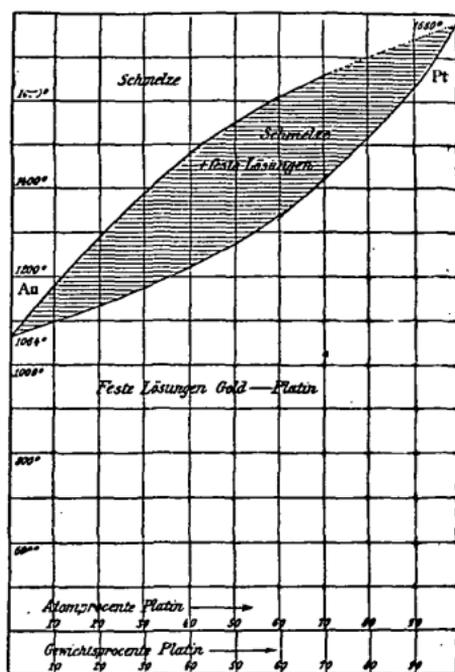


Fig. 7. Das System Platin-Gold.
(Guertler.)

Die beiden Körper sind in beliebigen Verhältnissen mischbar, doch scheiden sich aus der Schmelze zunächst platinreichere Mischkristalle aus.

chemisch an das Kupfer zur Verbindung Cu_2O , dem Kupferoxydul, gebunden. Der Schmelzpunkt des reinen Kupfers ist 1084°C und es vermag eine bestimmte Menge von Kupferoxydul zu lösen. Der Schmelzpunkt von Kupferoxydul liegt weit über dem des Kupfers; er liegt über den technisch erreichbaren Temperaturen. Das eutektische Gemenge hat eine Erstarrungstemperatur von 1065°C und bei dieser Temperatur ist Kupfer bei einem Gehalt von 3.4% Cu_2O gesättigt. Hat die Mischung einen geringeren Gehalt als 3.4% , so sieht man im Mikroskop Kupferkristalle im Eutektikum Kupfer-Kupferoxydul; sind in der Schmelze mehr als 3.4% Kupferoxydul aufgelöst gewesen, so sieht man in der Legierung Kupferoxydul-Kristalle, eingebettet im Eutektikum. Bei einiger Übung kann man lediglich durch Betrachtung eines mit Kupferoxydul, d. h. mit Sauerstoff verunreinigten Kupfers, mit Hilfe des Mikroskops den Prozentgehalt der Verunreinigung angeben.

Ähnlich, wenn auch nicht so einfach wie in den besprochenen Fällen, liegen die Verhältnisse beim Eisen, dem wichtigsten Erzeugnis der Metallindustrie.

Das in der Technik gebrauchte Eisen besteht der Hauptsache nach aus einer Legierung von Eisen und Kohlenstoff. Das reine Eisen hat eine Schmelztemperatur von etwa 1500°C . Ist dem Eisen eine gewisse Menge Kohlenstoff beigemischt, z. B. 3% , so wird das Eisen nicht bei 1500°C erstarren, sondern bis zirka 1250° flüssig bleiben; bei dieser Temperatur beginnt die Schmelze Eisen in Form von Kriställchen abzu-

scheiden, wodurch die zurückbleibende Masse kohlenstoffreicher wird.

Die Legierung sättigt sich mit Kohlenstoff bis zu 4·3⁰/₁₀₀ an und besitzt dann einen Schmelz-, beziehungsweise Erstarrungspunkt von 1130⁰ C.

Besitzt das geschmolzene Eisen von Anfang an 4·3⁰/₁₀₀ Kohlenstoff, so bleibt es bis zur Temperatur von 1130⁰ vollkommen flüssig und erstarrt bei gleichbleibender Temperatur zum Eutektikum Eisen-Graphit (Eisen-Kohlenstoff).

Liegt eine Schmelze vor, die einen höheren Gehalt an Kohlenstoff als 4·3⁰/₁₀₀ besitzt, so beginnt bei einer höheren Temperatur als 1130⁰ C die Ausscheidung des Kohlenstoffes in Form von Graphit, wodurch die zurückbleibende Schmelze graphitärmer, d. i. eisenreicher wird. Bei der Temperatur von 1130⁰ ist die dieser Temperatur entsprechende Sättigung erreicht und die Mischung erstarrt bei gleichbleibender Temperatur zum eutektischen Gemenge Eisen-Graphit.

In gewisser Hinsicht sind aber doch Unterschiede zwischen den Systemen Eisen-Kohlenstoff und Wasser-Kochsalz vorhanden. Während nämlich in untersättigten Kochsalzlösungen sich zunächst reine Eiskristalle ausscheiden, enthalten die in einer untersättigten Kohlenstoff-Eisenlösung entstehenden Eisenkristalle eine gewisse Menge Kohlenstoff. Wir haben es nicht mit reinen Eisenkristallen, sondern mit Mischkristallen zu tun, die man Austenit nennt. Freilich enthält der abgeschiedene Austenit viel weniger Kohlenstoff als die Schmelze, aus der er entsteht. Je mehr Austenit sich ausscheidet,

desto kohlenstoffreicher wird die zurückbleibende Schmelze und desto mehr Kohlenstoff enthalten auch die sich weiter bildenden Austenitkristalle. Geht die Abkühlung genügend langsam vor sich, so nehmen sogar die zuerst abgeschiedenen kohlenstoffarmen Mischkristalle neuen Kohlenstoff aus der noch flüssigen Schmelze auf. Dies verzögert nun die Zunahme der Konzentration der rückbleibenden Schmelze und kann sogar dazu führen, daß die Konzentration des Eutektikums Eisen-Graphit nicht erreicht werden kann und die ganze Masse nach der Erstarrung aus Austenitkristallen besteht.

Da Austenitkristalle bis zu 2.2% Kohlenstoff enthalten können, so erstarren alle Eisensorten von $0-2.2\%$ Kohlenstoff zu Austenit ohne Eutektikum. — —

Dies wären im groben Umriss die Vorgänge beim Übergang des technischen Eisens vom flüssigen in den festen Zustand. Im festen Zustande treten jedoch bei der weiteren Abkühlung Umwandlungen ein, da Austenit bei tieferen Temperaturen nicht stabil ist, sondern zerfällt.

Enthält Austenit überhaupt keinen Kohlenstoff, so stellt er das reine Eisen dar, dessen Schmelzpunkt, wie schon erwähnt, bei 1500°C liegt. Kühlt sich solches Eisen ab, so erhält man keine regelmäßig abfallende Temperaturlinie. Die Abkühlungskurve weist vielmehr zwei Unterbrechungen (Haltepunkte) auf, den einen bei 890° , den anderen bei 770°C . Es wird somit bei diesen beiden Temperaturen im Eisen Wärme frei, die für einige Zeit den Wärmeverlust des Eisens an die Umgebung teilweise deckt.

Das reine Eisen hat also im festen Zustande drei verschiedene Aggregatzustände, sogenannte allotrope Modifikationen. Eine dieser Modifikationen ist beständig bei Temperaturen bis zu 770°C ; dies ist das (reine) Alphaeisen; es ist magnetisierbar. Die zweite Modifikation, das Betaeisen, dem im kohlenstofflosen Zustand der Temperaturbereich von 770°C bis 890°C entspricht, ist ebensowenig magnetisierbar wie das Gammaeisen, dem im reinen Zustande die Temperaturen zwischen 890°C und dem Schmelzpunkte zukommen.¹⁾ Das im reinen Zustand abgeschiedene Alphaeisen heißt Ferrit, das Betaeisen Ferronit, das Gammaeisen (welches Kohlenstoff zu lösen vermag) Austenit. Alle drei Modifikationen kristallisieren im regulären System.²⁾

1) Der Übergang vollzieht sich beim Erhitzen bei etwas anderen Temperaturen als beim Abkühlen. Besonders beim Übergang der β - in die γ -Modifikation ist dies deutlich beobachtet worden.

2) Die Umwandlungspunkte kann man auch dadurch ermitteln, daß man die Änderung der Festigkeitseigenschaften oder der elektrischen Leitfähigkeit mit der Temperatur verfolgt. Die Festigkeitseigenschaften der Metalle, also die Härte, Zug- und Druckfestigkeit weisen in der Regel bei steigender Temperatur eine stetige Abnahme auf. Dies geschieht z. B. bei Kupfer und Aluminium. Diese beiden und auch andere Metalle erfahren im festen Zustande keine uns bekannte molekulare Umwandlung. Bei beginnender Rotglut (400 — 500°C) geht diese Abnahme der Festigkeitseigenschaften im beschleunigten Tempo vor sich.

Es gibt übrigens außer Eisen eine Reihe von Elementen und chemischen Verbindungen, die bei bestimmten Temperaturen molekularen Umwandlungen ausgesetzt sind. So ist z. B. das Zinn in der metallischen Form, in der wir es kennen, nur bei Temperaturen von mehr als $+20^{\circ}\text{C}$ stabil. Unter dieser Temperatur kann das Zinn in eine graue pulverige Masse zerfallen; man sagt, das Beta-Zinn verwandle sich in Alpha-Zinn; mit dem ursprünglichen Körper fehlt dann jede Ähnlichkeit und trotzdem hat

Bei Zink, Nickel, Eisen und manchen anderen metallischen Stoffen nehmen jedoch die Festigkeitseigenschaften nicht mit der Temperatur kontinuierlich ab, es sind vielmehr auch Festigkeitszunahmen feststellbar. Bei Nickel z. B. nimmt die Festigkeit von $0-300^{\circ}\text{C}$ nicht ab, sondern merkbar zu. Der Richtungswechsel findet bei ungefähr 350°C statt. Dies ist auch die Temperatur der allotropen Umwandlung des Nickels.

Man glaubt, daß das technische Eisen außer den oben erwähnten Umwandlungen auch noch eine solche bei Temperaturen zwischen 100° und 300°C erfährt. Zugfestigkeit und Härte nehmen nämlich bei Eisen bis zu 100°C ab. Man sollte meinen, daß dementsprechend die Dehnung des Eisens zunehmen sollte. Dies ist aber nicht der Fall; das Eisen verliert bis zu 100°C nicht nur an Festigkeit, sondern auch an Bildsamkeit. Über 100°C bis gegen 250°C nehmen aber Zugfestigkeit und Härte wieder zu. Ein bis auf 250°C erhitzter Eisenstab trägt nicht unbedeutend (bis zirka 30%) mehr als ein solcher von gewöhnlicher Temperatur. Erst über 250°C sinkt wieder die Festigkeit, und zwar bis zirka 450° langsam und hernach schnell.

Die Festigkeitszunahme mit der Temperatur ist bei Flußeisen größer als bei Schweißisen.

sich die chemische Zusammensetzung nicht geändert. Nur weil das Zinn sehr stark zu Unterkühlungen neigt, verwandeln sich Gebrauchsgegenstände aus Zinn, die Zinnlöffel und Zinnteller nicht sofort in ein graues Pulver, wenn die Temperatur unter 20°C sinkt. In strengen Wintern kommt es aber vor, daß Orgelpfeifen in den Kirchen zerfallen. Man sagt, die „Zinnpest“ habe sie befallen, und man hat in der Tat den Eindruck einer Infektionskrankheit, da man die Zinnpest verbreiten kann, wenn man metallisch gebliebenes Zinn in strenger Kälte mit der grauen Modifikation in Berührung bringt, wie man sagt, „impft“. Wie diese Impfwirkung zu erklären ist, wurde bisher noch nicht aufgeklärt. Die Deutung auf Grund der auf feste Aggregatzustände ausgedehnten kinetischen Gastheorie scheint sehr aussichtsvoll zu sein. Die Impfwirkung fester Körper aufeinander ist ein schlagender Beweis gegen den Satz: „Corpora non agunt nisi fluida“ (Substanzen wirken nur in flüssigem Zustande). Metalle legieren sich manchmal lediglich durch Berührung, sie tauschen also von Kristall zu Kristall Substanzen im festen Zustande aus.

Auch Blei und Silber, Antimon und Zink treten in verschiedenen allotropen Modifikationen auf; sie sind, wie man sagt, „polymorph“.

Von den Metalloiden sind Schwefel, Phosphor und andere polymorph. Der Schwefel kristallisiert oberhalb 96°C im monoklinen, unterhalb dieser Temperatur im rhombischen Kristallsystem. Vom Kohlenstoff wissen wir, daß er als Diamant, aber auch als Graphit besteht.

Würde man einen Diamanten unter Abschluß der Luft (um eine Verbrennung zu verhüten) nach und nach erwärmen, so ginge er in Graphit über. Der Graphit ist die stabile, der Diamant die instabile Form des reinen Kohlenstoffes.

Der feste Kalisalpeter kristallisiert oberhalb 128°C im hexagonalen, unterhalb dieser Temperatur im rhombischen System. Alle diese Vorgänge erfolgen unter Änderung des Wärmeinhaltes dieser Körper. — — —

Doch kehren wir nach dieser Abschweifung zu den Eisen-Kohlenstoff-Legierungen zurück und fragen: Welche Veränderungen gehen bei der Abkühlung im Austenit, dessen Kohlenstoffgehalt zwischen 0 und 2.2% liegen kann, vor sich?

Man muß sich den Austenit als eine Lösung von Kohlenstoff im reinen Eisen vorstellen; eine Lösung, die allerdings fest, und zwar kristallisiert ist, aber eine Lösung, die nur bei höheren Temperaturen bestehen kann und sich wie andere, z. B. Kupfer-Kupferoxydul, d. h. Kupfer-Sauerstoff entmischt, sobald sie in tiefere Temperaturen kommt. Während wir bisher die Vorgänge beim Erstarren flüssiger Lösungen verfolgten, betrachten wir jetzt das Entmischen einer Legierung im schon erstarrten Zustande.

Bei gewöhnlicher Temperatur besteht unter normalen Verhältnissen das Kleingefüge von Schmiedeeisen oder Stahl aus zwei Bestandteilen: aus dem Ferrit, der das reine Eisen darstellt, und dem Zementit, der chemischen Verbindung Fe_3C (Eisenkarbid), so ähnlich wie eine Kochsalzlösung bei Temperaturen unter -22°C aus

Kristallen von Eis und Kochsalz besteht. Hierbei spielt der Ferrit die Rolle des Wassers und der Zementit die Rolle des Kochsalzes. Bei einem Gehalt von zirka 11 0/0 Zementit (was einem Kohlenstoffgehalt von 0.85 0/0 entspricht) ist der Ferrit mit Zementit gesättigt und umgekehrt der Zementit mit Ferrit. Diesem Gemische entspricht eine Umwandlungstemperatur von 690 0 C. Bei Temperaturen, die über 690 0 liegen, stellt ein solcher Körper eine feste Lösung von Zementit in Ferrit, also eine feste Lösung von Kohlenstoff in Eisen dar und wir nennen sie Austenit. Bei Temperaturen unter 690 0 C scheidet sich diese feste Lösung in ein eutektisches¹⁾ Gemenge von Ferrit- und Zementitkriställchen, dem man den Namen Perlit gegeben hat.

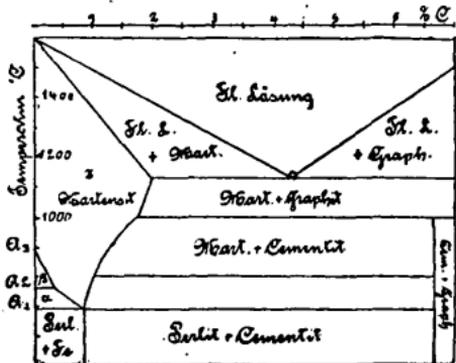


Fig. 8. Das Zustandsbild der Eisenkohlenstofflegierungen.

Der Austenit ist hier nach der älteren Gepflogenheit noch Martensit genannt.

Enthält Eisen eine geringere Menge Kohlenstoff als 0.85 0/0, so werden sich von einer gewissen Temperatur an Ferritkristalle bilden, bis bei 690 0 die übriggebliebene Masse die eutektoide Zusammensetzung, die dem Perlit

¹⁾ Bei Produkten, die durch Zerfall fester Körper entstehen, sagt man meist eutektoid statt eutektisch.

entspricht, erreicht hat. Völlig reines Eisen bleibt bei der Abkühlung bis zur Temperatur von 890°C als Austenit bestehen. Unter dieser Temperatur ist es als Ferrit anzusprechen. (Fig. 8.)

Eisen von etwa 1% Kohlenstoff, was einem Zementitgehalt von 15% entspricht, ist nicht mit Ferrit, sondern (bei tiefen Temperaturen) mit Zementit übersättigt, da das eutektoide Gemenge aus Ferrit und Zementit nur einen Kohlenstoffgehalt von 0.85% enthält. Ein derartiges Eisen stellt bei Temperaturen von über zirka 770°C Austenit dar. Bei Temperaturen unter 770°C scheiden sich Zementitkristalle aus, bis bei 690° die eutektoid gewordene feste Schmelze zu Perlit zerfällt.

Das Mikroskop kann dazu dienen, den Kohlenstoffgehalt einer Eisenkohlenstofflegierung abzuschätzen. Reiner Perlit entspricht einem Kohlenstoffgehalt von 0.85% oder besser gesagt, einem solchen von 0.80 bis 0.90 , da der Kohlenstoffgehalt des Perlit etwas zu schwanken scheint. Nimmt der Ferrit für sich (ohne dem Ferrit des Eutektikums) 30% der Fläche ein, so daß für den Perlit 70% übrig bleiben, so kann man den Kohlenstoffgehalt des Eisens auf zirka 0.3% schätzen; nehmen Ferrit und Perlit gleich große Flächen ein, so ist der Kohlenstoffgehalt mit zirka 0.5% anzunehmen (Heyn). Man ermittelt den Anteil der Flächen mit Hilfe eigener Apparate, den Planimetern (Flächenmesser).

Findet die Abkühlung sehr rasch statt, so tritt die Entmischung nicht ein. Wenn man z. B. glühendes Eisen in Wasser abschreckt, so kann man die feste Lösung

Austenit auch bei gewöhnlicher Temperatur erhalten und studieren.

Im Mikroskop sieht man sofort, ob ein Eisen abgeschreckt wurde oder ob es sich langsam abkühlen konnte. Liegt ein beinahe amorphes Austenitgefüge, oder als dessen erstes Zerfallprodukt ein nadeliges Martensitgefüge vor, so war ersteres der Fall; findet man Ferrit eingebettet in Perlit oder Zementit in Perlit oder schließlich Perlit allein, so war die Abkühlung eine langsame.

Beim Abschrecken ist für die getrennte Abscheidung der einzelnen Gefügebestandteile keine Zeit und das Bruchgefüge wird — ganz gleichgültig, ob eine hypohypereutektische Lösung vorliegt — aus polyedrischen Gefügeteilchen, den einheitlich zusammengesetzten Mischkristallen bestehen. Freilich ist dieses künstliche Produkt nicht stabil und ein gelindes Erwärmen (Anlassen) auf eine Temperatur, die weit unter der Abschrecktemperatur liegt, kann bewirken, daß die Mischkristalle zerfallen.

Wir haben demnach erkannt, daß der Austenit, der sich aus der flüssigen Eisenschmelze abscheidet, kein stabiles Produkt ist, sondern den Kohlenstoff, den er in fester Lösung enthält, in tieferen Temperaturbereichen in Form von Zementit abgibt, so daß das Eisen sich bei langsamer Abkühlung bei gewöhnlicher Temperatur aus Ferrit und Zementit, beziehungsweise aus dem eutektoidem Gemenge dieser beiden Gefügebestandteile zusammensetzt. Dieses Verhalten bedingt eine Komplikation des Erstarrungsbildes des Systems Eisen-Kohlenstoff. Was aber die Konstitution des technischen Eisens noch ver-

wickelter macht, ist das Verhalten des Zementit, des Eisenkarbides.

Auch der Zementit ist keine stabile chemische Verbindung von Eisen und Kohlenstoff, sondern ein halb-stabiles Umwandlungsprodukt.

Glüht man kohlenstoffhaltiges Eisen durch viele Tage, so zerfällt der Zementit in Ferrit und Kohlenstoff, wobei letzterer in Form von Graphit oder Temperkohle erscheint.¹⁾

Die Spaltung von Karbid in Ferrit und Graphit geht bei Roheisen, das schon vom Erstarrungsvorgang her Graphit enthält — besteht doch das Roheisen-Eutektikum aus Austenit und Graphit — leichter vor sich als bei schmiedbarem Eisen, da der schon vorhandene Graphit die Abscheidung von neuem Graphit fördert.

Daß man beim schmiedbaren Eisen relativ selten als Gefügebestandteile Ferrit und Graphit (Temperkohle) findet, hat seinen Grund darin, daß die Herstellungs- und Bearbeitungsvorgänge der Technik zu rasch erfolgen, als daß der vollkommen stabile Zustand erreicht werden könnte. Dies ist auch gut so! Das zu lange Verweilen in höherer Temperatur und die zu langsame Abkühlung bewirkt die Ausbildung zu großer Kristalle und die Abscheidung von Graphit, was die Festigkeitseigenschaften herabsetzt.

Durch rasches Abschrecken von kohlenstoffgesättigtem Roheisen erhält man ein Gefüge, das neben

¹⁾ Temperkohle hält man für molekular abgeschiedenen Kohlenstoff, der sich noch nicht zu Kristallen aufgebaut hat.

Ferrit sehr viel Graphit, aber nur wenig Karbidenthält. Man glaubt daher, daß der Zementit nur bei mittleren Glühtemperaturen, nicht aber bei den höchsten stabil ist.

Aus einer mit Kohlenstoff gesättigten Roheisenschmelze kann man jedoch statt eines Gemenges von Ferrit und Graphit ein solches aus Austenit (beziehungsweise Martensit) und Karbid erhalten, wenn man die Schmelze bis zur Rotgluttemperatur abschreckt und hernach langsam abkühlen läßt. Man kann Legierungen mit bis zu 50 Gewichtsprozenten Karbid erhalten.

Die Zementitbildung kann somit gefördert oder unterdrückt werden, je nachdem das technische Eisen den Temperaturbereichen, in der Zementit stabil ist, längere Zeit ausgesetzt wird oder dieselben so rasch als möglich durchfährt. Je nachdem das eine oder das andere geschieht, erhält man Produkte des stabilen Systems Ferrit-Graphit oder des halbstabilen Systems Austenit-Karbid.

Das Mikroskop liefert genügende Anhaltspunkte, um auf die Wärmebehandlung eines Eisens schließen zu können.

In Eisen-Kohlenstofflegierungen kommen somit folgende Gefügeelemente vor:

1. Der Ferrit (Fe). Er stellt beinahe völlig reines Eisen dar, dessen Kohlenstoff höchstens 0·05, meist aber weniger als 0·02% beträgt. Der Ferrit ist so weich und bildsam, daß er im reinen Zustande in der Technik nicht verwendet wird. Seine Zugfestigkeit ist nach allen Richtungen gleich. Sie wird mit 2800 kg / cm² angegeben.

Im Mikroskop erscheinen zusammenhängende Ferritmassen aus polyedrischen Teilen zusammengesetzt. (Fig. 9.) Die Begrenzungsflächen der Polyeder stehen

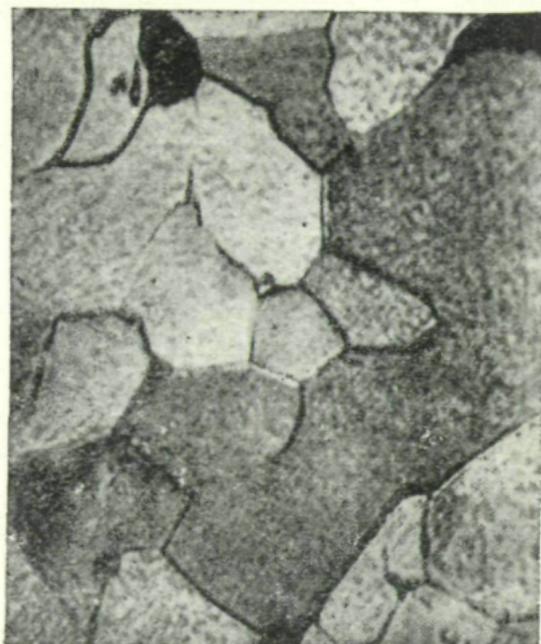


Fig. 9. Ferritpolyeder. 650fache lineare Vergrößerung. (Osmond.)

Flußeisen mit 0.14% Kohlenstoff. Der Perlit ist durch dunkle Flecke, teilweise zwischen den Polyederfugen, dargestellt. Die Perlitfetzen und -fugen erscheinen ihrer größeren Härte wegen beim Reliefpolieren erhöht.

mit den dem Ferrit zukommenden Kristallformen in keinem Zusammenhang; sie sind zufällige Gebilde, die durch das Zusammenstoßen der Kristalle bei deren Wachsen erscheinen.¹⁾ Wo der Ferrit ungehindert kristallisieren

¹⁾ Auch in den Eutektika sind keine Gestaltseigenheiten der Bestandteile zu bemerken.

kann, bildet er Würfel oder Oktaeder. Beim Schmelzen lösen sich die Polyeder zusammenhängender Ferritmassen von den Begrenzungsflächen aus auf. Beim Ätzen werden an den Ferritflächen Ätzfiguren sichtbar, die je nach der Orientierung der Flächen aus Vierecken oder parallelen Streifen bestehen.

Ferrit, das sogenannte Alpha-Eisen, kann manchmal etwas Phosphor, Silizium oder Mangan in fester Lösung enthalten; er ist der Hauptbestandteil der kohlenstoffarmen Eisensorten.

2. Der Zementit oder, wie man auch sagt, das Eisenkarbid. Der Zementit ist eine chemische Verbindung aus 14 Gewichtsteilen Eisen und einem Gewichtsteil Kohlenstoff. Man erhält somit bei einer technischen Eisensorte den Zementitgehalt, wenn man die Kohlenstoffprozentage mit 15 multipliziert. Ein Stahl von 0.85% Kohlenstoff enthält somit 12.75% Zementit. Mit anderen Worten: Der Kohlenstoffgehalt des Zementit beträgt den 15. Teil von dessen Gewicht, d. i. 6.67%.

Der Zementit ist härter als alle anderen Gefügebestandteile des Eisens einschließlich jener, aus dem glasartig gemachter Stahl besteht. Der Zementit ist sehr spröde und seine Festigkeit ist nicht unabhängig von dem Winkel, den die Kraft mit der Achsenrichtung der Kristalle einschließt. In der Achsenrichtung ist Eisenkarbid sehr fest. In Spezialstählen ist das Eisen des Zementit teilweise oder ganz durch Chrom, Mangan u. dgl. ersetzt.

Mit dem Zementitgehalt steigt bis zu einer gewissen Grenze die Härte und Sprödigkeit des Eisens. Wenn

eine Eisensorte mehr als ein Drittel seines Gewichtes Zementit besitzt (also über 2 $\frac{0}{0}$ Kohlenstoff), so ist sie auch in der Wärme nicht mehr schmiedbar (Gußeisen).

Bei geringem Zementitgehalt verursacht dieser eine Erhöhung der Zugfestigkeit. Ein Stahl von 15 $\frac{0}{0}$ Zementit und 85 $\frac{0}{0}$ Ferrit (was einem Kohlenstoffgehalt von 1 $\frac{0}{0}$ entspricht) trägt im gehärteten Zustande reichlich das Dreifache als Ferrit. Bei größerem Zementitgehalt nimmt der Kohlenstoffgehalt wieder ab. Die Festigkeit des Gußeisens ist viel kleiner als jene der kohlenstoffarmen Eisensorten. Auch die Härte des schmiedbaren Eisens erreicht ein Maximum, doch ist die Härte von Gußeisen, selbst von graphithaltigem, größer als die von weichem Eisen mit wenig Kohlenstoff.

Ferrit und Zementit sind die Elemente des nicht abgeschreckten technischen Eisens.¹⁾ Wird das Widerstandsvermögen eines Eisens durch wiederholte Überbelastung nach und nach erschöpft, so scheint die Bruchlinie im Ferrit, und zwar längs der Trennungsfächen von Ferrit und Zementit sich auszubilden.

¹⁾ Auch bei anderen Legierungen, nicht nur beim System Eisen-Kohlenstoff haben die Gefügeelemente eigene Namen erhalten, so beim Meteoreisen, das eine natürliche Eisen-Nickellegierung darstellt. Das Gefüge von Meteor-eisen besteht aus breiten dunkeln und schmalen hellen, nach den drei Seiten eines gleichzeitigen Dreieckes angeordneten Stäbchen, zwischen denen sich körniges Eutektikum befindet. Die dunkeln Stäbchen heißen Kamazit, die hellen Taenit und das Eutektikum Plessit.

3. Der Perlit. Er ist ein regelmäßiges Gemenge abwechselnder meist gekrümmter Schichten von Zementit und Ferrit. Beim Schleifen höhlt sich der weiche Ferrit mehr aus als der harte Zementit. Es entsteht ein sogenanntes optisches Gitter. Kleine nebeneinander gelagerte Lamellen bedingen Interferenzerscheinungen des Lichtes, was sich in einem perlmutterartigen Glanz äußert. Dies hat diesem Gefügebestandteil den Namen gegeben. (Fig. 10 und 11.)

Der Perlit ist das Eisenkohlenstoffeutektoid. Er besteht aus sechs Gewichtsteilen Ferrit und einem Gewichtsteile Zementit.

Im reinen Zustand enthält Perlit 0.85% Kohlenstoff und 99.15% Eisen. Enthält ein Stahl 0.85% Kohlenstoff, so besteht er völlig aus Perlit.

4. Der Martensit ist das erste Zerfallprodukt der homogenen festen Lösung von Eisenkarbid (oder von Kohlenstoff) in Gamma-Eisen. Er besitzt keine einheitliche Zusammensetzung, sondern kann bis zu 2.2% Kohlenstoff

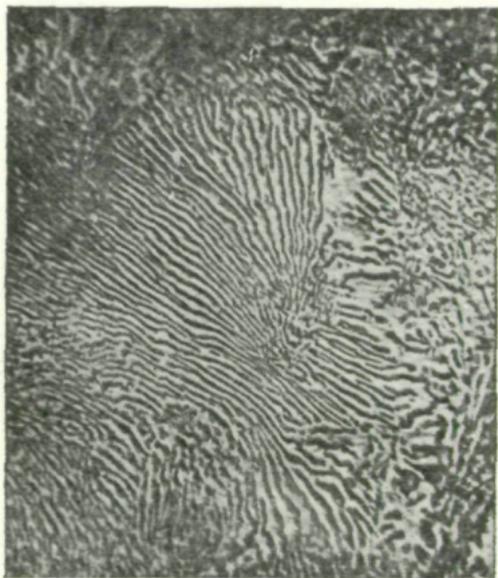


Fig. 10. Der Perlit. 600fache lineare Vergrößerung. (Osmond.)

(d. s. 33 0/0 Eisenkarbid) enthalten. Martensit wird durch Abschrecken von Eisen bei Temperaturen, die oberhalb der-



Fig. 11. Zementit (die hellen Teile)
in Perlit. (Osmond.)

590fache lineare Vergrößerung. Zementstahl
mit 1.6% Kohlenstoff. Ätzpoliert.

jenigen liegen, bei welchen die allotropen Umwandlungen des Gamma-Eisens in Ferrit und Zementit vor sich gehen, erhalten. Der Martensit besteht aus einer Unmenge von feinen Nadeln, die nicht ganz regellos, sondern der Hauptsache nach parallel den Seiten eines gleichseitigen Dreiecks verlaufen.

Die Härte des Martensits liegt zwischen der von Ferrit und Zementit. Martensit ist benannt nach Professor Martens in Berlin — Groß-Lichterfelde.

* * *

Je rascher und von je höheren Temperaturen Gamma-Eisen abgeschreckt wird und je höher der Kohlenstoffgehalt ist, desto feinnadliger wird das Gefüge von Martensit. Wenn man Kohlenstoffstähle von mehr als

1·1 % Kohlenstoff von Temperaturen über 1000° C plötzlich in Eiswasser oder in einer Kältemischung abschreckt, so kann man selbst bei stärkster Vergrößerung eine nadlige Struktur nicht mehr unterscheiden. Diese strukturlose Form von Gamma-Eisen nennt man zu Ehren von Sir William Roberts-Austen Austenit. Zwar erscheint nicht das ganze Gefüge strukturlos, es sind zu meist auch nadlige Partien enthalten. Bei größeren abgeschreckten Stücken erscheint der Rand austenitisch (also strukturlos), der innere Kern, wo die Abschreckung nicht so schroff war, nadlig-martensitisch.

Man faßt die Tatsache des nadligen Aufbaues derjenigen Stähle, die nicht in allerschroffster Weise abgeschreckt wurden, als Zeichen dafür auf, daß der Zerfall der einheitlichen Mischkristalle nur sehr schwer völlig unterdrückt werden kann und beim nadligen Martensit schon begonnen hat.

Aus dem Gefüge des abgeschreckten (unterkühlten) Stahles kann man auf die Höhe der Abschreckungstemperatur schließen. —

Es gibt nun eine Reihe von Übergangsprodukten zwischen dem nadligen Martensit und dem Ferrit mit Zementit, die man erhält, wenn man das Abschrecken nicht so energisch vornimmt, daß man Martensit erhält. Die Übergänge haben scharf ausgeprägte Gefügebilder, denen man die Namen Troostit, Osmondit und Sorbit gegeben hat. Solche Übergänge erhält man, wenn man beim Abschrecken die Umwandlungstemperaturen nicht überschritten, sondern gerade erreicht hat, oder wenn

man in heißem Wasser oder endlich in wenig wirksamen Flüssigkeiten wie Öl abschreckt, d. h. in solchen, die der Eisenkohlenstofflegierung die Wärme nicht so rasch entziehen wie das kalte Wasser. (Fig. 12.)

Die Übergänge haben folgende Reihenfolge: Strukturloser Martensit (Austenit, Fig. 13), nadliger Marten-



Fig. 12. Troostit (Osmond) in 610facher Vergrößerung. Eisen mit 0,45% Kohlenstoff, auf 825°C erhitzt, bis 690°C langsam abgekühlt und dann in Wasser von Zimmertemperatur abgeschreckt. Harte Kerne aus Martensit und weiche Fetzen aus Ferrit.

sit (Martensit im gewöhnlichen Sinne), Troostit, Osmondit, Sorbit und Perlit (letzterer je nach dem Kohlenstoffgehalt mit Ferrit oder Zementit).

Beim Anlassen verwandelt sich Austenit nach und nach in Martensit und dieser in Troostit. Beim Härten

von Stahlkörpern erhält man häufig an der Oberfläche nadligen Martensit, im Innern Troostit. Einige nehmen an, Troostit sei eine kolloidale Lösung von Karbid in Eisen, d. h. der Kohlenstoff des Martensit sei schon in Form von Karbid aus der Lösung getreten, doch sei er



Fig. 13. Austenit (hell) und Martensit (dunkel) in 150-facher linearer Vergrößerung. (Osmond.)

Ätzmittel: zehnprozentige Chlorwasserstoffsäure. Austenit erhält man nur mit Stählen von mehr als 1·1% Kohlenstoff.

os fein verteilt und noch nicht zu Kriställchen aufgebaut, als daß man ihn im Mikroskop sehen könnte.

Der Sorbit wird als eine Art Perlit von so feiner Struktur aufgefaßt, daß die dem Perlit eigentümliche Streifung im Mikroskop nicht mehr gesehen wird. Das

Eutektikum hatte nicht mehr die Zeit, sich in die Bestandteile zu zerlegen. Eine mäßige Beschleunigung in der Abkühlung des Stahles, der soeben in Perlit und Ferrit, beziehungsweise Zementit zu zerfallen im Begriffe ist, führt zu Sorbit.

Der Sorbit hat großen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des technischen Eisens. Der bei Baukonstruktionen verwendete Stahl besteht teilweise aus Sorbit, teilweise aus Ferrit in Perlit.¹⁾ Der gegenüber gewöhnlichem Baueisen höhere Kohlenstoffgehalt begünstigt unter sonst gleichen Umständen die Bildung von Sorbit auf Kosten von Perlit.

Troostit und Osmondit sind nach den Franzosen Troost und Osmond, Sorbit nach dem englischen Arzte Sorby, dem „Vater der Metallographie“, benannt. — —

Nun noch einige Worte über die Technik metallographischer Arbeiten in Bezug auf die Herstellung der Schriffe.

Die Probestücke erhalten durch Schleifen und Polieren spiegelglänzende Flächen. Es ist darauf zu achten, daß beim Schleifen die Reibungswärme keine zu großen Temperaturänderungen hervorruft, da dies das Bruchgefüge (besonders bei instabilen Zuständen) verändern könnte. Man kühlt daher die Probe von Zeit zu Zeit in Wasser ab. Unter Umständen kann man an der hochglanzpolierten Fläche die einzelnen Gefügeteile mit Hilfe einer

¹⁾ Oft mit Zusätzen von 0·5 bis 5 % Chrom oder 1 bis 10 % (ja auch 20 %) Nickel.

Lupe oder eines Mikroskops unmittelbar sehen. So z. B. bei den Legierungen des Systems Gold-Blei, wo die einzelnen Gefügekörner sich durch die Farbe voneinander unterscheiden. Zumeist ist es jedoch besser, die Schliche zwecks deutlicher Unterscheidung der einzelnen Gefügebestandteile einer geeigneten Behandlung zu unterziehen. Dies geschieht durch Reliefpolieren, Ätzpolieren, Ätzen oder durch Oxydieren.

Das Reliefpolieren besteht darin, im Schliff durch Abreiben an einer sehr elastischen, sich überall anschmiegenden Unterlage, z. B. auf Pergament, die weichen Gefügebestandteile auszuschleifen, wodurch die harten sich reliefartig herausheben. Um im Mikroskop zu entscheiden, welche Teile erhaben und welche vertieft sind, gibt es einfache Kunstgriffe. Bei seitlicher Beleuchtung genügt die Beachtung der Schattenlinien.

Beim Ätzpolieren unterstützt man das mechanische Reliefpolieren durch chemische Substanzen, wobei Flüssigkeiten, wie z. B. Süßholzextrakt, ätzend wirken, die sonst das Metall nicht merkbar angreifen.

Die Wirkung des eigentlichen Ätzens selbst beruht darauf, daß einzelne Gefügekörner angegriffen werden und dadurch die Reflexionsfähigkeit bezüglich des Lichtes teilweise oder ganz verlieren, während die nicht angegriffenen Flächen spiegelnd bleiben.

Die spiegelnden Flächen können übrigens im Mikroskop sowohl hell als auch dunkel erscheinen. Dies kommt ganz auf die Beleuchtung an. Wenn das Licht vom Objekt in das Mikroskop reflektiert wird, so erscheinen die

spiegelnden Flächen hell, die nicht spiegelnden, die das Licht diffus zerstreuen, weniger hell. Wenn das Licht jedoch etwa von außen auf das Objekt fällt und nicht in das Mikroskop reflektiert wird, so erscheinen die angegriffenen Körner, die wenigstens einen Teil des Lichtes diffus in das Mikroskop reflektieren, heller als die spiegelnden Flächen, die das ganze Licht ablenken.

Als Ätzmittel verwendet man sehr verschiedene Reagenzien: konzentrierte Salpetersäure, einprozentige Salpetersäure in einer Mischung von gleichen Volumenteilen Alkohol und Äther, vierprozentige amyalkoholische Lösung von Salpeter- oder Pikrinsäure, eine Lösung von zwölf Gewichtsprozenten Kupferammoniumchlorid in destilliertem Wasser, alkoholische Salzsäure (ein- bis zehnprozentig), konzentrierte Kalilauge, zehnprozentige Chlorwasserstoffsäure, Jodpräparate usw.

Manche Ätzmittel wirken weniger durch verschieden tiefen Angriff, wodurch ein Relief entsteht, als durch verschiedene Färbung der einzelnen Gefügebestandteile.

Manchmal wird auch der elektrische Strom zur Ätzung benützt. Als Elektrolyten wählt man eine so verdünnte Salzlösung, daß sie ohne Strom den Schliff nicht angreifen würde. Der Schliff dient als Anode für den durch den Elektrolyten geleiteten, übrigens sehr schwachen Strom.

Da die meisten Metalle beim langsamen Erwärmen oberflächlich oxydieren, wobei durch Interferenzwirkung (Farben dünner Blättchen) verschiedene Farben, die sogenannten Anlaßfarben entstehen, so benützt man auch

diese Eigenschaft, um die einzelnen Gefügekörner besser sichtbar zu machen. Da die Gefügeelemente verschiedene Zusammensetzung haben, so oxydieren sie bei verschiedenen Temperaturen und nehmen auch etwas verschiedene Farben an.

Literatur.

1864. Henry Clifton Sorby: On a New Method of Illustrating the Structure of Various Kinds of Steel by Nature Printing. Sheffield, Literary and Philosophical Society.
1876. Münster: Om Hytteproduktet Sten. Nyt Magazin for Naturvidenskaberne.
1884. Gruthie: On Eutexia. Philosophical Magazine 1884, Bd. XVII, S. 462.
1888. Osmond: Transformation du Fer et du Carbon dans les Fers, les Aciers et les Fontes blanches. Paris, Boudoin.
1894. Behrens: Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen. Hamburg und Leipzig.
1895. Osmond: Methode générale pour l'analyse micrographique des aciers au carbon. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, deutsch von Heurich, Halle 1906.
1896. Roberts-Austen: On the structures of metals, its origine and changes.
1896. Gautier: Recherches sur la fusibilité des alliages métallique. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.
1900. B. Roozeboom: Eisen und Stahl vom Standpunkte
Verein nat. Kenntn. LIII. Bd.

- der Phasenlehre. Zeitschrift für physikalische Chemie.
- 1900 und 1904. Jüptner: Grundzüge der Siderologie. Leipzig, Artur Felix.
1903. Tammann: Kristallisieren und Schmelzen. Leipzig.
1903. Heyn: Die Metallographie im Dienste der Hüttenkunde. Freiberg.
1903. H. M. Howe: The Metallographie of Iron and Steel. Engineering Magazine, Vol. 25. New-York.
1904. Heyn: Labile und metastabile Gleichgewichte bei Eisenkohlenstofflegierungen. Zeitschr. f. Elektrochemie.
1904. Benedicks: Recherches physiques et physico-chimiques sur l'acier au carbon. Upsala.
1904. Reuleaux: Abriß der Festigkeitslehre für den Maschinenbau. Braunschweig, Vieweg.
1906. Goerens: Einführung in die Metallographie. Halle a. d. S., Knapp.
1906. Benedicks: Über das Gleichgewicht und die Erstarrungsstrukturen des Systems Eisenkohlenstoff. Metallurgie.
1906. Heyn und Bauer: Über den inneren Aufbau der gehärteten und angelassenen Werkzeugstähle. Mitteilungen aus dem königlichen Materialprüfungsamte in Berlin.
1907. Goerens: Über die Vorgänge bei der Erstarrung und Umwandlung der Eisenkohlenstofflegierungen. Halle.
1907. Ruer: Metallographie in elementarer Darstellung. Hamburg und Leipzig, Leopold Voß.
1908. Friedrich: Beitrag zur Geschichte der Metallographie. Metallurgie, S. 408—410.
1908. Wawrziniok: Handbuch des Materialprüfungswesens für Maschinen- und Bauingenieure. Berlin, Springer.

1909. Heyn und Bauer: Metallographie. 2 Bändchen, Sammlung Göschen, Bd. 432 und 433.
- 1909—1911: Guertler: Metallographie. Berlin, Gebrüder Borntraeger.
1910. Kremann: Leitfaden der graphischen Chemie. Berlin, Gebrüder Borntraeger.
1910. Werkmeister: Über Bildung und Zerfall von Eisenkarbid. München, Oldenburg.
1911. Kröhnke: Kurze Einführung in den inneren Gefügebau der Eisenkohlenstofflegierungen. Berlin, Concordia, Deutsche Verlagsanstalt.
1912. Heyn: Handbuch der Materialienkunde. II. Teil, Hälfte A. Berlin, Springer.
1912. Neumann: Lehrbuch der chemischen Technologie und Metallurgie, S. 403 ff. Leipzig, Hirzel.
1913. Bauer: Metallographie unter besonderer Berücksichtigung der Mikroskopie der Metalle und Legierungen. In „Das Materialprüfungswesen,“ herausgegeben von Hinrichsen. Stuttgart, Ferdinand Enke.
1913. Preuß: Die praktische Nutzenanwendung der Prüfung des Eisens durch Ätzverfahren und mit Hilfe des Mikroskopes. Berlin, Julius Springer.
-

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien](#)

Jahr/Year: 1913

Band/Volume: [53](#)

Autor(en)/Author(s): Leon Alfons

Artikel/Article: [Das Mikroskop im Dienste der Untersuchung der Metalle. 55-99](#)