

## V. Allgemeines über die Eigenschaften der metallischen Stoffe.

283. Das unter 209 bis 225 über die Abhängigkeit verschiedener physikalischer Eigenschaften der metallischen Stoffe von ihrer chemischen Zusammensetzung Mitgeteilte soll im folgenden nach verschiedenen Richtungen hin ergänzt werden. Die Eigenschaften sind im wesentlichen abhängig von der chemischen Zusammensetzung, von der Temperatur des Stoffes und schließlich von der Art der Vorbehandlung. Man kann dies durch die folgende mathematische Ausdrucksweise kurz zusammenfassen:

$$q = f(c, b, t),$$

worin  $q$  irgendeine zahlenmäßig bestimmbare Eigenschaft des metallischen Stoffes ist,  $c$  die chemische Zusammensetzung,  $b$  die Vorbehandlung und  $t$  die Temperatur bezeichnet. Besteht die Legierung aus zwei Stoffen, so wird die chemische Zusammensetzung durch eine einzige Veränderliche  $c$  angedeutet, die den Prozentgehalt der Legierung an einem Stoff angibt. Die Menge des zweiten Stoffes ist dann gleich  $100 - c$ . Ist die Legierung aus drei Stoffen aufgebaut, so treten an Stelle von  $c$  zwei Veränderliche  $c_1$  und  $c_2$  usw. Während  $c$  und  $t$  durch Zahlenwerte gekennzeichnet werden können, ist der Einfluß der Vorbehandlung nicht ohne weiteres zahlenmäßig ausdrückbar. Der Einfluß von  $b$  auf die Zahlenwerte der Eigenschaften  $q$  ist aber in der Regel recht beträchtlich.

Wählt man z. B. eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung von 1% Kohlenstoff und untersucht ihre Eigenschaften bei gewöhnlicher Temperatur  $t = 20\text{ C}^\circ$ , so sind die Größen  $c$  (Prozentgehalt an Kohlenstoff = 1) und  $t$  unveränderlich. Die einzige Veränderliche, von der die Eigenschaften  $q$  der Legierung abhängig sind, ist die Vorbehandlung  $b$ . Die Eigenschaft  $q$ , z. B. die Zugfestigkeit, ist wesentlich verschieden, je nachdem, ob die Legierung vorliegt als gegossener Block, als gegossener oder geglühter Block, als geschmiedeter oder gewalzter Stab, oder als gewalzter bzw. geschmiedeter und nachträglich geglühter Stab, ferner je nachdem ob beim Glühen des Stabes die Abkühlung durch die Temperatur  $700\text{ C}^\circ$  langsam oder sehr rasch vor sich ging usw.

Wählt man dieselbe Legierung mit 1% Kohlenstoff und verfolgt ihre Eigenschaften in einem ganz bestimmten Behandlungszustand, beispielsweise innerhalb einer und derselben geschmiedeten Stange, bei verschiedenen Temperaturen  $t$ , so sind die Größen  $c$  und  $b$  als Unveränderliche zu betrachten,  $q$  hängt nur noch von der Veränderlichen  $t$  ab. Die untersuchte Eigenschaft  $q$ , z. B. die Zugfestigkeit, wird bei verschiedenen Temperaturen verschieden sein. Die Abhängigkeit läßt sich dann durch eine Schaulinie darstellen mit der Temperatur als Abszisse und dem Ausmaß der untersuchten Eigenschaft  $q$  als Ordinate. Die Schau-

linie soll als  $t, q$ -Linie bezeichnet werden. Würde man nun auch noch die Behandlungsweise  $b$  veränderlich machen, dadurch, daß man die Legierung in verschiedenen Zuständen der Vorbehandlung (gegossen, geschmiedet usw.) der Untersuchung unterwirft, so wird man im allgemeinen ebensoviel Schaulinien  $t, q$  erhalten, als man verschiedene Behandlungszustände  $b$  hat.

Schließlich kann man auch  $b$  und  $t$  unveränderlich halten und nur  $c$  ändern lassen. Dies würde z. B. möglich sein, wenn man verschiedene Legierungen des Eisens mit dem Kohlenstoff mit steigenden Gehalten  $c$  an Kohlenstoff in möglichst gleicher Vorbehandlung auf irgendeine Eigenschaft, z. B. Zugfestigkeit bei unveränderlicher Temperatur untersucht. Die Vorbehandlung  $b$  könnte beispielsweise dadurch einigermaßen unverändert erhalten werden, daß man die verschiedenen Legierungen zu Blöcken gleicher Abmessungen in möglichst gleich bleibender Weise gießt, die Blöcke auf Stangen gleicher Abmessungen bei möglichst gleicher Endtemperatur herabschmiedet oder -walzt und nach dem Schmieden oder Walzen in möglichst gleicher Weise abkühlt. Man würde dann die Abhängigkeit der betreffenden Eigenschaft  $q$  von dem Kohlenstoffgehalt  $c$  ermitteln und eine Schaulinie erhalten, in der die Zusammensetzung  $c$  als Abszisse und die gemessene Eigenschaft  $q$  als Ordinate eingetragen ist, also eine  $c, q$ -Linie, die für einen bestimmten Behandlungszustand  $b$  und eine bestimmte Temperatur  $t$  gültig ist. Werden  $b$  und  $t$  anders gewählt, so erhält man auch andere Schaulinien  $c, q$ .

Wenn in diesem Buch über die Temperatur  $t$  keine nähere Angabe gemacht wird, so ist gewöhnliche Temperatur von etwa  $20\text{ C}^\circ$  verstanden.

## 1. Einfluß der chemischen Zusammensetzung.

**284.** Es ist im allgemeinen unmöglich, im voraus sichere Schlüsse auf die Eigenschaften einer neuen, noch unbekanntenen Legierung zu ziehen, die aus zwei oder mehreren Metallen mit bekannten Eigenschaften nach bestimmter Vorbehandlung hergestellt ist. Jedenfalls darf man nicht in den Fehler verfallen, nach der Mischungsregel die Eigenschaften der Legierung aus den Eigenschaften ihrer Bestandteile errechnen zu wollen. Nach früherem (209, 210) wäre dies nur denkbar für additive Eigenschaften. Es gibt aber nur wenige Eigenschaften, die additiv sind, jedenfalls sind es nicht die technisch wichtigen Eigenschaften.

Es ist z. B. nicht von vornherein zu erwarten, daß man durch Zusammenschmelzen von 70 Gewichtsteilen des weichen Kupfers und 30 Gewichtsteilen des noch weicheren Zinns eine Legierung erzielen kann, die sich wegen ihrer Sprödigkeit pulvern läßt und fast so hart wie Glas ist. Ähnliche Beispiele lassen sich in großer Menge anführen.

Diese Tatsache, die für den Erfinder neuer Legierungen natürlich eine Erschwerung seiner Tätigkeit bedeutet, ist aber andererseits von hervorragendem technischen Werte. Gerade dadurch, daß man durch Legieren zweier oder mehrerer Stoffe Legierungen von ganz wesentlich verschiedenen Eigenschaften zu erzeugen imstande ist, kann man metallische Stoffe herstellen, die in ihren Eigenschaften für ihren besonderen Verwendungszweck besonders abgestimmt sind. Diese Möglichkeit erklärt auch den Umstand, daß nur in wenigen Fällen die reinen Metalle, viel häufiger dagegen ihre Legierungen als Baustoffe Verwendung finden. Die meisten reinen Metalle sind verhältnismäßig weich und von geringer Festigkeit. Dadurch, daß man sie mit anderen Stoffen legiert, bekommt man Baustoffe von höherer Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Beanspruchungen. Man verwendet daher an Stelle des reinen Eisens seine Legierungen mit Kohlenstoff, an Stelle des reinen Kupfers seine Legierungen mit Zinn oder mit Zink, oder mit Zinn und Zink zugleich.

Es gibt einige allgemeine Regeln, die als Anhalt zu einer ungefähren Vorstellung von der Änderung der Eigenschaften der Metalle durch Legierung mit anderen Stoffen dienen können. Sie werden bei den einzelnen Eigenschaften in den späteren Abschnitten erwähnt werden. Um aber ein sicheres Urteil über das Maß der Änderung und über die Art der zu erzielenden Eigenschaften zu erlangen, ist man immer auf den unmittelbaren Versuch angewiesen, indem man die chemische Zusammensetzung der Legierung ändert und die dadurch bedingten Änderungen der Eigenschaften in möglichst genau festgelegten und gleichbleibenden Behandlungszuständen bestimmt. Die Ergebnisse lassen sich dann in Form einer Schaufläche auftragen.

Die chemische Zusammensetzung der Legierungen wird durch die chemische Analyse festgelegt. Es ist aber zu berücksichtigen, daß etwaige Seigerungserscheinungen zu falschen Analysenergebnissen und dadurch zu einer unrichtigen Bewertung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung auf die Eigenschaften einer Legierungsgruppe führen. Man hat sich deswegen durch nebenhergehende Gefügeuntersuchung von der Gleichmäßigkeit der Verteilung der einzelnen Gefügebestandteile zu überzeugen.

Zur Erläuterung sei folgendes Beispiel angeführt: Zwei kaltgereckte Kupferschienen *A* und *B* zeigten verschiedenes Verhalten beim Biegen. Die Probe *A* ertrug das Umbiegen um einen bestimmten Winkel, die Probe *B* dagegen riß beim Biegen ein, wie in Abb. 249. Der Gehalt an Kupferoxydul war auf Grund der chemischen Analyse in *A* etwas höher als in *B*; im übrigen war die chemische Zusammensetzung beider Kupfersorten fast die gleiche. Man würde hier bei unvorsichtiger Schlußfolgerung zu dem Glauben haben kommen können, daß das oxydulreichere Kupfer das biegungsfähigere wäre. Die Beobachtung des Gefüges zeigt sofort den Irrtum. Der etwas geringere durchschnittliche Oxydulgehalt in Kupfer *B* war nämlich außerordentlich ungleichmäßig in der Masse verteilt. Längs der in Abb. 249 mit *e* angedeuteten Linien waren die Oxydulschlüsse in Form von Schnüren, wie in Tafelabb. 59, Taf. XII, rechts in 123facher Vergrößerung dargestellt, sehr stark angereichert, während die übrigen Teile des Kupfers nur sehr wenig Oxydul enthielten. Längs dieser Oxydulschnüre platzte nun das Kupfer beim Biegen so auf, wie es Abb. 249 andeutet.

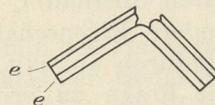


Abb. 249.

In manchen Fällen werden die Eigenschaften von Legierungen auch durch solche Stoffe sehr wesentlich beeinflusst, die sich der chemischen Analyse entziehen oder ihr mindestens erhebliche Schwierigkeiten entgegenstellen, z. B. geringe Mengen von Gasen, Sauerstoffgehalt im Eisen usw.

In anderen Fällen versagt die chemische Analyse deshalb, weil sie die Gesamtmenge eines in der Legierung enthaltenen Stoffes richtig angibt, aber unentschieden läßt, in welcher Form er auftritt. So gibt z. B. die Analyse den Phosphorgehalt in Schweiß Eisen zwar richtig an; sie vermag aber keine Auskunft darüber zu geben, ob dieser Phosphor als Phosphorsäure in der vom Eisen eingeschlossenen Schweißschlacke oder im Eisen selbst mit diesem legiert auftritt. Bis zu einem gewissen Grade vermag hier die Gefügeuntersuchung helfend einzugreifen.

## 2. Einfluß der Vorbehandlung.

285. Die Vorbehandlung kann eine reine Wärmebehandlung sein, z. B. Gießen, Glühen, verschiedenartige Abkühlung von höheren Wärmegraden (langsame Abkühlung, rasche Abkühlung, plötzliches Abschrecken in Flüssigkeiten usw.), oder sie ist eine rein mechanische Behandlung, die auf Formgebung durch

Umlagerung der Masse des Stoffes im festen Zustande bei gewöhnlichen Wärmegraden beruht, und die wir als Kaltrecken bezeichnen (264). Hierher gehören z. B. alle Arbeiten wie Kaltwalzen, Kaltziehen, Kalthämmern, Kaltdrücken, Prägen usw. Schließlich können auch Wärme- und mechanische Behandlung ineinandergreifen, wie z. B. bei den Formgebungsarbeiten durch Umlagerung der Masse des Stoffes im festen Zustand bei höheren Wärmegraden, die wir unter der allgemeinen Bezeichnung Warmrecken zusammenfassen wollen. Hierher gehören das Warm Schmieden, Warmwalzen, Warmpressen usw.

Die Vorbehandlung beeinflußt vor allem das Gefüge, und zwar die Zahl und Art der Gefügebestandteile, ihre Anordnung und ihre Eigenschaften. Die mannigfaltige Beeinflussung des Gefüges der Legierungen beim Guß, bei der Erhitzung und Abkühlung, beim Warm- und Kaltrecken ist bereits im vorigen Abschnitt besprochen worden (255 bis 282). Wesentlichen Aufschluß über die Möglichkeit der Eigenschaftsänderung von Legierungen durch Wärmebehandlung geben die *c, t*-Bilder. Zeigen diese z. B. an, daß eine Legierung von einer bestimmten Zusammensetzung bei einer bestimmten Temperatur eine Umwandlung erleidet, so ist zunächst festzustellen, mit welcher Geschwindigkeit die Umwandlung bei der Umwandlungstemperatur  $t_u$  beim Erhitzen und bei der Abkühlung vor sich geht, ob es möglich ist, die Umwandlung durch rasche Abkühlung von Temperaturen oberhalb  $t_u$  ganz oder teilweise zu unterdrücken und dadurch der Legierung andere Eigenschaften zu erteilen, als wenn sie langsam durch die Temperatur  $t_u$  hindurch abkühlt. Bei *c, t*-Bildern, die Mischkristallbildung andeuten, wird man die Frage zu erörtern haben, ob durch schnellere Abkühlung (oder auch Erhitzung) unvollkommene Gleichgewichte in der erstarrten Legierung herbeigeführt werden können, und in welcher Weise dadurch die Eigenschaften der Legierungen geändert werden (135, 136 usw.).

Die Vorbehandlung kann auch ohne Beeinflussung des Gefüges wesentliche Änderungen in den Eigenschaften der Metalle und Legierungen hervorrufen. Wenn z. B. Werkstücke von verhältnismäßig großer Masse von hohen Wärmegraden abgekühlt werden, so können verschiedene Teile desselben Werkstücks zu gleichen Zeiten verschiedene Temperaturen besitzen. Dadurch werden Spannungen erzeugt (324 bis 338). Spannungen können auch durch Kaltrecken von metallischen Stoffen hervorgebracht werden (301 bis 307).

Mit der Wärme- oder mechanischen Vorbehandlung kann beabsichtigte oder unbeabsichtigte Änderung der chemischen Zusammensetzung verbunden sein. Glüht man z. B. Eisen in einer kohlenstoffhaltigen Umgebung, so nimmt es von der Oberfläche her Kohlenstoff auf. Umgekehrt kann man durch Erhitzen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen an der Luft oder in oxydierenden Gasgemischen den Kohlenstoffgehalt an der Eisenoberfläche vermindern. Derartige Wirkungen sind rein chemischer Art und sind auf Grund der Kenntnis des Einflusses der chemischen Zusammensetzung auf die Eigenschaften der Legierung mit zu berücksichtigen.

### 3. Einfluß der Temperatur.

286. Die Eigenschaften der metallischen Stoffe ändern sich mit der Temperatur. So ist z. B. der Widerstand von Eisen und Kupfer gegenüber Formgebung durch Schmieden und Walzen bei höheren Wärmegraden (Rotglut) wesentlich geringer als bei gewöhnlicher Temperatur, was man schon seit den ältesten Zeiten praktisch ausnutzt. Die Änderung der Eigenschaften der metallischen Stoffe im festen Zustand in Abhängigkeit von der Temperatur kann stetig sein. Es können aber auch plötzliche Änderungen der Eigenschaften bei stetig ge-

änderter Temperatur vorkommen, wenn z. B. die Legierung bei einer bestimmten Temperatur Umwandlung erleidet. Solche Unstetigkeiten können aber auch auftreten, ohne daß Umwandlungspunkte nachzuweisen sind. So zeigt z. B. beim Eisen die Schaulinie, die die Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Temperatur angibt, starke Unregelmäßigkeiten zwischen 100 und 400 C° (Blauwärme, II B), obwohl innerhalb dieses Temperaturintervalls bis jetzt keine Umwandlung nachgewiesen ist.

Zur Erläuterung ähnlicher Erscheinungen kann man sich vorstellen, daß auch innerhalb einer und derselben Phase von der Temperatur und vom Druck abhängige Gleichgewichte zwischen verschiedenen Molekül-gattungen herrschen. Über diese Gleichgewichte sagt die Phasenlehre unmittelbar nichts aus. Man könnte sich z. B. eine einheitliche flüssige Phase des Stoffes  $M$  als homogenes Gemisch der Molekül-gattungen  $M + M_n + M_m + \dots$  vorstellen. Bei einer Temperatur  $t$  und einem bestimmten Druck  $p$  könnte dann das Gleichgewicht gebildet sein aus  $n$  Gewichtsteilen der Molekül-gattung  $M_n$ ,  $m$  Teilen der Molekülart  $M_m$  und  $1 - n - m$  . . Teilen der Molekülart  $M$ . Bei Änderung der Temperatur und des Druckes würde ein neues Gleichgewicht eintreten, in dem die Gewichtsmengen der einzelnen Molekülarten verändert sind. Ähnliches könnte auch in festen Lösungen (Mischkristallen) vorkommen, oder in Phasen, die aus einem chemisch einheitlichen Stoffe, ja sogar aus einem chemischen Elemente gebildet sind. Mit dieser Änderung des Gleichgewichtes innerhalb der Phase (inneres Gleichgewicht) könnten natürlich auch die Eigenschaften der Phase und des aus ihr gebildeten Systems wesentliche Änderungen erfahren,

Ich bin absichtlich auf dieses Gebiet nicht näher eingegangen, weil die wissenschaftlichen und experimentellen Unterlagen vorläufig noch zu dürftig sind, und deshalb bei der Erörterung solcher Erscheinungen der Phantasie breiter Spielraum gewährt wird.

Die Änderung der Eigenschaften der metallischen Stoffe mit der Temperatur ist für den Konstrukteur namentlich dann von großer praktischer Bedeutung, wenn der aus dem Stoff hergestellte Gebrauchsgegenstand bei höheren Wärme-graden (Stehbolzen, Dampfkesselteile, Dampfleitungen usw.) oder bei sehr niedrigen Temperaturen (Eisenbahnachsen im Winter) Dienst leisten soll.

---