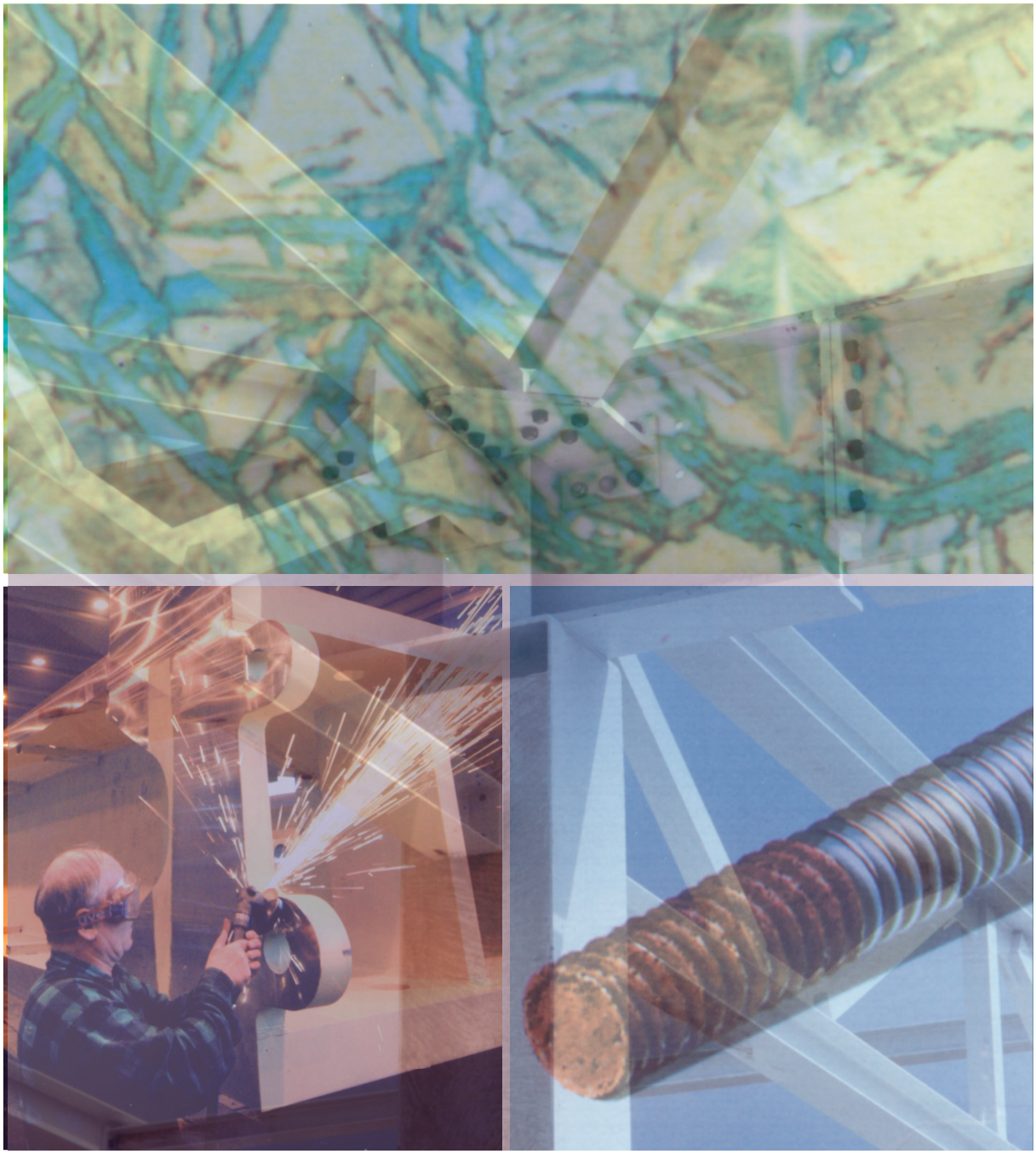
TECHNISCHE DOKUMENTATION

GEFÜGE UND EIGENSCHAFTEN



TD0050

fach - informations - portal - stahl

Institut für Werkstoffberatung

DR. MANFRED FEURER

fach - informations - portal - stahl
Institut für Werkstoffberatung

Chemnitzer Straße 6
D-64720 Michelstadt
T +49(0)60 61-70 30 12
F +49(0)60 61-70 63 144
kontakt@fips-werkstoff.com
www.fips-werkstoff.com

GEFÜGE UND EIGENSCHAFTEN

Autor:
Dr. Manfred Feurer

Auflage 2017
© Copyright by Werkstoffberatung fips
Michelstadt

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberpersönlichkeitsrechts ist ohne Zustimmung der Werkstoffberatung fips unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bitte Schutzvermerk nach DIN ISO 16016 beachten!

Technische Produktdokumentation – Schutzvermerke zur Beschränkung der Nutzung von Dokumenten und Produkten

INHALTSVERZEICHNIS

3. Gefüge und Eigenschaften von Stahl 7

3. 1 Einfluss der Eisenbegleiter 7

Kohlenstoff 8

Silizium 8

Mangan 8

Phosphor 8

Schwefel 9

Sauerstoff 10

Stickstoff 10

Wasserstoff 11

3.2 Legierungsbildung – Einfluss und Bedeutung der wichtigsten Legierungselemente im Stahl 14

Legierung 14

Allgemeine Wirkung der Legierungselemente in den Stählen 14

Chrom (Cr) 17

Nickel (Ni) 17

Silizium (Si) 17

Mangan (Mn) 18

Molybdän (Mo) 18

Aluminium (Al) 18

3.3 Eigenschaften der Metalle – insbesondere der Stahlwerkstoffe 19

Stahlwerkstoffe für besondere Beanspruchungen 19

Warmfestigkeit 20

Hitzebeständigkeit 20

Verschleißfestigkeit 20

Korrosionsbeständigkeit 21

Eigenschaften aufgrund der Anforderungen an den Werkstoff 21

Elektrische, akustische und thermische Leitfähigkeit 22

3.4 Zusammenfassung 24

3. GEFÜGE UND EIGENSCHAFTEN VON STAHL

3.1 EINFLUSS DER EISENBEGLEITER

Wie wir bereits erfahren konnten, nimmt das Eisen (Stahl) bei seiner Erschmelzung aufgrund seiner im flüssigen Zustand erhöhten Löslichkeit Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff auf. Diese Elemente können selbst bei sehr geringem Gehalt zu schwerwiegenden Versprödungserscheinungen führen, sie sind ebenso wie Phosphor und Schwefel für die meisten (aber nicht alle) Stähle als schädliche Begleitelemente anzusehen.

Unter dem Namen Eisenbegleiter fasst man all jene Stoffe zusammen, die bei der Herstellung des Werkstoffes Stahl meist unerwünscht sind und vom Eisen aufgenommen werden oder von Natur aus bereits im Eisen vorliegen. Es sind dies vor allem die Elemente:

- Kohlenstoff (C)
- Silizium (Si)
- Mangan (Mn)
- Stickstoff (N)
- Sauerstoff (O)
- Wasserstoff (H)
- Phosphor (P)
- Schwefel (S)
- nichtmetallische Einschlüsse

Auffallend und von besonderer Bedeutung ist, dass neben Schwefel und Phosphor sich auch einige gasförmige Stoffe in der Schmelze befinden.

Sie bewirken z.T. markante Eigenschaftsveränderungen und werden oft auch als Verunreinigungen bezeichnet, wenngleich dieser Name mit seiner negativen Belegung nicht immer zutreffend ist.

Manche Veränderungen sind erwünscht, sodass einige der Elemente absichtlich zugesetzt werden. Allerdings bezeichnet man sie dann als Legierungselemente, wie dies z. B. bei Silizium und Mangan der Fall ist.

Natürlich wird der Stahlhersteller versuchen, die unerwünschten Auswirkungen zu verhindern bzw. zu mindern, indem die verursachenden Eisenbegleiter auf bestimmte Höchstwerte begrenzt werden. Der Fachmann sagt dazu, den Stahl einstellen.

Im Folgenden sehen wir uns die Wirkung der einzelnen Eisenbegleiter einmal an.

Kohlenstoff

Dem Kohlenstoff soll an dieser Stelle ein nicht so großes Feld eingeräumt werden, da er bereits an anderer Stelle bzw. in den vorliegenden Technischen Dokumentationen (TD01, TD03) hinreichend besprochen wurde bzw. noch wird. Es wird an dieser Stelle daher nur ein kurzer Abriss gegeben.

Kohlenstoff ist in allen Stählen immer vorhanden und gilt als wichtigstes Begleitelement. Im Nichtrostenden Stahl ist er bei niedrigen Anteilen ein wichtiger Austenitbildner. C erhöht die Festigkeit im Stahl, muss jedoch bei austenitischen und ferritischen Stählen in geringen Bereichen gehalten werden, um die Korrosionsbeständigkeit nicht zu vermindern. In martensitischen Stählen erhöht er die Härtbarkeit sowie die maximale erreichbare Härte. Die Schweißbarkeit wird durch C negativ beeinflusst.

- C erniedrigt die Schmelztemperatur und die α-γ-Umwandlungstemperatur (G-S-Linie im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm)
- C erhöht die Zugfestigkeit und Streckgrenze, erniedrigt die Bruchdehnung und die Brucheinschnürung
- C ermöglicht das Abschrecken von Stahl
- C erniedrigt Wärmeleitfähigkeit und spezifisches Gewicht
- C verringert die Schweißbarkeit des Stahles durch Bildung von Härterissen

Silizium

Silizium wirkt als Desoxidationsmittel und wird als solches z.T. absichtlich zugesetzt. Allerdings verbindet es sich auch mit anderen Oxiden zu harten und spröden Silikaten, die beim Auswalzen zerbrechen und in Zeilen zu einem Fasergefüge auseinandergezogen werden. Silizium mindert die Kaltformbarkeit, Schmiedbarkeit und Schweißbarkeit. Härte und Festigkeit werden durch Silizium erhöht, die Zähigkeit bleibt weitgehend unbeeinflusst (siehe auch Silizium als „Legierungselement“ und „nichtmetallische Einschlüsse“).

Mangan

Mangan wirkt ebenfalls als Desoxidationsmittel, bewirkt aber auch wieder eine Faserstruktur mit unterschiedlichen Festigkeitswerten in Längs- und Querrichtung. Es ist ein starker Abfall der Zähigkeit quer zur Walzrichtung feststellbar, denn die sich bildenden Oxide werden nicht zerbrochen, sondern gestreckt.

Besonders interessant ist Mangan durch sein Eigenschaft, Eisensulfide (FeS) in Mangansulfide (MnS) umzuwandeln und so die Ursache für den Rotbruch zu beseitigen. Damit wird die Warmverformung des Stahlwerkstoffes begünstigt. Allerdings bewirkt auch Mangansulfid wieder das angesprochene Fasergefüge und eine Zähigkeitsänderung. Bei Hochbaustählen z .B. S355J2 bewirkt Mangan eine höhere Festigkeit und gute Schweißbarkeit.
(*siehe auch Mangan als „Legierungselement“ und „nichtmetallische Einschlüsse“*).

Phosphor

Phosphor gelangt im Wesentlichen über das Erz in das Roheisen. Er löst sich in der festen Eisenmatrix und verursacht eine Abnahme der Kerbschlagzähigkeit und eine Erhöhung der Übergangstemperatur in einem solchen Maß, dass generell, insbesondere aber im Hinblick auf rissfreies Schweißen oder Härten, möglichst niedrige Phosphorgehalte angestrebt werden. Außerdem trägt Phosphor zur Versprödung beim Anlassen bei. Die Zähigkeit wird allgemein herabgesetzt, und es können, besonders bei kleinen Kohlenstoffanteilen, Korngrenzbrüche auftreten. Positive Wirkungen

sind eine geringe Erhöhung der Rostbeständigkeit und der Verschleißfestigkeit.

Der Höchstgehalt an Phosphor beträgt in Baustählen nach DIN EN 10025 0,05 %, sowie in Qualitäts- und Edelstählen nach DIN EN 10083 nur 0,035 % (Schmelzanalyse). Nur in wenigen Fällen sind höhere Phosphorgehalte erwünscht, wie z.B. bei Automatenstählen. Bei diesen mittleren Gehalten ist zu beachten, dass Phosphor stark zum Seigern neigt und örtliche Konzentrationen, vor allem an Korngrenzen, deutlich über den genannten Werten liegen können. Nur durch sehr teure Glühzeiten (Diffusionsglühen) könne diese Konzentrationsnterschiede beseitigt werden.

Dass der chemische Reinheitsgrad auch für den Gefügereinheitsgrad (z. B. durch Seigerungen) mit verantwortlich ist, sei am Rande erwähnt.

Schwefel

Bei hohen Temperaturen ist Schwefel chemisch an das Eisen gebunden. Es liegt in Form von FeS als Sulfidschlacke vor und lagert sich beim Abkühlen an den Korngrenzen ab. Durch Seigerung kann sich Schwefel auch bei geringem Gesamtgehalt sammeln. Beim Schmieden kann es zu Heißbruch führen und bei einer Temperatur von 900° C zu Rotbruch. Folglich muss der Schwefelgehalt auf unkritische Werte abgesenkt werden. Automatenstähle benötigen aber Schwefel wegen des kurzbrüchigen Spans. Man gibt Mangan in die Schmelze, das nunmehr Mangansulfid (MnS) bildet. Dieses Mangansulfid hat den entscheidenden Vorteil, bei etwa 1500°C zu erstarren, sich also schon in der Schmelze zu bilden. Das Mangansulfid verteilt sich gleichmäßig in der Schmelze. Es kommt dadurch nicht zum Rotbruch. Andererseits lassen sich die MnS-Einschlüsse beim Walzen (Warmumformung) so gut strecken, dass der Stahl dadurch quer- empfindlich wird: Die Kerbschlag- und Bruchdehnungswerte quer zur Verformungsrichtung liegen wesentlich unter- den Längswerten. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig. In Verformungsrichtung bleiben sie praktisch unverändert, in Quer- und Normalrichtung zur Verformung können jedoch die Festigkeits- und Zähigkeitswerte stark abnehmen. Gegen die durch MnS-Zeilen hervorgerufene Anisotropie hilft entweder eine weitergehende Entschwefelung oder die Verwendung anderer S-affiner Elemente, die im Unterschied zu Mangan harte, nichtplastische Sulfide ausbilden. Hierfür kommen Zirkonium oder Cer in Betracht.

Bei den allgemeinen Baustählen nach DIN EN 10025 werden Schwefelgehalte bis 0,05%, bei Edelstählen bis 0,035% zugelassen. Da Schwefel in Stahl von allen Begleit- und Legierungselementen am stärksten seigert, ist für eine im ganzen Querschnitt sichere Schwefelabbindung ein beträchtlicher Mn-Überschuss erforderlich. Abschließend soll aber auch der günstige Einfluss eines gewissen Anteils an Mn-Sulfid im Gefüge von Stählen auf deren Zerspanungseigenschaften hervorgehoben werden.

Auswirkungen vom Gasen auf die Stahleigenschaften

Die gasförmigen Begleitelemente

- Sauerstoff
- Stickstoff und
- Wasserstoff

gelangen aus der Luft und aus feuchten bzw. oxidierten Einsatzstoffen in die Stahlschmelze und werden in dieser gelöst. Bei der Kristallisation nimmt ihre Löslichkeit beträchtlich ab. Die dadurch frei werdenden Gase entweichen

oder reagieren mit anderen Elementen, wobei gasförmige, flüssige oder feste Reaktionsprodukte entstehen. Diese entweichen ebenfalls oder gehen in die Schlacke, geringe Reste werden jedoch von der erstarrenden Schmelze eingeschlossen. Während der Abkühlung des festen Metalls nimmt dessen Löslichkeit für Gase in der Regel weiter ab, so dass weitere Gasatome aus dem Metallgitter austreten und über die Oberfläche entweichen oder weitere Verbindungen bilden oder sich an Korngrenzen, Einschlüssen oder Mikrolunkern zu Gasmolekülen vereinigen. Im folgenden werden einige wesentliche Erscheinungen, die durch Gase verursacht werden, betrachtet.

Sauerstoff

Durch das Frischen kommt Sauerstoff in den Stahl; es bildet sich FeO (Eisenoxid). Je niedriger der Kohlenstoffanteil gefrischt wird, umso höher liegt der Sauerstoffanteil. Er wirkt schon bei niedrigen Gehalten stark versprödend und muss daher entfernt werden.
Die Löslichkeit von Sauerstoff in geschmolzenem reinem Eisen beträgt etwa 0,2 %, sie nimmt während der Erstarrung auf etwa 0,005 % ab. Der somit freiwerdende Sauerstoff reagiert jetzt, wenn andere Elemente mit einer größeren Sauerstoffaffinität nicht da sind mit Eisen zu FeO (Eisenoxid).

Eisen, Eisenoxid (FeO) und insbesondere das in geringen Mengen immer vorhandene Eisensulfid (FeS) schwächt den Zusammenhalt der Körner, so dass der Stahl bei einer Warmverformung, besonders im Temperaturbereich zwischen 800°C und 1000°C (heller Rotglut) in seinen Korngrenzen aufreißt und bricht (Rotbruch).
Oberhalb 1000 °C ist ein vorsichtiges Schmieden und Walzen möglich, aber oberhalb 1200 °C kommt erneut Brüchigkeit beim Verformen vor (Heißbruch). Rot- und Heißbruch tritt bei einigen Sehr kohlenstoffarmen Stählen mit sehr niedrigen Gehalten an Begleitelementen auf, was bei der Weiterverarbeitung (Warmumformung) zu berücksichtigen ist. Auch beim Schweißen können die Korngrenzen in den Bereichen, die den oben genannten Temperaturen ausgesetzt sind, so geschwächt sein, dass sie unter dem Einwirken von Schrumpfspannungen beiderseits der Schweißnaht aufreißen (Schweißrissigkeit).

Man gibt deshalb hochschmelzende Metalle (Al, Si, Mn) mit hoher Sauerstoff-Affinität in die Schmelze. Diese Elemente nennen wir, wie bereits erwähnt, Desoxidationsmittel. Der Sauerstoff soll durch diese Mittel gebunden und als Schlacke abgeführt werden.

Je nach Art der Oxide und der Abscheidebedingungen wird ein gewisser Anteil der Desoxidationsprodukte als nichtmetallische Einschlüsse zurückbleiben. Eine Entgasung mittels Vakuumbehandlung, bei der ja keine festen Reaktionsprodukte entstehen, führt demnach zu einschlussärmeren, reineren Gefügen.

Stickstoff

Stickstoff ist ein sehr unangenehmer Eisenbegleiter. Stickstoff verursacht bei C-Gehalten ≤ 0,01%, die als Alterung bezeichnete Versprödung von Stahl. Da im Fall eines Sprödbruchs die frische Bruchfläche bei dieser Temperatur blau anläuft, wird die Versprödung bei 300°C auch als Blausprödigkeit bezeichnet.

Die durch Stickstoff verursachte Sprödbruchanfälligkeit von Stahl kann durch Abbinden des Stickstoffes mit einem entsprechend affinen Zusatz unterbunden werden. Es eignen sich hierfür insbesondere Aluminium, Titan und Niob. Diese Maßnahme führt nicht nur zu einem Verschwinden der Alterungsanfälligkeit, sondern

erzeugt auch sehr feine Ausscheidung, beispielsweise von Aluminiumnitrid AlN, die das Wachstum von Austenitkörnern hemmen und so eine feinkörnige Gefügeausbildung bewirken. Dies zieht eine niedrigere Übergangstemperatur, also eine verbesserte Zähigkeit nach sich.

Im Vakuum tritt eine Absenkung des Stickstoffgehaltes nur geringfügig ein, da die Stickstoffatome zu träge diffundieren. Er kann schon bei einem Gehalt von wenigen hundertstel Prozent den Stahl versprödeln. Nach einer Kaltumformung stickstoffhaltigen Stahls tritt die gefährliche Reckalterung auf, d.h. die im α-Gitter gelösten Stickstoffatome scheiden sich aus (Diffusion) und lagern sich an den Störstellen und Korngrenzen des Gitters ab. Die Gleitebenen werden blockiert, der Stahl versprödet und altert. Eine höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit (*siehe Technische Dokumentation TD06: Werkstoffprüfung*) sowie eine Verringerung der Bruchdehnung und der Kerbschlagzähigkeit sind die Folgen (*Abbildung 3.1*). Die Auswirkungen des Stickstoffs auf die Eigenschaften kohlenstoffarmer Stähle werden vor allem bei niedrigen Temperaturen sichtbar. Er verursacht im Verein mit dem Kohlenstoff die Abschreckalterung und die Reckalterung die nach Kaltverformung zu beobachten ist.

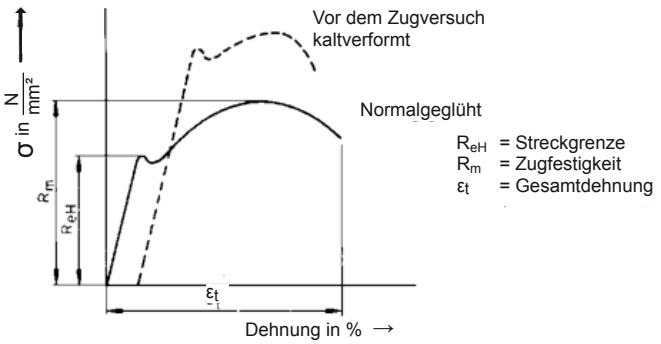


Abbildung 3.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stahles vor und nach der Kaltverformung

Die Reckalterung (Verformungsalterung) erfolgt bei Temperaturen zwischen 200 °C und 300 °C sofort, bei Raumtemperatur eventuell erst nach Wochen, Monaten oder gar Jahren. Sie lässt sich z.T. durch Desoxidieren mit Aluminium, Titan oder Niob unterdrücken (alterungsbeständiger Stahl) oder durch Rekristallisationsglühen. Grundsätzlich kann die Alterung nicht vollständig verhindert werden, da die Beseitigung des Stickstoffs aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar ist (*siehe auch Abschnitt: Alterung*). Elektro- und LD-Stähle altern (fast) nicht, da produktionsbedingt weniger Stickstoff im Stahl enthalten ist. Der Stickstoffgehalt ist daher ein guter Beurteilungsmaßstab für die Stahlqualität. In den Baustählen nach DIN EN 10025 beträgt der maximale Stickstoffgehalt nur 0,012 % (Schmelzanalyse). Die Verformungsalterung bewirkt einen außerordentlichen Zähigkeitsverlust und entsteht nur an kaltverformten Stählen.

Wasserstoff

Wasserstoff kommt durch feuchtes Beschicken und durch Verbrennungsgase in den Stahl. Wasserstoff besitzt eine sehr große Löslichkeit im Eisen. Wegen seiner geringen Größe bilden sich Einlagerungsmischkristalle, die den Werkstoff ebenfalls versprödeln (ohne wesentliche Abnahme der Festigkeit). Gasmoleküle – wie der Wasserstoff – müssen vor ihrer Lösung sowohl in einer Metallschmelze als auch im Metallgitter zu Atomen dissoziieren. Eine derartige Dissoziation von H_2-Molekülen findet an Eisen unterhalb von 300°C praktisch nicht mehr statt. Hingegen ist eine Wasserstoffaufnahme auch bei niedrigeren Temperaturen noch möglich, wenn sich der Wasserstoff an der Eisenoberfläche in Folge einer chemischen oder elektrochemischen Reaktion, also atomar entwickelt. Dies ist der Fall beim Säurebeizen, bei Wasser-

stoffkorrosion, bei kathodischem Reinigen oder galvanischem Beschichten (*siehe Technische Dokumentation: „Korrosion – Oberfläche“*).

In den vorliegenden Ausführungen in dieser Technischen Dokumentation über den Einfluss von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff auf die Stahleigenschaften wurde hauptsächlich von den durch den Schmelzprozess eingebrachten Gasmengen ausgegangen. Bei den Betrachtungen über die Auswirkungen des Wasserstoffes in der Technischen Dokumentation „Korrosion – Oberfläche“ werden auch die Fälle berücksichtigt, in denen Wasserstoffe über die Oberfläche in den Werkstoff gelangt, z. B. beim Glühen, beim Beizen oder beim galvanischen Abscheiden von Metallüberzügen. Die Vorgänge, die sich im Stahl abspielen, sind in allen Fällen im Prinzip ähnlich, unabhängig davon, wie der Wasserstoff in den Stahl gelangt ist. Die Erscheinungsformen können sich allerdings erheblich unterscheiden.

Überschüssiger Wasserstoff kann in Stahl zu spezifischen Rissbildungen und damit zu schwerwiegenden Schädigungen führen. Der schädliche Einfluss kann in zwei sehr unterschiedlichen Erscheinungen zutage treten.

- zum Einen in Form so genannter *Flockenrisse* in meist großen Schmiedeteilen vor allem aus niedriglegierten CrNi- oder CrMn-haltigen Stählen,
- zum Anderen in hochfesten Stählen als so genannte *Wasserstoffversprödung* oder besser *H-induzierte Rissbildung*

Unter Flocken versteht man rundliche innere Mikrorissbildungen von schneeflockenähnlichem Aussehen, die sich in einem H-haltigen warmverformten Teil beim Abkühlen im Temperaturbereich um 200°C abspielen.

Beim Abkühlen bilden sich Risse (Flockenrisse), welche die Kerbschlagarbeit verringern. Dabei sind kohlenstoffarme Stähle viel unempfindlicher als harte Stähle (Grenze bei ca. 0,2% Kohlenstoff). Beide Ursachen haben eine Senkung der Bruchdehnung und Zähigkeit und damit vorzeitigen Bruch des Materials zur Folge (Wasserstoffversprödung). Der tritt verstärkt bei großen Formaten auf, z. B. bei Schmiedeblöcken. Abhilfe ist außer durch ein langwieriges Glühen nur durch eine Vakuumbehandlung möglich.

Anfällig für Flockenrisse sind Chrom-, Nickel- und Manganstähle. Sie müssen langsam abkühlen, damit der Wasserstoff ausdiffundieren kann. Aufgrund des kleinen Teilchendurchmessers des Wasserstoffs ist bereits bei Raumtemperatur eine sehr hohe Diffusionsgeschwindigkeit möglich. Der Wasserstoff kann deshalb atomar auch von außen in das Gefüge eindringen (z.B. beim Beizen, d. h. bei der Rostentfernung mit Säuren). Gegenmaßnahmen sind Vakuumentgasen oder mäßiges Erwärmen auf 200°C bis 300°C (Ausdiffundieren des Wasserstoffs).

Nichtmetallische Einschlüsse

Bei den in einem Stahlgefüge vorhandenen nicht metallischen Einschlüssen oder Schlacken handelt es sich in erster Linie um die nicht mehr zur Abscheidung aus der Schmelze gelangten Desoxidations- und Entschwefelungsprodukte des Siliciums, Mangans und Aluminiums. Es sind also oxidische (SiO^2,MnO, Al^2O^3), sulfidische (MnS) und silicatische ($MO{\cdot}SiO^2$, MO = Metalloxid) Verbindungen. Außerdem können solche Einschlüsse auch aus der metallurgischen Schlacke stammen und beim Rühren oder Abgießen in die Schmelze gelangt sein.
Alle technischen Stähle enthalten somit nichtmetallische Verunreinigungen. Sie bilden Einschlüsse,

die sich auf die Werkstoffeigenschaften meist ungünstig auswirken.

Nur bei den Automatenstählen ist ein erhöhter Einschließgehalt zur Verbesserung der Zerspanbarkeit erwünscht.

Der Einfluss solcher in der Schmelze unlöslicher Einschlüsse auf die Stahleigenschaften hängt von deren Art und Menge, insbesondere aber auch von ihrer Teilchengröße, -form und –Anordnung ab. So kann das harte Al^2O^3 (Tonerde) in größerer Menge einen erheblichen Werkzeugverschleiß bei der zerspanenden Weiterverarbeitung nach sich ziehen. Im Fall stark gerichteter Warmverformung ordnen sich die Einschlüsse, allen voran das plastische Mn-Sulfid, zeilig an. Dieses Zeilengefüge wird häufig auch als Faser (Walz- und Schmiedefaser) bezeichnet. Die zeilige Anordnung wirkt sich hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit in Zeilen- bzw. Verformungsrichtung kaum, quer und vor allem senkrecht dazu jedoch je nach Ausprägung mindernd bis katastrophal aus. Gröbere Einschlüsse können bei dynamischer Beanspruchung besonders in hochfesten Gefügen zur Rissbildung führen. Schließlich wird die Polierbarkeit eines Stahls, die beispielsweise bei der Herstellung bestimmter Formwerkzeuge wichtig ist, entscheidend von seinem Gehalt an Einschlüssen bestimmt. Es ist einsichtig, dass solche Einschlüsse je nach Menge und Größe die Qualität einer polierten Oberfläche beeinträchtigen würden.

Die für Nichtmetallische Einschlüsse getroffenen Aussagen gelten weitgehend auch für „echte Gefügeeinschlüsse“, also z. B. carbidische Partikel. Dennoch besteht ein entscheidender Unterschied. Die Carbidteilchen sind in der Regel im austenitischen Matrixgefüge und dann auch bei der Warmverformung gelöst, werden folglich auch nicht zu Zeilen gestreckt. Vielmehr werden sie meist durch Wärmebehandlungen in eine für die angestrebten Eigenschaften günstige Form und Verteilung gebracht.

3.2 LEGIERUNGSBILDUNG – EINFLUSS UND BEDEUTUNG DER WICHTIGSTEN LEGIERUNGSELEMENTE IM STAHL

Die verschiedenen Stahlsorten sind Produkte, deren Eigenschaften durch eine ganze Palette von Legierungselementen bestimmt werden. Die wichtigsten Legierungselemente Chrom, Nickel, Silizium, Mangan, Molybdän, Wolfram und Aluminium werden nachfolgend in diesem Abschnitt steckbriefartig vorgestellt.

Eigenschaftsänderungen bei Eisenwerkstoffen werden beim Legieren mit Fremdatomen erzielt, indem man die vorgesehenen Legierungselemente in geeigneter Menge der Stahlschmelze zusetzt. Notwendig wird dies, wenn der Stahl im Einsatz erhöhten Beanspruchungen ausgesetzt werden soll (Korrosion; Hitze; Kälte; besonderen mechanischen, elektrischen Beanspruchungen usw.). Allerdings müssen bestimmte Eigenschaften in vielen Fällen auf Kosten anderer verbessert werden, weshalb oft erst die Kombination verschiedener Legierungselemente zum gewünschten Werkstoff führt.

Legierung

ist ein durch Zusammenschmelzen von zwei oder mehreren Elementen (auch Nichtmetallen wie Kohlenstoff, Silizium u.a.) gewonnenes Gemisch. Das Hinzulegieren soll die Eigenschaften des Grundwerkstoffes, wie in unserem Fall Stahl, in einer bestimmten und gewünschten Weise beeinflussen. Bei der Stahlherstellung werden Legierungselemente in Form von Ferrolegierungen, Legierungsmetallen oder auch legiertem Schrott zugefügt, um die verlangte chemische Zusammensetzung des Stahls und damit bestimmte Eigenschaften zu erreichen.

Bei rost-, säure- und hitzebeständigen Stählen z.B. beträgt der Anteil an hochwertigen Legierungszusätzen bis zu 30 % und darüber. Die Legierungsanteile müssen oft auf ein hundertstel Prozent – selbst bei Schmelzen bis zu mehreren Tonnen – eingehalten werden, um die gewünschte Qualität zu erreichen.

Allgemeine Wirkung der Legierungselemente in den Stählen

Mit wenigen Ausnahmen treten in den legierten Stählen die gleichen Gefügebestandteile auf wie in den unlegierten Stählen: Austenit, Ferrit, Martensit, Perlit usw. (siehe Technische Dokumentation TD03: Gefügeaufbau von Stahl). Meist werden Festigkeit oder andere Eigenschaften der Stähle bereits durch geringe Legierungszusätze verändert.

Ursache der Eigenschaftsveränderungen ist das Lösen der Fremdatome im Ferritgitter (Misch-kristallbildung). Dabei wird das Gitter verspannt. Legierungselemente erzeugen deshalb in den meisten Fällen einen größeren Widerstand gegen eine Formänderung, was sich in einer Erhöhung der Festigkeit, der Streckgrenze und der Härte äußert.

In legierten Stählen bilden die Legierungselemente sogenannte Substitutionsmischkristalle. Dies heißt, dass sich das Fremdatom (Legierungsatom) auf den Gitterplatz setzt (substituiert), der dem Atom des Grundgefüges vorbehalten ist (*Abbildung 3.2*).

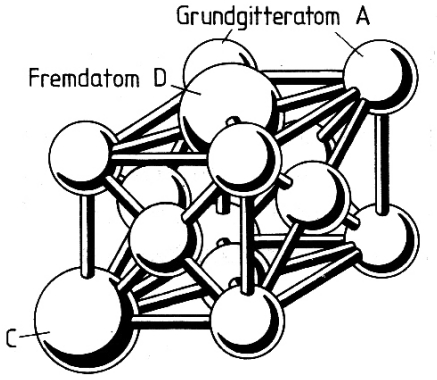


Abbildung 3.2: *Substitution Mischkristall, die Fremdatome C, D ersetzen (substituieren) Atome des Grundgitters A*

So werden beispielsweise bei der Perlitbildung nicht nur die Kohlenstoffatome auf andere Plätze springen, sondern auch die weniger beweglichen substituierten Atome. Durch die geringere Diffusionsgeschwindigkeit der Legierungsatome gegenüber den Kohlenstoffatomen wird auch die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit der Stähle verringert (*siehe Technische Dokumentation TD04, Wärmebehandlung der Stähle*). Durch zunehmenden Legierungszusatz wird dadurch die Härtbarkeit der Stähle auch bei milder Abschreckung erhöht.

Die Folge:

Dicke Bauteile, die durchgehärtet bzw. durchvergütet werden müssen, werden deshalb aus legierten Stählen hergestellt.

Charakteristisch für die Legierungselemente ist ferner das Verschieben der Umwandlungslinien sowohl im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild als auch in den Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern. So verschieben z.B. die Elemente

- Mangan
- Silizium
- Chrom
- Wolfram
- Nickel
- Molybdän

die Punkte S und E im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild nach links (zu kleineren C-Gehalten hin (*Abbildung 3.3*),

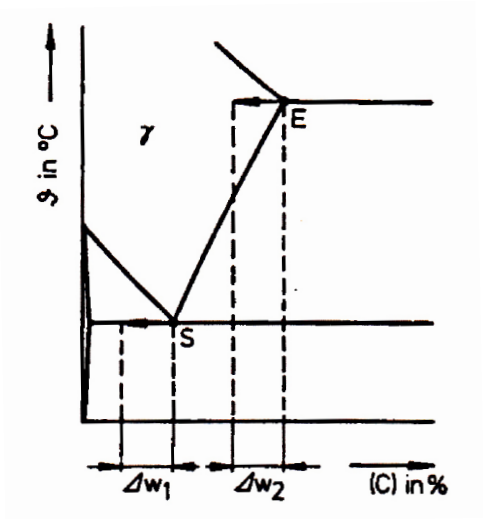


Abbildung 3.3: *Verschiebung der Punkte S und E im EKD durch Legierungselemente im Stahl*

und damit die verbundenen Umwandlungslinien, so dass sich nun auch die Austenit- und Ferrit-Gebiete verschieben. Dies bedeutet, dass sich durch geeignete Legierungselemente bei Raumtemperatur ferritische und austenitische Stähle herstellen lassen (*siehe Nichtrostende Stähle*).

Besondere Eigenschaften der **austenitischen Stähle** (bei Raumtemperatur) sind:

- sehr gute Verformbarkeit und Zähigkeit, auch bei tiefen Temperaturen
- niedrige Streckgrenze bei höherer Zugfestigkeit
- starke Kaltverfestigung
- gute Korrosionsbeständigkeit
- unmagnetisches Verhalten

Härten und Magnetisieren ist nicht möglich, da die austenitischen Stähle umwandlungsfrei sind. Sie finden ihren Einsatz besonders dort, wo Schlagbeanspruchungen und starke örtliche Druckbeanspruchungen aufgenommen werden müssen und gute Umformbarkeit (Schmiedbarkeit) gewünscht wird.

Besondere Eigenschaften der **ferritischen Stähle** (bei Raumtemperatur) sind:

- etwas geringere Verformbarkeit
- Warmfestigkeit und Hitzebeständigkeit (Zunderfestigkeit)
- geringe Kaltverformbarkeit (Kaltsprödigkeit)
- gute Korrosionsbeständigkeit
- gute magnetische Eigenschaften

Härten und Normalisieren ist nicht möglich, da diese Stähle ebenfalls umwandlungsfrei sind. Ihren Einsatz finden sie besonders in der Elektrotechnik (Transformatorenwerkstoffe), aber wegen ihrer Zunderbeständigkeit auch im Kessel- und Ofenbau.

Legierungselemente können den Austenitbereich im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ausweiten oder einschnüren und ermöglichen so die Erzeugung von Stählen, deren austenitisches oder ferritisches Gefüge bei Raumtemperatur beständig ist.

Den Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Stahleigenschaft zeigt die nachstehende Tabelle (*Abbildung 3.4*).

Element / Eigenschaft	Al	C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	S	Si	Ti	V	W
Festigkeit		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Härte		+	+	+	+	+	+			+		+	+
Streckgrenze					+	+		+		+		+	
Zähigkeit	–		–			+		+	–		+		
Verschleißfestigkeit			+			+				+			+
Warmfestigkeit	–	+	+	+	–		+	+	–			+	+
Warmformbarkeit	–									–			
Schweißbarkeit		–		–		+	+		–	–			
Zerspanbarkeit		–		–		–		–	+			–	
Schmiedbarkeit		–				+	–		–	–			
Kaltformbarkeit	–				–					–			
Schneidfähigkeit			+	+			+					+	+
Einhärttiefe			–	+		+	+	+		+		–	+
Korrosionsbeständigkeit	+			+	+	+	+	+		+	+	+	
Nitridbildung	+			+							+	+	
Karbidbildung				+	+		+				+	+	+

Abbildung 3.4: Mögliche Wirkungen von Legierungselementen in Eisen auf einige ausgewählte Eigenschaften (+ = Verbesserung, – = Beeinträchtigung)

Im folgenden geht es um eine steckbriefliche Betrachtung der wichtigsten Legierungselemente.

Chrom (Cr)

Chrom – ein silberweißes, sehr hartes, sprödes Schwermetall (Schmelzpunkt ca. 1.900°C) – verleiht dem Stahl ein gutes Durchhärtevermögen (Werkzeugstähle), wirkt stark karbidbildend und erhöht deshalb Festigkeit, Härte und Streckgrenze. Bei mehr als 10,5% Chrom und niedrigem Kohlenstoffgehalt macht dieses Legierungselement den Stahl korrosionsbeständig, eine Eigenschaft, die durch Erhöhung des Chromgehaltes zusammen mit anderen Legierungselementen (z.B. Nickel) noch verbessert wird. Chrom verbessert auch die magnetischen Eigenschaften; Dauermagnetstähle enthalten bis zu 9% Cr. Hochprozentige Cr-Stähle sind schwierig zu schmieden, weil das Legierungselement die Wärmeleitfähigkeit vermindert.

Von erheblicher Bedeutung ist es, dass bei Chrom keine Austauschmöglichkeit gegeben ist.

Chrom wird dem Stahl vor allem in Form von Ferro-Chrom zulegiert.

Nickel (Ni)

1754 entdeckte der schwedische Bergrat Axel v. Cronstedt in sächsischen Erzen erstmals ein neues silberweißes, zähes Metall (Schmelzpunkt um 1.450°C), das er Nickel nannte.
Heute liegt die Bedeutung von Nickel vor allem in den Bereichen der korrosionsbeständigen Stähle sowie bei hochwarmfesten und hitzebeständigen Stählen. Nickel ist daher Bestandteil von rostfreiem Edelstahl in seinen vielfältigen Anwendungen – von Töpfen, Bestecken über Bauelemente und Fassadenverkleidungen bis zu den Triebwerksschaufeln im Düsenaggregat der Jumbo-Jets, um nur einige Beispiele zu nennen.

Nickel erhöht die Streckgrenze und die Kerbschlagzähigkeit sehr stark, letzteres auch bei tieferen Temperaturen. Es findet bevorzugt dort Einsatz, wo es zur Erhöhung der Zähigkeit dient, vorwiegend für Einsatz- und Vergütungsstähle sowie für kaltzähe Stähle. Nickel bewirkt auch eine sehr gute Durchhärtung, insbesondere dann, wenn der Stahl Chrom enthält.

Das Metall kommt relativ häufig in der Erdrinde vor. Abbauwürdige Lager finden sich vor allem in Kanada, Kuba, Neukaledonien und Australien.

Silizium (Si)

Das dunkelgrau bis schwarz glänzende leichte Halbmetall Silizium (lat. Kiesel), mit dem jeder bereits als Kind spätestens in der Sandkiste Bekanntschaft gemacht hat, wurde 1823 erstmals als reines Element dargestellt. Heute ist das mit 26% in der Erdrinde – nach Sauerstoff – am häufigsten vorkommende Element in seiner reinen Form auch Grundstoff bzw. Träger bei der Herstellung von Transistoren, Dioden und elektronischen Subminiatur-Bauelementen.

Im Stahl dient Silizium als Desoxidationsmittel der Schmelze. Außerdem erhöht Silizium die Zugfestigkeit von Stahl. Weiterhin steigert Silizium sehr stark die Elastizitätsgrenze und findet deshalb als Legierungselement vorwiegend für Federstähle Verwendung. Es verbessert die Verschleißfestigkeit, ebenso die Zunderbeständigkeit, wenn ca. 1% Silizium den warmfesten und hitzebeständigen Stählen zulegiert werden. Nachteilig wirken sich hingegen zu hohe Siliziumgehalte aus, da sie die Warm-und Kaltumformbarkeit beeinträchtigen. Zum Legieren wird meist das Ferro-Silizium verwendet, und zwar in Größenordnungen von 1% bis 2,5%.

Mangan (Mn)

Mangan, ein eisenähnliches Schwermetall, zählt zu den wichtigsten Zusatzstoffen der Eisen- und Stahlindustrie und ist praktisch in jedem Stahl enthalten.

Das erdfarbige Metall (lat. Manganesa = Braunstein) ist das zweithäufigste Schwermetall, das es an vielen Stellen der Erde gibt. Die Manganförderung aus dem Meer, die Suche nach den sogenannten Manganknollen auf dem Meeresboden, hat in letzter Zeit weltweit Aufsehen erregt.

90% des Mangans gelangen als Spiegeleisen (mit 6% bis 30% Mn) oder Ferro-Mangan in die Schmelzöfen der Stahlindustrie. Dort wird Mangan einmal als Reiniger eingesetzt: Es ist ein wirksames Desoxidationsmittel. Es verbindet sich leicht mit Schwefel zu Mangansulfid und verringert damit die Bildung von schädlicherem Eisensulfid. Mangansulfid bildet sich zeilenförmig aus und vermindert dadurch die Beeinträchtigung der Zähigkeit. Bei Automatenstahl fördert diese Form zudem die günstige Spanbarkeit. Als Legierungsmetall verfeinert Mangan das Gefüge und fördert die Härtbarkeit, was insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Stahls (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Schlag- und Dauerfestigkeit) wesentlich verbessert.

Stähle mit über 18% Mn sind nicht magnetisierbar, auch nicht nach relativ großer Kaltverformung. Sie werden daher für Sonderzwecke und als kaltzähe Stähle verwendet.

Molybdän (Mo)

1778 fand der schwedische Chemiker K. W. Scheele das silberweiße, spröde, relativ schwere Metall mit hohem Schmelzpunkt (etwa 2.620°C).

Bei der Edelstahlerzeugung ist Molybdän sehr bedeutsam; schon einige Prozent Legierungsanteil genügen, um Stahl (meist zusammen mit Chrom und Nickel) eine hohe Festigkeit (vor allem Warmfestigkeit und Beständigkeit gegen viele Säuren und Alkalien) zu verleihen. Im Schnellarbeitsstahl ersetzt Mo teilweise das Wolfram. In nichtrostenden Stählen verbessert es die Beständigkeit gegen Lochfraß.

Aluminium (Al)

Das erstmalig 1827 von dem deutschen Chemiker Friedrich Wöhler hergestellte Leichtmetall (Schmelzpunkt ca. 660°C) mit guter elektrischer und Wärmeleitfähigkeit kommt zu etwa 7,6% in der Erdrinde vor. Hauptausgangsstoff ist Bauxit, und das Hauptförderland ist Australien.

Wegen seiner großen Verbindungsneigung (Affinität) zu Sauerstoff eignet sich Al für die Desoxidation der Stahlschmelze. Es bindet den Stickstoff und vermindert damit stark die Alterungsempfindlichkeit. In kleinen Zusätzen fördert es die Feinkörnigkeit. Höhere Aluminiumgehalte verbessern allein oder in Verbindung mit Silizium die Zunderbeständigkeit der hitzebeständigen Stähle.

Die in dieser Technischen Dokumentation skizzierten Legierungselemente sind die in Edelstahlschmelzen am häufigsten verwendeten Zusätze. Darüber hinaus werden z.B. für das Erschmelzen von Spezialstählen noch andere Ferro-Legierungen eingesetzt wie Ferro-Wolfram, Ferro-Vanadium, Ferro-Niob oder Ferro-Bor; hinzu kommt Titan als Mikrolegierungselement sowie als Legierungsmetall für stabilisierte nichtrostende Stähle und hochfeste Edelbaustähle.

Noch mehr über den Einfluss der Legierungselemente erfahren Sie in der Technischen Dokumentationen „Gefügeaufbau von Stahl“. Dort werden auch weitere Legierungselemente vorgestellt.

3.3 EIGENSCHAFTEN DER METALLE – INSBESONDERE DER STAHLWERKSTOFFE

Wer mit Metallen sinnvoll umgehen will, wer insbesondere Stahl verkaufen will, muss genau abschätzen können, wie sich der angebotene bzw. verkaufte Werkstoff im vorgesehenen Einsatz verhalten wird. Dieses Wissen gehört unabdingbar zur technischen Beratungskompetenz eines Stahlhändlers. Ob sich ein Werkstoff für den vorgesehenen Verwendungszweck eignet, wird durch seine Eigenschaften bestimmt. Insbesondere interessieren in der Technik jene Eigenschaften, die eine Aussage über die Verwendbarkeit und Verarbeitbarkeit eines Werkstoffs erlauben. Dies sind vor allem Eigenschaften, die das Verhalten des Werkstoffes unter mechanischen Belastungen oder bei einem Fertigungsverfahren beschreiben.

Für einen Stahlhändler wären dies vor allem die Eigenschaften der Umformbarkeit, der Schweißbarkeit, der Festigkeit und Härte sowie der Korrosionsbeständigkeit. Erst die Summe aller Eigenschaften ergibt das Eigenschaftsbild des Werkstoffes. Dieses Bild entscheidet, ob ein Werkstoff für eine gestellte Aufgabe geeignet ist. In der Regel unterscheidet man physikalische, mechanisch-technologische, fertigungstechnische und chemisch-technische Eigenschaften. Für den Stahlhändler ist es weniger wichtig, eine Werkstoffeigenschaft der zuvor genannten Kategorie zuzuordnen, aber für seine Beratungskompetenz von wesentlicher Bedeutung, einige Eigenschaften zu kennen und zu beschreiben. Im folgenden werden daher die wichtigsten Eigenschaften der Stahlwerkstoffe vorgestellt.

Die mechanischen Eigenschaften der Stähle, also ihre Härte, Festigkeit und Zähigkeit, sind nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, d.h. insbesondere vom Kohlenstoffgehalt, abhängig, sondern werden auch durch die mechanische Bearbeitung im kalten und warmen Zustand (Walzen, Schmieden, Ziehen usw.) oder durch eine Wärmebehandlung, also durch Erwärmen auf höhere Temperaturen mit anschließender Abkühlung, weitgehend beeinflusst.

Stahlwerkstoffe für besondere Beanspruchungen

Stahlwerkstoffe unterliegen in ihrer Anwendung einer Vielzahl von Beanspruchungen. Die grundlegenden (Zug, Dehnung usw.) und auch die dafür notwendigen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze usw.) werden in der Technischen Dokumentation TD06 „Werkstoffprüfung“ nochmals ausführlich behandelt.

Bei vielen Konstruktionsstählen treten jedoch darüber hinaus besondere Beanspruchungen auf, die wiederum besondere Werkstoffeigenschaften erfordern. Solche besonderen Beanspruchungen sind:

- Einwirkung höherer Temperaturen bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung (gefordert: Warmfestigkeit)
- Einwirkung von Temperaturen, die bei unlegierten Stählen das Gefüge verändern (gefordert: Hitzebeständigkeit)
- Reibbeanspruchungen (gefordert: Verschleißfestigkeit)
- chemische und elektrochemische Einwirkungen (gefordert: Korrosions- und Zuderbeständigkeit)
- Wechselbeanspruchungen und starke elastische Dehnungen (gefordert: hohe Elastizität)

Die Eigenschaften unlegierter Stähle werden fast ausschließlich über den Kohlenstoffanteil und durch entsprechende Wärmebehandlungen

geregelt. Lassen sich die geforderten Eigen-schaften so jedoch nicht erzeugen, beginnt der Einsatz und die Aufgabe der Legierungselemente.

Warmfestigkeit

erfordert vom entsprechenden Werkstoff auch bei 550°C noch gute Festigkeit. Unlegierte Stähle können bis ca. 300°C ausreichende Festigkeit aufweisen. Für höhere Temperaturen wird bei ferritisch-perlitischem Grundgefüge mit Mo, Cr, V und Mn einzeln oder kombiniert legiert.

Hochwarmfeste Stähle erreichen eine Warmfestigkeit bis 650°C. Sie besitzen entweder ein ferritisch – perlitisches Gefüge und dann als Hauptlegierungselement Cr, zusätzlich Mo, V, z.T. N oder (meistens) ein austenitisches Gefüge mit zulegiertem Cr und Ni, daneben z.T. Mo, V, W, Nb, Ti und B zur Festigkeitssteigerung.

Anwendungsbereiche der warmfesten Stähle sind z.B. Kesselbleche, nahtlose Rohre und Verbindungselemente (Schrauben usw.).

Warmfeste und hochwarmfeste Stähle besitzen gute Festigkeitseigenschaften bis max. 650°C. Hauptlegierungselemente sind Cr und Ni.

Hitzebeständigkeit

ist gegeben, wenn bei Arbeitstemperaturen über 550°C Zunderbildung (Oxidation der Oberfläche, z.B. Bildung von $Fe^2 0^3$) und Heißgaskorrosion vermieden werden. Dazu setzt man dem Stahl Cr, Si und Al zu, die dichte, gut haftende und damit schützende Oxide bilden. Daneben wird zur Steigerung der Warmfestigkeit so viel Ni zugesetzt, dass ein austenitisches Gefüge entsteht. Die Zugabe von Ti, Ta, Co, W und V kann die Warmfestigkeit weiter steigern.

Hitzebeständige Stähle sind bei Temperaturen über 550°C weitgehend unempfindlich gegen Heißgaskorrosion und Zunderbildung. Hauptlegierungselemente sind Cr, Si, Al und z.T. Ni.

Verschleißfestigkeit

bedeutet Widerstand gegen die verschiedenartigsten Verschleißbeanspruchungen. Bei bestimmten, nicht zu hohen Anforderungen gegenüber unlegierten Stählen mit geringen Anteilen Mn. Sie besitzen perlitisches Gefüge und finden als Schienen, Gleitbahnen und Rutschen Verwendung.

Andere Verschleißmechanismen verlangen auch andere Stähle. So muss z.B. zwischen reibender und schlagender Beanspruchung unterscheiden werden. Der klassische als Manganhartstahl bezeichnete verschleißfeste Stahl X120Mn12 (WNr: 1.3401) ist von Natur aus weder besonders hart, sondern eher weich und zäh. Er ist austenitisch und hoch widerstandsfähig bei schlagender Beanspruchung, durch die er kaltverfestigt wird. Bei reibendem (schmirgelndem) Verschleiß ist er weniger beständig. Er ist besonders für Baggerzähne, Brecherwerkzeuge in der Steinindustrie, Schlag- und Schleudermühlen geeignet.

Manche Einsatz-, Vergütungs- oder Nitrierstähle sind durch ihre besonderen Eigenschaften bei geeigneter Wärmebehandlung auch für viele Verschleißprobleme anzuwenden.

Eine hohe Verschleißfestigkeit ist neben großer Härte unter anderem besonders bei **Werkzeugstählen** gefordert (hohe Schneidfähigkeit und Schneidhaltigkeit, da sie zerspanend arbeiten sollen). Sie werden nach ihrer hauptsächlichen Verwendung eingeteilt in:

- **Kaltarbeitsstähle**
  sind für einen Einsatz bei Temperaturen unter 200°C vorgesehen. Es sind unlegierte, härtbare Stähle oder legiete, die Cr, Wo, Mo, V, Mn und Ni in verschiedenen Kombinationen enthalten.

- **Warmarbeitsstähle**
  werden bei Arbeitstemperaturen über 200°C verwendet. Sie müssen anlassbeständig und warmfest sein und einen guten Warmverschleißwiderstand besitzen. Es werden die gleichen Legierungselemente wie bei den Kaltarbeitstählen – jedoch in in anderer Kombination – eingesetzt.

- **Schnellarbeitsstähle**
  finden bei hohen Schnittleistungen mit Arbeitstemperaturen bis 600°C Anwendung. Sie müssen deshalb anlassbeständig und verschleißfest sein und eine hohe Warmhärte besitzen. Legierungselement sind W, Mo, Cr, V und Co.

Von Werkzeugstählen wird große Härte, Verschleißfestigkeit und Schneidfähigkeit gefordert. Diese Eigenschaften müssen – je nach Einsatzbereich – auch bei höheren Temperaturen gewährleistet sein.

Korrosionsbeständigkeit

wird durch nichtrostende und säurebeständige Stähle garantiert. Sie erreichen die gewünschten Eigenschaften besonders durch einen hohen Cr- oder Cr-Ni-Gehalt Der Massenanteil Cr liegt im allgemeinen über 12%.

Am bekanntesten sind Chrom-Nickel-Stähle mit 18% Cr und 8% Ni (austenitisches Gefüge). Die Beständigkeit kann aber auch mit ferritischen oder martensitischen Stählen erreicht werden (Legierungselemente: Cr, Mo, V, Ti und S).

Weitere fertigungstechnische Eigenschaften, die Auskunft über die Eignung eines Werkstoffes für ein Anarbeitungsverfahren und über die Bedingungen bei der Verarbeitung der Werkstoffe geben, sind in nachfolgender Tabelle festgehalten.

Anforderung	Beispiel: Stahl
Warmformbarkeit	sinkt mit steigendem C-Gehalt, Grenze bei 2% C.
Kaltumformbarkeit	sinkt mit steigendem C-Gehalt, am besten bei reinem Ferrit.
Schweißbarkeit	Bis 0,25% C schweißbar, bei größerem C-Gehalt sind besondere Bedingungen erforderlich. hängt eng mit Dehnung und Einschnürung zusammen wegen des Spannungsausgleichs.
Zerspanbarkeit	Hängt eng mit der Härte und Zugfestigkeit zusammen. Zunehmender C-Gehalt verschlechtert die Zerspanbarkeit. C als Graphit verbessert die Zerspanbarkeit wegen der Schmierwirkung. Weichglühen: lamellarer → körniger Perlit (= weicher), bessere Bearbeitbarkeit.
Härtbarkeit	erfordert einen mind. C-Gehalt von 0,2% (C-Atome im α-Gitter). Härte steigt bis 0,8% an und sinkt dann wieder.

Abbildung 3.5:
Stahl in der Be- und Verarbeitung

Eigenschaften aufgrund der Anforderungen an den Werkstoff

Die bisher genannten Werkstoffeigenschaften und die nunmehr folgenden und kurz beschriebenen Eigenschaften der Werkstoffe werden an gegebener Stelle in der Technischen Dokumentation noch einmal ausführlich beschrieben.

Die **Dichte** gibt an, welche Masse ein Werkstoff pro Volumeneinheit besitzt. Die Einheit der Dichte ist g/dm³ oder kg/cm³. Die Dichte ς eines Werkstoffes errechnet sich mit der Formel:

$$\varsigma = m/V$$

wobei m die Masse des Bauteils und V sein Volumen darstellt. Stahl hat eine Dichte von 7,86 kg/dm³.

In der Praxis des Stahlhändlers wird in aller Regel die **Masse** angegeben, wobei bei Stabstählen sich die Masse auf einen Meter bezieht (m = kg/m) und bei Flachprodukten die Masse pro qm angegeben wird (m = kg/m²).

Als **Festigkeit** bezeichnet man allgemein die größtmögliche mechanische Spannung, die ein Werkstoff aushalten kann, ohne zu Bruch zu gehen. Dabei muss man unterscheiden zwischen Zug-, Druck- oder Scherfestigkeit.

Die **Zugfestigkeit** R_m errechnet sich aus der Zugkraft F und der Querschnittsfläche S nach der Formel $R_m = F/S$. Sie ist nur ein Anhaltswert, denn bei der Belastung führt sie bereits zum Bruch! In vielen Fällen wird jedoch die Streckgrenze R_e angegeben. Es ist jener Wert, bis zu dem sich der Werkstoff tatsächlich belasten lässt. Nach heute gültigen Normen und in der Praxis des Stahlhändlers werden die Baustähle nach diesem Wert benannt, z.B. Baustahl: S355 (früher St 52), das heißt Streckgrenze R_e = mind. 355 N/mm² bei der kleinsten Erzeugnisdicke, dabei beträgt die maximale Zugfestigkeit R_m = mind. 470 N/mm²)

Mit **Härte** bezeichnet man den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt. Durch eine Härtemessung wird nahezu zerstörungsfrei ein Werkstoffkennwert ermittelt, mit dem Festigkeit und Brucheinschnürung abgeschätzt und weitere Eigenschaften wie beispielsweise Zerspanbarkeit, Verschleißverhalten usw. beurteilt werden können (*siehe Technische DokumentationTD06 Werkstoffprüfung*).

Als **Sprödigkeit** bezeichnet man die Eigenschaft eines Werkstoffes, unter Belastung zu brechen, ohne sich vorher merklich zu verformen. Bei schlagartiger Beanspruchung zerspringen spröde Werkstoffe in viele Bruchstücke. Da unsachgemäß gehärteter Stahl sehr spröde sein kann, ist es möglich, dass er bei Schlagbeanspruchung bricht.

Elektrische, akustische und thermische Leitfähigkeit

Bei der Wärmeleitung wird Wärmeenergie innerhalb eines Körpers weitergeleitet. Die Moleküle an den Stellen höherer Temperatur besitzen mehr Energie und übertragen diese auf die Nachbarmoleküle geringerer Energie. Das führt zu einem Abbau der bestehenden Temperaturdifferenz. Bei Metallen werden Wärme und elektrischer Strom durch freie Leitungselektronen transportiert. Elektrischer Strom wird durch bewegte, freie Elektronen erzeugt, Wärme wird durch schwingende Elektronen übertragen. Deswegen sind Wärmeleitung und elektrische Leitung (ungefähr) proportional. Metalle übertragen akustische Schwingungen sehr gut.

Das Atom-Gitter des Bleis leitet Schallschwingungen viermal schneller und das des Stahls fünfzehnmal schneller als Luft.

Alterung

Im Laufe der Zeit ändern sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Stahls. Die Bauteile verspröden und verändern sich dabei auch maßlich. Dies ist einmal zurückzuführen auf den Abbau von Eigenspannungen (*siehe Spannungsarmglühen*) und eine mit der Zeit eintretenden Versprödung, als Folge von Stickstoff- bzw. Kohlenstoffausscheidungen im Kristallgefüge. Infolge der Alterung erhöht sich auch die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der Bauteile, und damit geht einher eine Verminderung der Dehnung und der Kerbschlagzähigkeit. Laufen die Vorgänge der Alterung bei Raumtemperatur ab, so spricht man von natürlicher Alterung. Demgegenüber geschieht die künstliche Alterung bei Temperaturen über 350°C, da sich hierbei der maßgebliche Stickstoff als nadelförmige Eisennitride ausscheidet.

Bei kalt verformten Stählen tritt die wesentlich gefährlichere Verformungsalterung (Reckalterung) auf. Sie bewirkt einen deutlichen Zähigkeitsverlust, da der Stahl beim Verformen sehr stark versprödet. Daher sollte Stahl zwischen 200°C und 350°C wegen seiner dann geringen Zähigkeit nicht verformt werden. Die Alterungsneigung des Stahls lässt sich zwar nicht völlig beseitigen, sie kann aber wesentlich verringert werden.

Da Stickstoff nicht vollständig aus der Schmelze beseitigt werden kann, erfolgt die Zugabe von Legierungselementen, die zu Stickstoff eine höhere Affinität haben als Eisen. Dies ist zum Beispiel bei Aluminium, Titan und Niob der Fall. Die vorgenannten Elemente binden den Stickstoff zu festen und schwer löslichen Nitriden. Der Stahl ist somit alterungsbeständig. Durch Vergleich der Kerbschlagarbeit (*siehe Technische Dokumentation: Werkstoffprüfung*) ungealteter und künstlich gealteter Proben wird die Alterungsneigung bestimmt.

Wird ein nicht oder nur wenig beruhigter Stahl plastisch kalt verformt, wie dies beispielsweise bei der Blechumformung der Fall ist, so scheiden sich innerhalb der Gleitzonen Eisennitride aus. Beim Umformen entstehen dann die sogenannten „Fließfiguren“, die eine Oberflächenbehandlung (polieren, galvanisieren oder lackieren) erheblich erschweren oder gar nicht zulassen. Daher werden Tiefziehbleche mit Aluminium desoxidiert oder durch Kaltwalzen dressiert (*siehe auch Technische Dokumentation: Flachprodukte*).

3.4 ZUSAMMENFASSUNG

Man unterscheidet zwei Arten von Fremdelementen im Eisengitter: Eisenbegleiter und Legierungselemente. Die Zuordnung geschieht danach, ob die Elemente ohne besondere Absicht bei der Stahlerzeugung und Verarbeitung in den Werkstoff gelangen oder ob sie gezielt zur Verstärkung bestimmter Eigenschaften zugesetzt werden.

Die Eisenbegleiter verursachen eine Reihe von negativen Auswirkungen wie Sprödigkeit, Schweißrissigkeit, Rotbruch- und Heißbruchgefahr sowie Alterung.

Die Legierungselemente bilden mit dem Eisen Mischkristalle, wobei sich das Fe-Gitter verspannt. Außerdem behindern sie die Diffusion des Kohlenstoffs und bilden Karbide und Nitride. Größere Härte und Festigkeit und eine höhere Streckgrenze sind meist die Folge.

Metalle sind elastisch (vorübergehend) und plastisch (bleibend) verformbar, sofern die Plastizität nicht durch Manipulation des Metallgitters (z.B. Einbau von Zwischengitteratomen) unterbunden wird. Ein solches Blockieren von Gleitebenen wird durchgeführt, um eine größere Härte und Festigkeit (Widerstand gegen Formänderung) beim Werkstoff zu erzeugen, gleichzeitig erschwert man so jedoch eine gute Verformbarkeit und damit allgemein die Verarbeitbarkeit. Es gilt hier deshalb immer, einen sinnvollen Kompromiss zu finden. Ursache all dieser, für die Technik so wertvollen Eigenschaften ist der Gitter- und Gefügeaufbau, der aus der speziellen chemischen Bindungsart resultiert.