

Aceros para las indus -
trias químicas.

Stahle für die chemische Industrie

Von

Dr. Fr. Rittershausen

Vortrag, gehalten auf der Hauptversammlung des Vereins deutscher Chemiker, Stuttgart 1921, in der gemeinsamen Sitzung der Fachgruppen.

Sonderabdruck aus der „Zeitschrift für angewandte Chemie“ Jahrgang 34, Nr. 63 vom 9. August 1921,
Aufsatzteil, Seite 413 ff.

Eigentum des Vereins deutscher Chemiker, E. V. — Redakteur Prof. Dr. B. Rassow, Leipzig, Nürnberger Str. 48 I.

Stahle für die chemische Industrie.

Vortrag von Abteilungsdir. Dr. FR. RITTERSHAUSEN, Essen, gehalten auf der Hauptversammlung des Vereins deutscher Chemiker, Stuttgart 1921, in der gemeinsamen Sitzung der Fachgruppen.

Meine Herren! Die technischen Eigenschaften des Stahles sind in den letzten 30 Jahren zu hoher Vervollkommenung und Vielseitigkeit entwickelt worden. Die Erfolge wurden durch Legierung und thermische andlung erzielt und durch die Erforschung des Gefüges der Legierungen mit neuzeitlichen Mitteln chemisch-physikalischer Methoden bedeutend gefördert. Aus der theoretischen Befassung mit den Legierungen entwickelte sich eine selbständige neue Wissenschaft, die Metallographie. Ich werde einleitend die wesentlichen metallographischen Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und Gefügebau der Stahle unter dem Einfluß thermischer Vorgänge kurz streifen, Ihnen darauf einen Überblick über die wichtigsten mechanischen



Abb. 1. Flußeisen mit weniger als 0,1% Kohlenstoff, gegläht. 100 ×

Eigenschaften der Stahle, die beim Bau Ihrer technischen Anlagen und Apparate in Frage kommen, geben und dann über den Widerstand von Stählen gegen verschiedene Arten korrodierenden Angriffs berichten. Das Gefüge der Stahle besteht nach ihrer Erstarrung oberhalb isser hoher Temperaturen aus Mischkristallen einer homogenen festen Lösung von Kohlenstoff und anderen Legierungselementen in Eisen. Bei langsamer Abkühlung unter diese Temperaturen erfolgt bei Kohlenstoffstählen oder unlegierten Stählen ein Zerfall der Lösung, der auf der Löslichkeitsveränderung des bei der Abkühlung verschie-

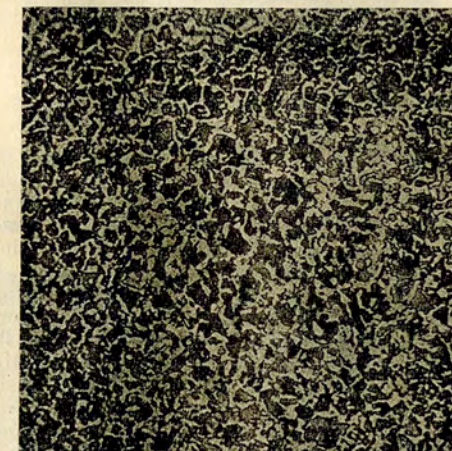


Abb. 2. Stahl mit 0,5% Kohlenstoff, gegläht. 100 ×

denen Modifikationsänderungen unterworfenen Eisens für Kohlenstoff beruht. Es findet eine Reihe von Umwandlungen statt. Das Endglied derselben ist ein Gemisch eines weichen, kohlefreien Gefügebestandteils, Ferrit genannt, und eines harten, kohlenstoffreichen Körpers, des Eisencarbids Fe_3C , metallographisch Zementit genannt. In Stählen bis etwa 0,9% Kohlenstoff tritt das Carbid in Mischung mit dem Eisen als Eutektikum, metallographisch Perlit genannt, auf. Ich zeige Ihnen das in 100 facher Vergrößerung aufgenommene Bild des Feingefüges eines Flußeisens mit weniger als 0,1% C (Abb. 1). Die dunkel geätzten Flecken sind Perlit, die helle Grundmasse Ferrit. In dem folgenden Gefügebilde gleicher Vergrößerung eines Stahles

mit 0,5% C überwiegt bereits der Perlit an Menge den Ferrit (Abb. 2). Das nächste Bild des geätzten Schliffes eines Stahles mit 0,9% C zeigt in 600 facher Vergrößerung das nur aus Perlit bestehende Gefüge dieses Stahles (Abb. 3). Der buntschillernde Perlmutterglanz verschaffte diesem Gefüge die Bezeichnung Perlit¹⁾.



Abb. 3. Stahl mit 0,9% Kohlenstoff, gegläht; sein Gefüge besteht nur aus Perlit. 600 ×

Durch beschleunigte Abkühlung lassen sich die Umwandlungen teilweise unterdrücken, teilweise in tiefere Temperaturgebiete verschieben. Durch die hierbei eintretende plötzliche Ausdehnung in dem starren Metall entsteht Härtung, die von einer Kornverfeinerung begleitet ist. Die Härtbarkeit ist das hervorstechendste Merkmal des Stahles. Bestimmend für das Eintreten der Härtung sind die Umwandlungstemperaturen und die zur Unterdrückung der normalen Umwandlung ausreichende kritische Abkühlungsgeschwindigkeit. Beide werden durch Kohlenstoff erniedrigt, letztere jedoch nur in so beschränktem



Abb. 4. Austenitisches Gefüge eines geglähten 25%igen Nickelstahls. 300 ×

Maße, daß die Wirkung der Härtung bei Kohlenstoffstählen auch bei schroffster Abkühlung, z. B. in Eiswasser, nur auf geringe Tiefe beschränkt bleibt.

Durch Legierung von Mangan oder Nickel zum Stahl wird die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit verringert und die Umwandlungstemperatur erniedrigt. Bei genügend hoher Legierung kann die Umwandlungstemperatur bis unter Zimmertemperatur erniedrigt werden,

¹⁾ Während des Vortrags selbst war ein in natürlichen Farben auf Lumière-Platte aufgenommenes Bild (ebenfalls in 600 facher Vergrößerung) vorgezeigt worden.

so daß auch bei langsamem Erkalten ein Zerfall der festen Lösung nicht eintritt und das nur aus einem Gefügebestandteil, den homogenen Mischkristallen dieser Lösung, aufgebaute Gefüge erhalten bleibt. Es wird nach dem englischen Forscher Roberts-Austen Austenit genannt. Im nächsten Bilde (Abb. 4) sehen Sie in 300 facher Vergrößerung das austenitische Gefüge eines bekannten Vertreters dieser Stahlgruppe, des 25%igen Nickelstahls.

In anderem Legierungsgrade tritt bei langsamer Abkühlung die von Härtung begleitete Teilumwandlung ein. Das Gefüge dieser Stähle ist durch einen nadelichen Gefügebestandteil, nach Martens Martensit genannt, gekennzeichnet. Die Gefügeart tritt Ihnen in den beiden Abbildungen 5 und 6 in 300facher Vergrößerung entgegen; das Bild 5 zeigt das Gefüge aus der Randzone eines in Wasser gehärteten Kohlenstoffstahles, das Bild 6 das eines langsam erkalteten, martensitischen 12%igen Nickelstahls.

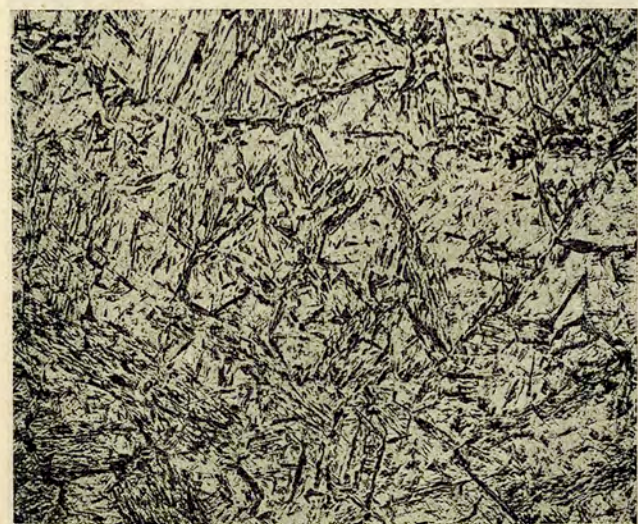


Abb. 5. Martensit der Randzone eines in Wasser gehärteten Kohlenstoffstahls.

Die martensitischen Stähle sind wegen ihrer Härte schlecht bearbeitbar und haben daher im allgemeinen keine technische Verwendung gefunden. Die austenitischen Stähle sind dagegen wegen besonderer physikalischer Eigenschaften mehrfach zu wissenschaftlicher und technischer Bedeutung gelangt. Bei hoher Zähigkeit besitzen sie nur geringe Streckgrenze. Sie sind nicht oder nur schwach magnetisierbar. Neben dem 25%igen Nickelstahl, der als rostwiderstandsfähiger Stahl später erwähnt werden wird, sind wegen ihrer Wärmeausdehnungskoeffizienten hervorzuheben: der 28%ige Nickelstahl mit dem

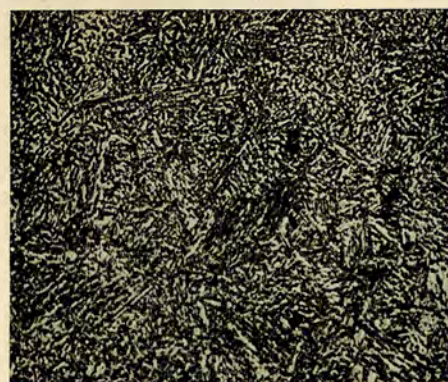


Abb. 6. Martensit eines langsam erkalteten 12%igen Nickelstahls.

Ausdehnungskoeffizienten des Gußeisens, der 36%ige Nickelstahl mit dem von allen Metallen kleinsten Ausdehnungskoeffizienten, der 45%ige Nickelstahl mit dem Ausdehnungskoeffizienten des Glases. Ein mit 36% Nickel und gleichzeitig mit Chrom legierter Stahl, den Krupp unter der Bezeichnung „WT 4“ herstellt, hat ebenfalls den Ausdehnungskoeffizienten des Glases und besitzt daneben hohen Widerstand gegen Oxydation auch bei hohen Temperaturen. Er eignet sich daher für Teile, welche in Glas eingeschmolzen werden sollen. Wegen seines hohen Widerstandes gegen die verschiedenen Arten der Abnutzung darf ferner der austenitische 12%ige Manganstahl nicht unerwähnt bleiben, welcher geschmiedet, gewalzt und in Form gegossen z. B. für Teile von Zerkleinerungsanlagen große Anwendung gefunden hat. Er ist nur durch Schleifen zu bearbeiten. Die Bezeichnung „Hartstahl“, welche sich für ihn eingebürgert hat, ist indessen nicht richtig ge-

wählt, weil er seine Nichtbearbeitbarkeit und hohen Widerstand gegen Verschleiß nicht seiner Härte, sondern seiner Zähigkeit verdankt.

Das größte allgemeine technische Interesse beanspruchen wegen ihrer hervorragenden Festigkeitseigenschaften diejenigen legierten Stähle, welche bei langsamer Abkühlung die normale Umwandlung erleiden. Sie zeigen dann das für die einfachen Kohlenstoffstähle typische, nach dem Leitbestandteil dieser Stähle, dem Perlit, perlitisch genannte Gefüge. Diese Gruppe liefert uns die besten Konstruktionsstähle. Die Verringerung der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit durch die Legierung bewirkt bei diesen Stählen eine Steigerung der Härtungstiefe bis zur ganz durchgreifenden Härtung selbst in großen Querschnitten auch bei weniger schroffer Abkühlung. An Stelle der Wasserhärtung kann die mildere Ölhärtung treten, wodurch gefährliche Spannungen vermieden werden. Dies hat weniger Bedeutung für das eigentliche Härten, z. B. von Werkzeugstahl, als für den wichtigsten Prozeß zur Veredelung von Konstruktionsstahl, Vergütung genannt. Die Vergütung besteht in einer Härtung des Stahles gewöhnlich in Öl, wodurch eine Verfeinerung seines Kornes bewirkt wird, und einem Ausglühen oder Anlassen unterhalb der Härtetemperatur, wodurch die Härte zum großen Teil wieder aufgehoben, aber eine Steigerung seiner Elastizität und Zähigkeit erreicht wird. Vorbedingung für die Veredelung durch Vergütung ist eine durchgreifende Härtung; da diese bei Kohlenstoffstählen aber nur in kleinsten Querschnitten zu erzielen ist, wird auf die Anwendung des Vergütungsprozesses hier gewöhnlich verzichtet.

Die Kohlenstoffstähle, auf welche der Konstrukteur noch vor 30 Jahren allein angewiesen war, sind auch heute noch die vorwiegend verwendeten Konstruktionsstähle. Die Festigkeitseigenschaften der geschmiedeten

Festigkeitswerte von geschmiedeten oder gewalzten Kohlenstoffstählen im geglähten Zustand

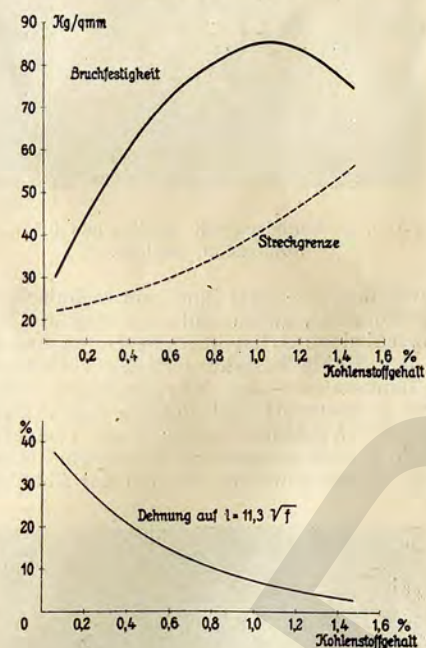


Abb. 7.

oder gewalzten und dann geglähten Stähle sind in diesem Schaubild (Abb. 7) zur Darstellung gebracht. In dem Diagramm sind die Kohlenstoffgehalte als Abszissen, die Werte der Bruchgrenzen, Streckgrenzen und Dehnungen als Ordinaten verwendet. Die Festigkeitswerte sind mittlere Erfahrungswerte, die dem Einfluß schwankender Gehalte stets vorhandener Nebenbestandteile, wie Mangan, Silicium, Phosphor usw., Rechnung tragen. Die Bruchfestigkeit des C-ärmsten hüttenmännischen Erzeugnisses beträgt nur etwa 30 kg/qmm bei 40% Dehnung. Es ist ein Sonderzeugnis der Firma Krupp, welches im Kriege dazu rufen war, die kupfernen Geschößführungsbänder zu ersetzen. Dieses fast chemisch reine Eisen hat sich auf vielen Gebieten als Ersatz für Kupfer wegen seiner Weichheit, Zähigkeit und Duktilität bewährt, so unter anderem für Dichtungszwecke z. B. zwischen Eisen- und Stahlflanschen, wo Kupfer wegen der verschiedenen Wärmeausdehnungen oft versagte. Die C-ärmeren weichen Stähle bis 45 kg/qmm Bruchfestigkeit, Flußeisen genannt, zeichnen sich durch gute Zähigkeit und Schweißbarkeit aus. Sie finden Verwendung für Bleche, nahtlos gezogene Rohre, Schrauben, Muttern und für Konstruktionsteile, bei denen die Zähigkeit eine größere Rolle spielt als die Elastizität und Festigkeit. Die von der chemischen Industrie oft gestellte Anforderung an die höchste Gasdichte der Flußeisensorten wird durch geeignete Maßnahmen bei der Herstellung erfüllt. Die mittelhartesten Stähle von 45–70 kg/qmm Bruchfestigkeit dienen hauptsächlich zur Herstellung von Schmiedestücken für die verschiedensten Teile maschineller Anlagen und Apparate. Die Stähle höherer Festigkeit finden wegen ihrer geringen

Zähigkeit aber nur noch da Verwendung, wo hoher Widerstand gegen Verschleiß, wie bei Getriebeteilen oder Teilen von Zerkleinerungsmaschinen, oder wo hohe elastische Eigenschaften, wie bei Federn, ausschlaggebend sind. Mit zunehmendem C-Gehalt steigt die Bruchfestigkeit bis zu einem Maximum von etwa 85 kg/qmm bei einem Stahl mit etwa 0,9% Kohlenstoff, dessen Gefüge nur aus Perlit besteht. Bei weiter steigendem C-Gehalt nimmt die Bruchfestigkeit wieder



Abb. 8. Feingefüge von ungeglühtem Stahlguß.

ab, die Härte der Stähle aber zu. Wir erkennen hierin die Wirkung des im Gefüge auftretenden Zementits.

Kohlenstoffstähle bis etwa 60 kg/qmm Bruchfestigkeit finden als geformte Gußstücke in der chemischen Industrie vielseitige Ver-



Abb. 9. Feingefüge von geglähtem Stahlguß.

wendung. Zur Verfeinerung des groben Gußgefüges und zur Beseitigung innerer Spannungen wird bei Stahlformguß ein Glühverfahren angewendet, wodurch die Kornfeinheit geschmiedeten Stahles zwar nicht erreicht, aber eine wesentliche Verbesserung der

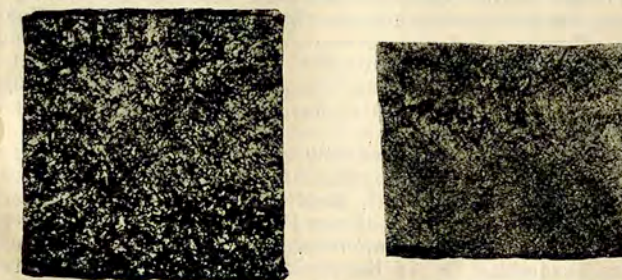


Abb. 10. Links: Rohbruch von ungeglühtem Stahlguß; rechts: Rohbruch von geglähtem Stahlguß. (Beide Bilder sind auf etwa 1/5 der nat. Größe verkleinert.)

Zähigkeit erzielt wird. Die Wirkung dieses Glühens erkennen Sie in den beiden Feingefügebildern (Abb. 8 und 9) in 50facher Vergrößerung von ungeglühtem und geglähtem Guß, und ebenso in den entsprechenden beiden Bildern (Abb. 10) des Bruchgefüges.

Die veredelnde Wirkung des Nickels hat den nickellegierten Stählen den hervorragendsten Platz unter den Konstruktionsstählen verschafft. Unsere höchstwertigen Konstruktionsstähle sind aber

weniger die reinen Nickelstähle als die gleichzeitig mit Chrom legierten. Durch Nickelzusatz wird die die Vergütung bedingende Härtewirkung erhöht. Bei einem Zusatz von etwa 5% Nickel wird sogar in den größten vorkommenden Schmiedequerschnitten eine vollkommene Durchhärtung erzielt. Ein Vergleich der beiden Kleingefügebilder (Abb. 11 und 12) in 200facher Vergrößerung von einem Kohlenstoffstahl und einem 5%igen Nickelstahl, beide mit 0,2% C, beide aus großen



Abb. 11. Feingefüge eines geglähten Kohlenstoffstahls mit 0,2% C.

Schmiedestücken gleicher Abmessung, zeigt, welche außerordentliche Verfeinerung das Gefüge eines Stahles durch Legierung mit Nickel und durch Vergütung fähig ist. In den nächsten beiden Bildern (Abb. 13) von dem Bruchgefüge beider Stähle erkennen Sie ebenfalls

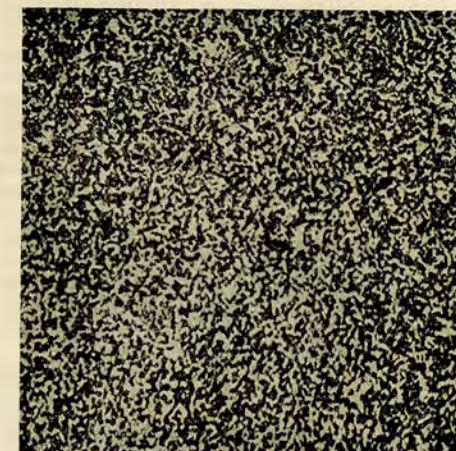


Abb. 12. Feingefüge eines vergüteten Nickelstahls mit 0,2% C u. 5% Ni.

einen charakteristischen Unterschied. Die Bilder zeigen die Bruchflächen von 200 mm Rundstangen, welche eingekerbt unter einer Biegepresse durchgebrochen wurden. Während der Kohlenstoffstahl eine kristalline, spaltbare Struktur aufweist, hat der Bruch des

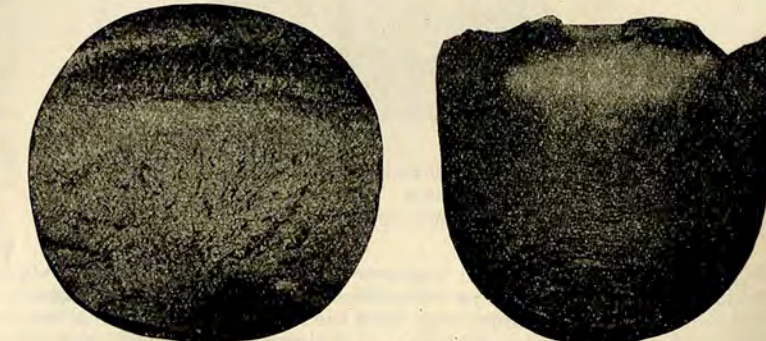


Abb. 13. Links: Rohbruch eines geglähten Martinstahls; rechts: Rohbruch eines vergüteten 5%igen Nickelstahls. (Die Stücke hatten in Wirklichkeit einen Durchmesser von 200 mm.)

Nickelstahles ein feines, fast amorphes, als sehnig bezeichnetes Aussehen. Diese Sehne ist das untrügliche Zeichen hoher Zähigkeit. In den Festigkeitswerten beider Stähle drückt sich die Wirkung des Nickels in der Erhöhung der Streckgrenze von etwa 25 auf 45 kg/qmm und der Bruchgrenze von etwa 45 auf 60 kg/qmm aus.

Chrom wirkt auf die Abkühlungsgeschwindigkeit erniedrigend, ähnlich wie Nickel, ohne aber die Umwandlungstemperatur herabzudrücken. Die Vergütbarkeit des Nickelstahls wird deshalb durch den Hinzutritt von Chrom noch erleichtert. Dieselbe Veredlung, welche in dem eben angeführten Fall auf den Zusatz von 5% Nickel zurückzuführen war, läßt sich z. B. auch durch Legierung mit nur 3% Nickel und 1% Chrom erreichen. Dazu haben die Chromnickelstähle den Vorzug größerer Wandelbarkeit ihres Gefüges unter dem Einfluß thermischer Behandlung, wodurch ihre Festigkeitseigenschaften innerhalb weiter Grenzen abgestimmt werden können. Bei Chromnickelstählen werden Streckgrenzen bis 180 kg/qmm erreicht. Die Ausnutzung ihrer hohen elastischen Eigenschaften findet oft erst da eine Grenze, wo die maschinelle Bearbeitbarkeit der Stähle aufhört.

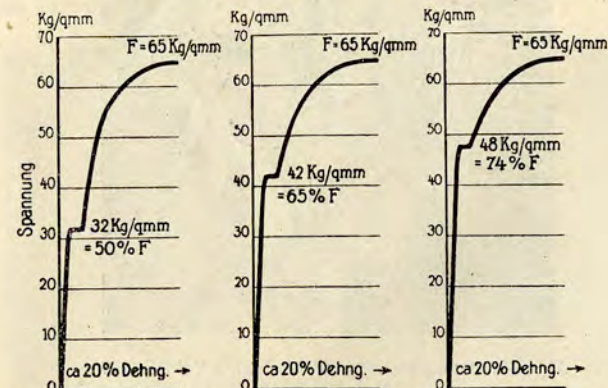


Abb. 14. Von links nach rechts: Spannungs-Dehnungsdiagramme eines Kohlenstoffstahls, eines Manganstahls und eines Chromnickelstahls.

Mit abnehmenden Querschnitten kann der Zusatz von Nickel zur Erzielung derselben Veredlung herabgesetzt werden. In kleinen Querschnitten vermag schon ein Chromzusatz allein hohe Veredlung hervorzurufen.

Auch mit Mangan und Silicium legierte Konstruktionsstähle finden Verwendung, wenn weniger auf hohe Zähigkeit als auf die Verbesserung der elastischen Eigenschaften des Stahles Wert gelegt wird. Wolfram- und Molybdänstähle wirken ähnlich wie Chrom, jedoch werden Wolfram- und Molybdänstähle wegen der hohen Preise dieser Metalle in Deutschland als Konstruktionsstähle nur selten angewendet. Die gelegentlich erscheinenden Veröffentlichungen z. B. über hervorragende

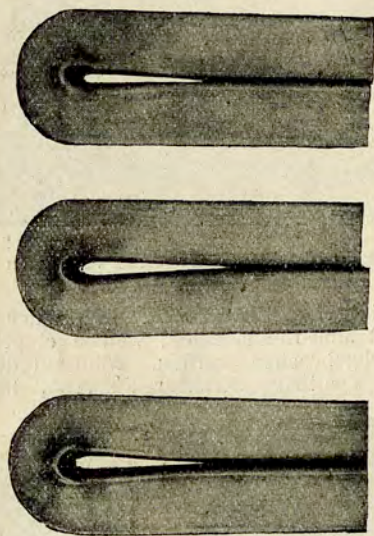


Abb. 15. Ungekerbte Biegeproben aus denselben Stählen zeigen keinerlei Unterschied.

Eigenschaften mit Molybdän legierter Konstruktionsstähle sind als Reklame von Kreisen, die an dem Absatz von Molybdän interessiert sind, anzusehen. Hierunter fallen auch die in Fach- und Tagesblättern, besonders des Auslandes, zahlreich erscheinenden Veröffentlichungen über Vanadinstähle und neuerdings über Zirkonstähle. Durch Vanadium wird zwar bei geringen Zusätzen von nur 2/10 bis 3/10% die Streckgrenze des Stahles erheblich erhöht, ungefähr ebenso wie durch Zusatz von 1 bis 2% Chrom. Die in der Zähigkeit zum Ausdruck kommende Veredlungswirkung von Nickel und Chrom vermag aber Vanadium bei weitem nicht zu bewirken. Dabei beträgt der Marktpreis des Vanadiums heute etwa das Zwanzigfache des Preises für Chrom und das Fünfzigfache des Preises für Nickel. Für die Her-

stellung von Werkzeugstahl, besonders für schnellarbeitende Werkzeuge, sind aber Wolfram und Vanadium als Legierungsbestandteile von größter Bedeutung.

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Stähle werden zahlreiche Prüfungsmethoden angewandt. Die wichtigste und verbreitetste ist der Zug- oder Zerreißversuch, welcher uns die Zahlenwerte der Streckgrenze, Bruchfestigkeit, Dehnung und Einschnürung liefert. Diese Werte werden an prismatischen oder zylindrischen Stäben unter langsamer Steigerung der Belastung bei unbehinderter Auswirkung der Dehnung gewonnen. Der Zugversuch gibt daher keinen Anhalt für die Widerstandsfähigkeit eines Baustoffes plötzlich auftretender dynamischer Beanspruchung und bei behinderter Dehnung. Hierüber geben Biegeversuche an eingekerbten Stäben Aufschluß. Kerben behindern die Dehnung und zwingen den Baustoff, seine Formänderung unter schroffem Anschwellen der Spannungen im Kerbgrunde im verringerten Räume zu vollziehen. Die Biegung erfolgt entweder durch eine stetig wirkende Kraft oder durch einen Schlag.

Das Bild 14 zeigt Ihnen die beim Zugversuch aufgenommenen Spannungs-Dehnungsdiagramme von einem Kohlenstoffstahl, einem Manganstahl und einem Chromnickelstahl. Die Bruchfestigkeiten und Dehnungen der drei Stähle sind so gut wie gleich, nur die Streckgrenzen liegen verschieden hoch. Die allmählich durchgebogenen ungekerbten Stäbe im nächsten Bilde (Abb. 15) lassen noch keinen Unterschied in der Biegefähigkeit der drei Stähle erkennen. Dagegen

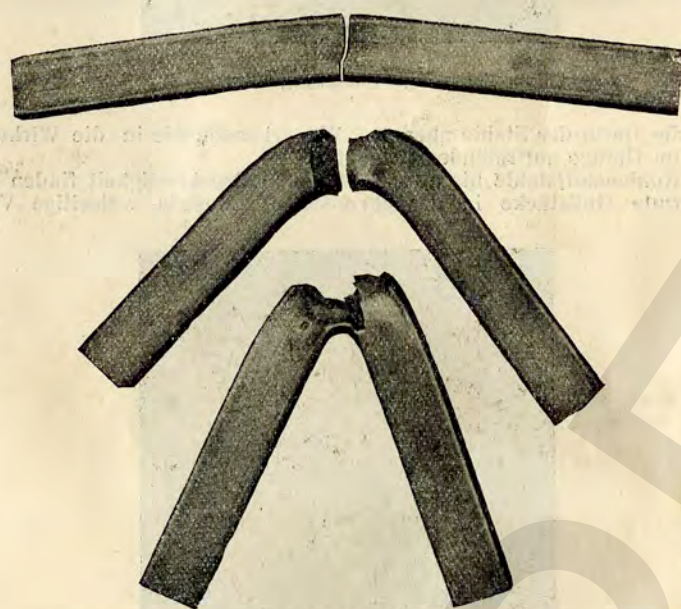


Abb. 16. Gekerbte Biegeproben aus denselben Stählen. Oben: Kohlenstoffstahl; Mitte: Manganstahl; unten: Chromnickelstahl.

zeigen die ebenfalls allmählich durchgebogenen, aber vorher scharf eingekerbten Stäbe in dem nun folgenden Bilde (Abb. 16) ein ganz verschiedenes Verhalten. Während der Kohlenstoffstahl schon bei nur 13° Biegewinkel plötzlich durchbrach, ertrug der Manganstahl eine Durchbiegung von 100°, der Chromnickelstahl sogar von 140° bis zum Bruch. Im nächsten Bilde (Abb. 17) endlich sehen Sie eingekerbte und unter einem Schlagwerk durch einen Schlag zu Bruch gebrachte Proben, Kerbschlagproben genannt. Das Schlagwerk gestattet die Messung der zum Durchschlagen aufgewandten Arbeit. Der Kohlenstoffstahl erforderte bei ganz geringer Durchbiegung 4 mkg Schlagarbeit auf je 1 qcm Querschnitt der Probe, der Manganstahl bei größerer Durchbiegung 12 mkg, der Chromnickelstahl bei noch größerer Durchbiegung sogar 28 mkg, also das 7fache der Schlagarbeit des Kohlenstoffstahles²⁾.

Man ersieht hieraus, wie wichtig es ist, für die Bewertung von Konstruktionsstählen gegen stoßartige Beanspruchungen, besonders bei gleichzeitiger Kerbwirkung, sich nicht allein auf die Ergebnisse von Zugproben zu stützen; so kam in den Dehnungswerten die überlegene Zähigkeit der legierten Stähle, besonders des Chromnickelstahles, nicht zum Ausdruck. Da in Konstruktionen kerbwirkende Formen, wozu alle schroffen Querschnittsübergänge und einspringende Winkel zu rechnen sind, nur selten umgangen werden können, sind kerbzähe Stähle, z. B. für den Bau von Apparaten, in denen hoher Überdruck

²⁾ Anmerkung: Kerbschlagproben ergeben nur dann untereinander vergleichbare Werte, wenn die Proben hinsichtlich ihrer Abmessungen, Kerbform, Auflagerentfernung und sonstiger Einzelheiten der Prüfmethode genau übereinstimmen. Im vorliegenden Falle sind sämtliche Zahlen an Proben von 30 x 30 mm Querschnitt und 160 mm Länge mit einem 4 mm Rundkerb ermittelt, entsprechend den Normen des Deutschen und Internationalen Verbandes der Materialprüfungen der Technik.

unter Umständen explosionsartig auftreten kann, von größter Bedeutung.

Die Gefahr kerbwirkender Formen reicht aber noch weiter. So können Beanspruchungen, welche bei vereinzelter Auftreten keine meßbaren Formänderungen hervorrufen, bei großer Zahl von Wiederholungen Anrisse oder Brüche zur Folge haben. Die Anrisse gehen fast immer von Kerben aus und die Gefahr ihres Auftretens ist besonders groß, wenn der Spannungsangriff sich unter dauerndem Richtungswechsel vollzieht. Derartige Brüche, Dauerbrüche genannt, werden mit Unrecht oft mangelnder Zähigkeit des Stahles zur Last gelegt. Sie sind nur auf ungenügende Elastizität zurückzuführen.

In den meisten Konstruktionen werden die Abmessungen so gewählt werden können, daß auch bei Verwendung unlegierter Stähle mit den diesen Stählen zukommenden Eigenschaften hinreichende Sicherheit gegenüber den vorkommenden Beanspruchungen gewährleistet ist. Wenn hierin jedoch Beschränkungen bestehen und unbedingte Betriebssicherheit gefordert werden muß, so ist zu entscheiden, ob große Sicherheit gegen Bruch durch katastrophale Wirkungen, oder hohe Lebensdauer gegenüber Dauerbeanspruchungen, oder beides gefordert werden muß. Die dann zu verwendenden Baustähle müssen im ersten Falle hohe Kerbzähigkeit, im zweiten hohe Streckgrenze, im dritten hohe Kerbzähigkeit und Streckgrenze besitzen.

Die chemischen Prozesse erfordern besonders aber auch Baustoffe, welche neben guten mechanischen Eigenschaften hohen Widerstand gegen chemischen Angriff besitzen. Die Widerstandsfähigkeit einer

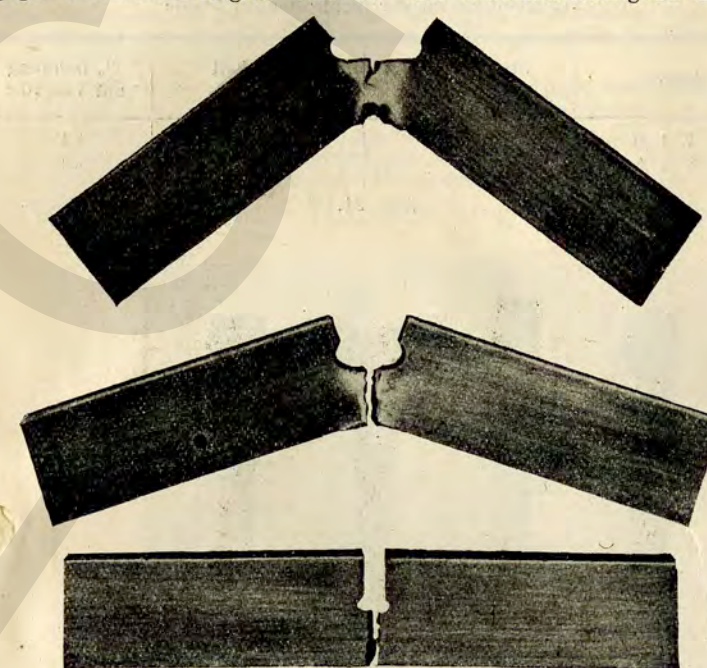


Abb. 17. Kerbschlagproben aus denselben Stählen. Oben: Chromnickelstahl mit einer Kerbzähigkeit von 28 mkg/qcm. Mitte: Manganstahl „ „ „ 12 „ „ „ „ „ 12 „ „ „ „ „ 4 „ „ „ „ „ 4 „ „

Legierung gegen den Angriff chemischer Agentien ist überwiegend bestimmt durch die Eigenschaften der die Legierung bildenden Metalle.

Wenn man dem Eisen nur etwa 5% Nickel hinzulegiert (Abb. 18), erhält man eine Legierung, die sehr widerstandsfähig gegen kochende alkalische Laugen ist. In noch höherem Maße zeigt der 25%ige Nickelstahl diese Eigenschaft, wie das Schaubild erkennen läßt. Die Unangreifbarkeit des Nickels bewirkt also schon durch geringen Zusatz dieses Metalles zum Eisen eine erhöhte Widerstandsfähigkeit der Legierung gegen die chemische Einwirkung der Laugen. Nickel, mit etwa 25% dem Eisen legiert, überträgt auch seine Widerstandskraft gegen den korrodierenden Einfluß des Wassers auf die Legierung. So wurde der 25%ige Nickelstahl lange als sehr rostbeständiger Stahl verwendet. Gegen die gleichzeitige Einwirkung von Wasser- und von Luftsauerstoff hält er jedoch auf längere Dauer nicht Stand.

Zur Lösung des Korrosionsproblems wurde schon früh empfohlen, die Passivität des Chroms gegenüber atmosphärischen Einflüssen und dem Angriff oxydierender Säuren nutzbar zu machen. Borchers und Monnartz nahmen 1910 ein Patent auf Eisenlegierungen mit hohem Chromgehalt bei gleichzeitigem Molybdängehalt, welche hohe chemische Widerstandsfähigkeit besonders gegen Salpetersäure, auch bei Gegenwart von Alkalichlorid, mit guter mechanischer Bearbeitbarkeit verbunden. Nach diesem von der Firma Krupp erworbenen Patent werden Legierungen mit 30—40% Chrom und 2—3% Molybdän hergestellt. Bei diesen Legierungen ist jedoch die Warmformgebung äußerst schwierig und die Zähigkeit für viele Zwecke ungenügend, so daß ihre Verwendung sehr beschränkt geblieben ist. Diesem Mangel wurde durch Arbeiten der chemisch-physikalischen Versuchsanstalt der Firma Krupp im Jahre 1912 abgeholfen. Es wurde dort

gefunden, daß man durch Zusatz von Chrom und Nickel in bestimmtem Mischungsverhältnis Stahllegierungen erhalten kann, die den hochprozentigen Nickelstahl in bezug auf Widerstand gegen Korrosion und Einwirkung von Säuren bedeutend übertreffen, daß diese Legierungen gute Warmformbarkeit besitzen, die z. B. das Auswalzen dünnster Bleche gestattet, und daß diese Legierungen ferner ohne Schwierigkeiten mechanisch zu bearbeiten und vor allen Dingen durch gute Festigkeitseigenschaften ausgezeichnet sind.

Nach ihrem Gefügebau und ihren Eigenschaften gingen aus den Versuchen zwei Gruppen von Chromnickelstählen hervor, von denen die erste durch einen Chromzusatz von 10—15% und einen geringen Nickelgehalt, die zweite durch einen Chromzusatz von 18—40% neben 5—20% Nickel gekennzeichnet ist.

Versuchstemperaturen, zugleich Siedepunkte der verwendeten Laugen

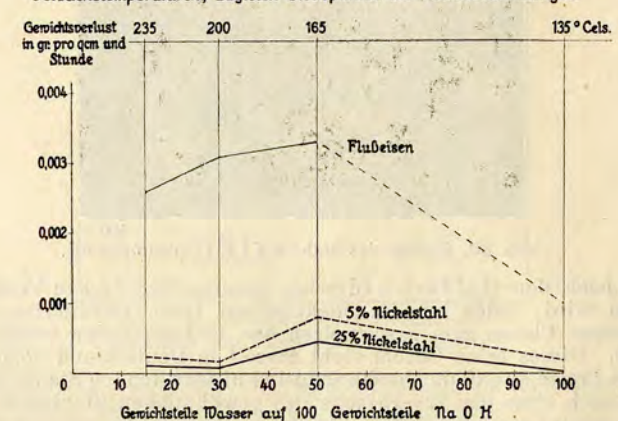


Abb. 18. Widerstandsfähigkeit gegen Laugen.

Die erste Gruppe liefert Konstruktionsstähle mit hoher Streckgrenze und Zähigkeit und für die praktischen Bedürfnisse genügender Rostsicherheit. Zu dieser Gruppe gehört die Stahlmarke V 1 M, die für hochbeanspruchte Maschinenteile und im Kriege im Unterseebootsbau Verwendung fand. Bei entsprechender Zusammensetzung können Stähle dieser Gruppe auch gehärtet werden. Sie finden dann Verwendung als Schneidwerkzeuge oder rostschwere Kugellager. Der von England in letzter Zeit auf den Markt gebrachte rostfreie Stahl, der zwar kein Nickel enthält, entspricht sonst in seiner Zusammensetzung dem Kruppschen Stahl dieser Gruppe.

Die zweite Gruppe ist durch hohen Widerstand gegen Korrosion und durch Säurefestigkeit, insbesondere gegen Salpeter- und schweflige Säure, ausgezeichnet. Der markante Vertreter dieser Gruppe ist die Stahlmarke V 2 A, aus der während des Krieges außer vielen anderen Einrichtungen über 600 Kreispumpen zur Förderung von Salpetersäure hergestellt wurden.

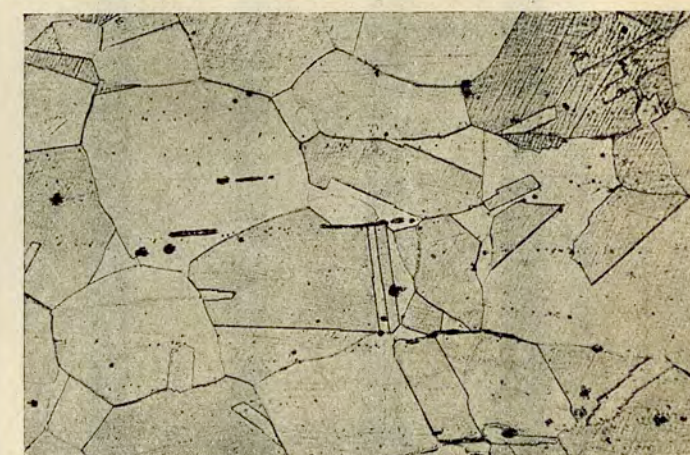


Abb. 19. Gefüge des Stahles V 2 A (Austenit).

Die rostschweren Stähle werden in geschmiedeten und gewalzten Stangen, als geschmiedete Formstücke, als Blech, Band, Draht im gepreßten und gezogenen Stücken, sowie Gußstücken aller Art geliefert.

Von den vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten der Stahlmarke V 2 A seien erwähnt: autogen aus Blechen geschweißte Rohre oder Gefäße, Kolbenstangen, Plunger, Ventile für strömende Gase und Dämpfe, Gewichtssätze für chemische Laboratorien, kalorimetrische Bomben zur Heizwertbestimmung der Kohlen usw.

Das zur Erzeugung der nichtrostenden Stähle nötige Chrommetall wird aus ausländischen Erzen gewonnen. Bei der einfachen und billigen Verhüttung der Chromerze wird ein Metall erschmolzen,

welches bis etwa 8% Kohlenstoff enthält und wegen seines hohen Kohlenstoffgehaltes für die Herstellung der nichtrostenden Chromnickelstähle untauglich ist. Man muß ein kohlenstofffreies Chrom,

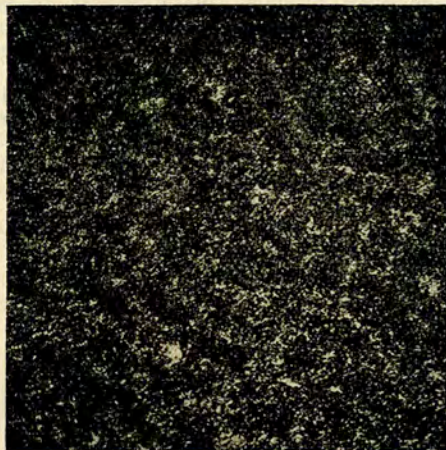


Abb. 20. Gefüge des Stahles V1M (Troost-Sorbit).

wie es nach dem Goldschmidtschen aluminothermischen Verfahren erhalten wird, oder ein im elektrischen Ofen raffiniertes, sehr kohle-armes Chrom zum Erschmelzen der nichtrostenden Stähle verwenden. Dieses reine Chrom steht zurzeit in Deutschland noch sehr hoch im Preise, so daß die hochwertigsten nichtrostenden Stähle gegenwärtig noch etwa das 12–15fache des gewöhnlichen Stahles kosten. Hierin scheint ein erfreulicher Wandel bevorzustehen, der den nichtrostenden Stählen ein größeres Feld der Verwendung eröffnen wird.

Die beiden Gruppen rostsicherer Chromnickelstähle erfordern zur Entwicklung der ihre besten Eigenschaften bedingenden Gefügeart wesentlich verschiedene Wärmebehandlung. Die Wärmebehandlung und das Anwendungsgebiet der Stähle ist der Firma Krupp patentrechtlich geschützt.

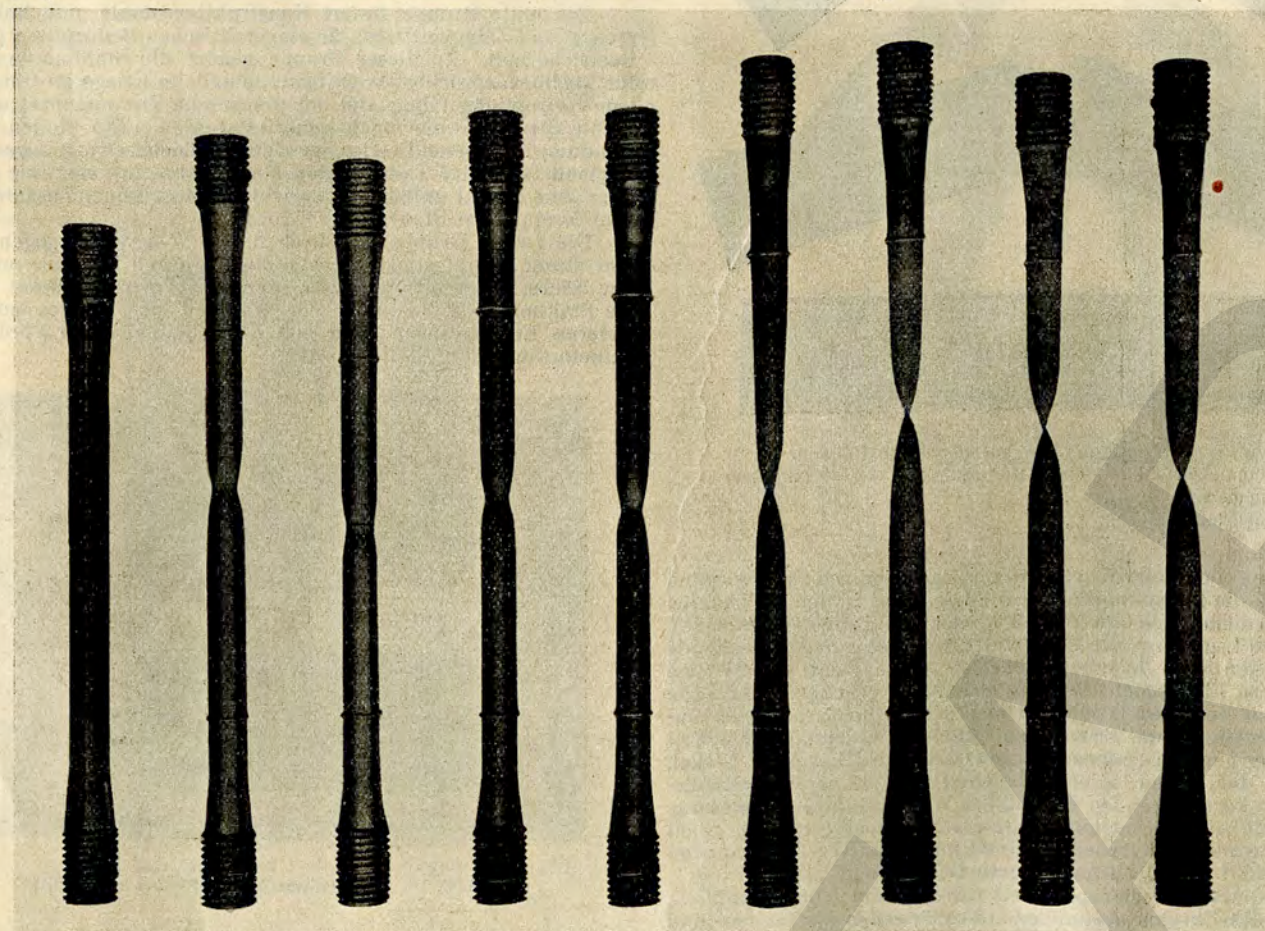
Das Feingefüge der Stähle der V2A-Gruppe ist, wie Sie aus dem Bilde (Abb. 19) in 300facher Vergrößerung ersehen, austenitisch, wie das Ihnen früher gezeigte Gefüge des 25%igen Nickelstahles. Das austenitische Gefüge besteht aus homogenen Mischkristallen, es ist, wie schon erwähnt, aus nur einem Gefügebestandteil aufgebaut. Dieser durch die Abwesenheit karbidischer Bestandteile gekennzeichneten Gefügeform verdanken neben der Legierung die Stähle der V2A-Gruppe ihre Säurefestigkeit. Wie alle austenitischen Stähle haben die Stähle der V2A-Gruppe zwar hohe Zähigkeit, aber eine niedrige Streckgrenze. Konstruktiven Zwecken sollen daher die Stähle der V1M-Gruppe dienen, deren als Troost-Sorbit bezeichnetes Gefüge Sie im folgenden Bilde (Abb. 20) ebenfalls in 300facher Vergrößerung sehen. Im Troost-Sorbit sind karbidische Gefügebestandteile vorhanden, aber in ultramikroskopisch feiner Anordnung verteilt.

In der Tafel (Abb. 21) sind die Festigkeitswerte der Stähle V1M und V2A zusammengestellt. V1M hat, wie Sie aus den Zahlenwerten ersehen, die Festigkeitseigenschaften eines hochwertigen Konstruktionsstahles.

Festigkeitszahlen der nichtrostenden Stähle

Marke	Streckgrenze kg/qmm	Festigkeit kg/qmm	% Dehnung auf l = 10 d
V 1 M	65	80	14
V 2 A	38	80	46

Abb. 21.



KOHLENSTOFF-STAHL „A4“

Temperatur	20°	200°	300°	400°	500°	600°	800°	1000° Cels.
Streckgrenze	34	27	19	16	12	2	—	— kg/mm ²
Festigkeit	44,0	53,4	48,1	42,0	24,4	4,7	1,6	1,1 kg/mm ²
Dehnung	21,0	13,4	24,7	26,7	40,6	42,2	36	38%
Kontraktion	64	51	63	68	95	99	100	100%

Die Zerreißversuche sind bei den angegebenen Temperaturen ausgeführt worden. Durchmesser der Proben = 20 mm; Meblnge = 200 mm.

Abb. 22. Warmzerreiproben aus Kohlenstoffstahl.

Bei höheren Temperaturen nimmt die Festigkeit eines Stahles stark ab, und zwar erfolgt dieser Abfall in weit höherem Maße bei Kohlenstoffstählen als bei legierten Stählen. Durch verhältnismäßig geringen Abfall sind die rostsicheren Chromnickelstähle ausgezeichnet, wie der Vergleich der beiden folgenden Bilder lehrt.

Das erste Bild (Abb. 22) zeigt Zerreißproben eines Kohlenstoffstahles, die bei Temperaturen von 20° bis 1000° zerrissen wurden. Der Stahl hatte bei Zimmertemperatur eine Festigkeit von 44 kg/qmm und eine Streckgrenze von 34 kg/qmm, bei 600° nur noch eine Festigkeit von 4,7 kg/qmm und eine Streckgrenze von nur noch 2 kg/qmm. Die Zerreißprobe hat sich zu einer vollständigen Spitze ausgezogen.

Das zweite Bild (Abb. 23) zeigt eine ebensolche Zerreiprobenserie aus dem Stahl V2A der austenitischen Gruppe. Obgleich hier die Streckgrenze bei Zimmertemperatur nicht viel höher ist als bei dem Stahl A4J des vorigen Bildes (38 gegenüber 34 kg/qmm), beträgt sie bei 600° noch 18 kg/qmm, also das Neunfache der des Kohlenstoffstahles. Seine Festigkeit fällt von Zimmertemperatur bis 600° gleichfalls nur um etwa 23 kg/qmm bis auf den Betrag von 56,6 kg/qmm, eine Höhe, die sogar die Festigkeit des Kohlenstoffstahles im kalten Zustand (44 kg/qmm) noch um etwa 12 kg/qmm übertrifft.

Die folgende Zahlentafel (Abb. 24) gibt Aufschluß über die Rostbestndigkeit gemäß der relativen Gewichtsabnahme eines Flußeisens, eines 9%igen und eines 25%igen Nickelstahles und der zwei Kruppschen Chromnickelstähle V1M und V2A in freier Atmosphäre, also bei der Einwirkung von feuchter Luft, und auch in Seewasser, ferner eines Flußeisens, eines 5%igen und 25%igen Nickelstahles und des Chromnickelstahles V2A in 10%iger kalter und auch in 50%iger kochender Salpetersäure.

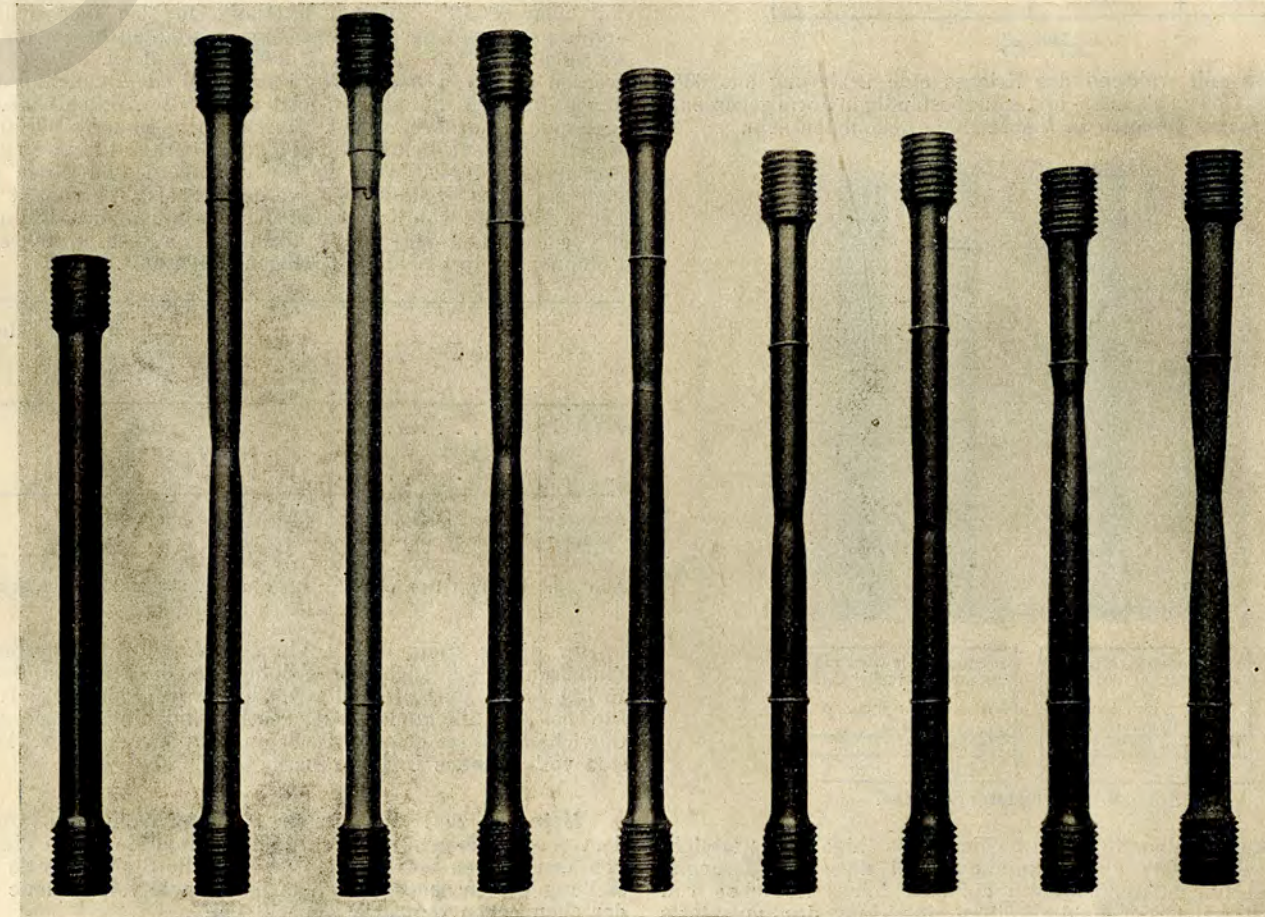
Das nächste Bild (Abb. 25) zeigt Ihnen vier Rundstäbe aus Flußeisen, aus 5 und 25%igem Nickelstahl und dem Chromnickelstahl V2A, welche 14 Tage dem Angriff 10%iger Salpetersäure von 20° C ausgesetzt waren. Die dabei aufgetretenen Gewichtsverluste in Gramm sind unter den Stäben vermerkt. V2A erwies sich hierbei als vollkommen säurefest.

Die hochlegierten Chromnickelstähle sind auch bei hohen Temperaturen gegen die Einwirkung von Gasen und Dämpfen beständig.

1. Rostung an der Luft		Gewichtsabnahme
Flußeisen	100	
9% Nickelstahl	70	
25% Nickelstahl	11	
V 1 M	0,4	
V 2 A	0	
2. Korrosion in Seewasser		
Flußeisen	100	
9% Nickelstahl	79	
25% Nickelstahl	55	
V 1 M	5,2	
V 2 A	0,6	
3. In Salpetersäure 10% kalt		
Flußeisen	100	
5% Nickelstahl	97	
25% Nickelstahl	69	
V 2 A	0	
4. In Salpetersäure 50% kochend		
Flußeisen	100	
5% Nickelstahl	98	
25% Nickelstahl	103	
V 2 A	0	

Abb. 24. Relative Gewichtsabnahmen.
(Abnahme von Flußeisen = 100 gesetzt.)

Mit steigendem Nickel- und Chromgehalt wächst die Widerstandskraft. Bei Erhtzung von Proben im Ofen unter Luftzutritt bei 1000° C wären nach 100 Stunden die Gewichtsabnahme



NICHT ROSTENDER SPEZIALSTAHL „V2A“

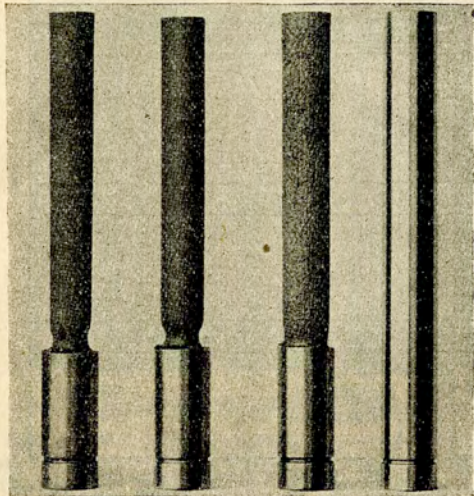
Temperatur	20°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	1000° Cels.
Streckgrenze	38	31	26	25	24	18	16	— kg/mm ²
Festigkeit	79,4	75,3	70,2	63,8	58,3	56,6	44,5	2,6 kg/mm ²
Dehnung	46,4	53,5	47,0	40,5	22,4	26,0	19,8	24,0%
Kontraktion	54	55	54	50	47	34	45	61%

Die Zerreißversuche sind bei den angegebenen Temperaturen ausgeführt worden. Durchmesser der Proben = 20 mm; Meblnge = 200 mm.

Abb. 23. Warmzerreiproben aus V2A-Stahl.

bei Flußeisen 416 g
„ V 2 A 6 g
bei Erhitzung bis 1200° nach 25 Stunden
bei Flußeisen 250 g
„ V 2 A 10 g.

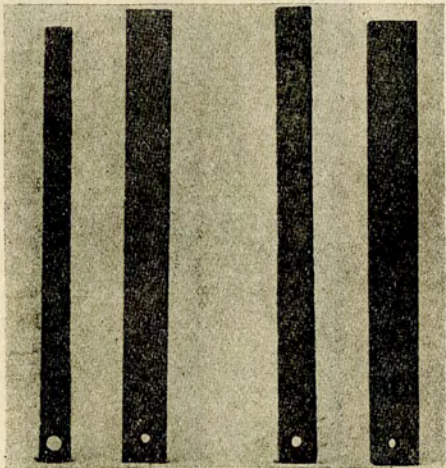
Die Abbildung 26 zeigt diese Proben.



14 Tage in 10prozentiger Salpetersäure von 20° Cels. Gewichtsabnahme in Gramm			
Flußeisen	5% Nickelstahl	25% Nickelstahl	„V 2 A“
221	216	153	0

Abb. 25.

In Amerika soll während des Krieges eine Legierung aus 60% Nickel und 40% Chrom als hitze- und säurebeständig in Form gegossener Kästen, Röhren und Gefäßen in Verwendung gekommen sein.



100 Stunden im Ofen mit Luftzutritt bei 1000° Cels. Gewichtsabnahme in Gramm		25 Stunden im Ofen mit Luftzutritt bei 120° Cels. Gewichtsabnahme in Gramm	
Flußeisen	„V 2 A“	Flußeisen	„V 2 A“
416	6	250	10

Abb. 26. Verzunderungsproben.

Hitzebeständige, aber nicht säurewiderstandsfähige Stähle erreicht man auch durch Zusatz von Aluminium. Bei diesen Legierungen bildet sich bei hohen Temperaturen ein sehr feines Häutchen von Aluminiumoxyd, welches gegen die weitere Einwirkung des Sauerstoffs

schützt. Die Firma Krupp stellt eine solche Legierung unter der Bezeichnung „Alit“ her. Das Bild (Abb. 27) zeigt Ihnen zwei Tiegel, links aus Alit, rechts aus Flußeisen. Beide Tiegel wurden 200 Stunden dem Angriff oxydierender Gase bei 950° C ausgesetzt. Der Alit-Tiegel wurde nicht sichtbar angegriffen, der Flußeisentiegel dagegen erlitt eine starke Verbrennung an der Oberfläche, wie die dicke Zunderkruste erkennen läßt.

Leider sind die schmiedbaren und bearbeitbaren hochlegierten



Abb. 27. Glühtöpfe aus „Alit“ (links) und Flußeisen (rechts), die 190 Stunden lang im Temperofen bei 950° C erhitzt worden waren.

Chromnickelstähle gegen Schwefelsäure und Salzsäure nicht widerstandsfähig. In diesen beiden Säuren sind nur Siliciumlegierungen mit mehr als 13% Silicium beständig, die sich aber nicht schmieden, sondern nur mit der Schleifscheibe bearbeiten lassen und die Festigkeitseigenschaften spröden Gußeisens besitzen. Diese Legierungen werden auch von Salpetersäure ohne und mit Alkalichloridzusatz nicht angegriffen, so daß sie bis jetzt allein als wirklich säurefeste Eisenlegierungen anzusehen sind. Durch ein besonderes Verfahren bei der Herstellung der Siliciumlegierung ist es Richard Walter gelungen, die Sprödigkeit dieses Materials zu verringern und einen gleichmäßig dichten Guß zu erhalten. Diese verbesserte als „Thermisilid“ bezeichnete Legierung wird von Krupp und der Maschinenfabrik Eßlingen als Guß in Form von Leitungs- und Kühlröhren, von Kesseln, Rührern, Pfannen, Kolonnen, Retorten und Heiztrögen hergestellt.

Gewichtsverlust	In kochender Schwefelsäure 1 : 10	In kochender Salzsäure 1 : 10
von Flußeisen	100	100
„ 25prozentigem Nickelstahl	5	10
„ Thermisilid	0,05	1
Absoluter Gewichtsverlust von Flußeisen in Gramm pro Stunde und 10qcm Oberfläche	4	2

Abb. 28. Relative Gewichtsverluste von Flußeisen, 25prozentigem Nickelstahl und Thermisilid.

In dieser Zahlentafel (Abb. 28) ist die Gewichtsabnahme eines Flußeisens, des 25%igen Nickelstahles und des Thermisilid in kochender 10%iger Schwefelsäure und in kochender 10%iger Salzsäure angegeben. Die bei der Siliciumlegierung Thermisilid eingetretene, sehr geringe Gewichtsabnahme erfolgte zu Beginn des Säureangriffs. Darauf stellte sich vollkommene Unangreifbarkeit ein.

Meine Herren! Ich bin am Schlusse meiner Ausführungen. dem engen Rahmen eines Vortrages sollten sie Ihnen ein Bild geben von den großen Fortschritten, welche die Stahlindustrie in der Herstellung wissenschaftlich und technisch wertvoller Stähle zum Nutzen der chemischen Industrie gemacht hat. [A. 102.]