

## **Einfluß von Legierungselementen auf die Eigenschaften von Eisenwerkstoffen**

Die durch die metallurgische Erzeugung absichtlich zugegebenen Legierungselemente und die verbliebenen Begleitelemente beeinflussen die Eigenschaften des Basismetalls Eisen. Neben dem Einfluß auf die Gleichgewichtstemperaturen und das Umwandlungsverhalten werden Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften eingestellt. Die mechanischen Eigenschaften, wie die Härte, Streckgrenze, Festigkeit und Zähigkeit können infolge der unterschiedlichen Einflüsse der Legierungselemente durch alle festigungssteigernden Mechanismen gezielt modifiziert werden.

Elektrische und thermische Anforderungen an den Werkstoff Stahl sowie hohe Beständigkeit gegen Materialabtrag durch Verschleiß und chemische oder thermische Korrosion sind durch geeignete Legierungsmaßnahmen zu erfüllen. Für die wesentlichen Legierungs- und Begleitelemente wurden die wichtigsten Einflüsse, die erforderlichen Legierungsgehalte und einige Beispiele aus unterschiedlichen Stahlsorten zusammengefaßt.

### **Kohlenstoff**

Die Erhöhung der Festigkeit und die Möglichkeit, Eisen durch Abschrecken zu härten, stellen die wichtigste Eigenschaft von Kohlenstoff als Legierungselement dar. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit wird durch niedrige und mittlere Kohlenstoffgehalte stark abgesenkt (was gleichbedeutend ist mit einer Erhöhung der Härbarkeit) und bleibt im Bereich von 0,6 bis 1,4% Kohlenstoff etwa gleich.

### **Silizium**

Aufgrund seiner hohen Sauerstoffaffinität ist Silizium neben Mangan und Aluminium eines der wichtigsten Desoxidationsmittel. Alle Si-beruhigten Stähle weisen Silizium Massenanteile von etwa 0,2% auf. In unberuhigten Stählen ist Silizium nur in Spuren enthalten. Die Lösungsfähigkeit des Eisens für Silizium beträgt bei Raumtemperatur fast 14%. Geringe Mengen Silizium werden in Eisen daher als Mischkristall gelöst. Bei Siliziumgehalten über 6,5% bildet sich eine Überstruktur mit verbindungsähnlichem Charakter, die eine Versprödung mit sich bringt. Ab 3% Silizium sind Stähle nicht mehr kalt- und ab 7% Silizium nur noch schwer warmverformbar. Durch Silizium wird die Löslichkeit des Ferrits für Kohlenstoff und die Stabilität von Eisenkarbid vermindert. Silizium fördert die Erstarrung nach dem stabilen System. Bei höheren Siliziumgehalten zerfällt daher der Zementit beim Glühen in Eisen und Graphit (Schwarzbruch). Silizium erhöht die Streckgrenze und die Zugfestigkeit, ohne die Dehnung wesentlich zu verringern. Weiter vermindert Silizium die kritische Abkühlgeschwindigkeit und vergrößert damit die Einhärtung. Durch ein hohes Streckgrenzenverhältnis sind Si-legierte Stähle als Federwerkstoffe geeignet. Si-legierte Stähle mit 4% Silizium finden als Transformatorenwerkstoffe Verwendung, da Silizium den elektrischen Widerstand von Eisen erhöht und damit die Wirbelstromverluste herabsetzt. Durch eine unter atmosphärischen Bedingungen entstehende Schutzschicht aus  $\text{SiO}_2$  wird das Korrosionsverhalten in Säuren verbessert. Auch die Zunderbeständigkeit wird durch das Entstehen von siliziumreichen Oxidschichten erhöht (Thermax). In Baustählen fällt die Kerbschlagzähigkeit bei Siliziumgehalten über 2% stark ab. Wird eine gute Verformbarkeit und besondere Tiefziehfähigkeit verlangt, so sind hohe Siliziumgehalte zu vermeiden. Bei der Entwicklung der Werkzeugstähle spielte die Verbesserung der Härbarkeit durch Silizium eine wesentliche Rolle. Diese Werkzeugstähle zeichnen sich durch gute Verschleißfestigkeit und Anlaßbeständigkeit aus.

### ***Federstähle***

Wirkung: Erhöhung der Einhärtbarkeit und der Zugfestigkeit, Erhöhung des Streckgrenzenverhältnisses im vergüteten Zustand

Gehalt: 0,6 - 1,8% Si

Beispiele: 38 Si 3; 65 SiW 7

#### **Werkzeugstähle**

Wirkung: Erhöhung der Verschleißfestigkeit und der Anlaßbeständigkeit

Gehalt: 0,7 - 2,0% Si

Beispiele: 125 CrSi 5, 45 SiCrV 6

#### **Dynamo- und Transformatorstähle**

Wirkung: Widerstandserhöhung, dadurch Absenken der Wirbelstromverluste

Gehalt: bis 4,3% Si

Beispiel: 5 Si 17

#### **Hitze- und zunderbeständige Stähle**

Wirkung: Bei hochlegierten Cr- und CrNi-Stählen wird die Zunderbeständigkeit durch die Bildung einer siliziumreichen Oxidschicht erhöht.

Gehalt: 0,7 - 2,5% Si

Beispiele: X 15 CrNiSi 20-12, X 10 CrSi 6

#### **Ventilstähle**

Gehalt: bis 4,5% Si

Beispiel: X 45 SiCr 4

### **Mangan**

Da Mangan ein wirksames Desoxidationsmittel ist, sind herstellungsbedingt geringe Gehalte in fast allen Stählen enthalten. Etwa 10% Mangan können im Ferrit bei Raumtemperatur gelöst werden. Mangan bildet zahlreiche nichtmetallische Einschlüsse wie MnO-MnS und  $2\text{MnO-SiO}_2$ . Diese Einschlüsse werden bei der Verformung zu Zeilen gestreckt. Stähle mit einem höheren Mangan Gehalt und hohem Mn/S Verhältnis ( $\text{Mn/S} > 1,7$ ) sind nicht mehr rotbruchempfindlich, da Mangan den Schwefel zu dem über  $1600^\circ\text{C}$  schmelzenden MnS oder einem Mn-reichen Sulfid abbundet.

Bezüglich Härtbarkeit und Durchhärtung ist Mn eines der billigsten und wirkungsvollsten Legierungselemente. Mit der Herabsetzung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit bei zunehmenden Mangangehalt ist eine Erhöhung der Einhärtung verbunden. Manganstähle haben besonders im vergüteten Zustand eine bessere Zugfestigkeit, Streckgrenze und Kerbschlagzähigkeit als Kohlenstoffstähle. Sie sind allerdings überhitzungsempfindlich und neigen zur Anlaßsprödigkeit.

Martensitische Manganstähle mit 2 bis 10% Mangan sind sehr spröde. Der wichtigste austenitische Manganstahl ist der "Manganhartstahl" mit 12 bis 14% Mangan und 1,2 bis 1,4% Kohlenstoff ( $\text{Mn/C} \sim 10/1$ ). Er zeichnet sich durch hohen Verschleißwiderstand, geringe Härte, niedrige Streckgrenze und hohe Verfestigung durch Kaltverformung infolge einer örtlichen Umwandlung von Austenit in Martensit durch Kaltverformung aus.

#### **Baustähle**

Wirkung: Abbinden des Schwefels zu MnS, damit die Bildung von niedrigschmelzenden FeS-Phasen verhindert wird. Erhöhung der Streckgrenze und der Zugfestigkeit bis 1,7% Mn

Gehalt: bis 1,7 % Mn

Beispiel : S 355JZG3 (St 52-3N)

#### **Vergütungsstähle**

Wirkung: Erhöhung der Einhärtungstiefe durch Absenkung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit

Gehalt: bis 1,7% Mn

Beispiel: 28 Mn 6

### ***Einsatzstähle***

Wirkung: Erhöhung der Einhärtungstiefe ohne Karbidbildung

Gehalt: 0,9 - 1,4-6 Mn

Beispiel: 16 MnCr 5

### **Phosphor**

Durch die geringe Diffusionsgeschwindigkeit des Begleitelements Phosphor im Eisen und dem großen Erstarrungsintervall zwischen Liquidus- und Solidustemperatur entstehen in phosphorhaltigen Stählen sehr ausgeprägte Seigerungen. Deshalb führt Phosphor neben Schwefel zu Heißrissen. Der Phosphorgehalt wird daher bei der Stahlerzeugung i.a. so gering wie möglich gehalten. Phosphorgehalte besonders in Mangan- und Chrom-Manganstählen bewirken ab 0,01% eine Verschlechterung der Anlaßsprödigkeit. Außerdem verursacht Phosphor eine Kaltversprödung der Stähle, so daß kaltzähe Stähle einen besonders geringen Phosphorgehalt aufweisen sollten. Nur in wenigen Sonderfällen werden höhere Phosphorgehalte in Stählen angestrebt. Phosphor senkt die Formänderungsfestigkeit oberhalb 1000°C in Massenteilen bis ca. 0.6% P. Die Härbarkeit und die Durchvergütung werden zwar durch Phosphor positiv beeinflusst und der Zementit wird stabilisiert, doch werden die positiven Auswirkungen durch die schädliche Versprödung meist überkompensiert. Bei kaltgewalztem Blech kann die festigkeitssteigernde Wirkung des Phosphors genutzt werden. In Gegenwart von Kupfer verbessert Phosphor die Korrosionsbeständigkeit wetterfester Baustähle gegenüber atmosphärischer Korrosion.

### ***Wetterfeste Baustähle***

Wirkung: Korrosionsbeständigkeit gegen atmosphärische Korrosion

Gehalt: 0,06 - 0, 15% P

Beispiel: S355J2WP ( $\approx$  9 CrNiCuP 3-2-4)

### **Schwefel**

Schwefel ist ein Begleitelement des Stahles, das zu starken Seigerungen neigt. Die Löslichkeit von Austenit für Schwefel beträgt bei 1356°C 0,05%, während die Löslichkeit von  $\delta$ -Ferrit bei 1365°C 0, 18% und von  $\alpha$ -Ferrit bei 910°C nur 0,02% beträgt. Daher bilden schon geringste Mengen Schwefel im Eisen das Eisensulfid FeS. Dieses Sulfid stellt einen sogenannten nichtmetallischen Einschuß dar und läßt sich bereits im polierten, ungeätzten Zustand eines Stahlschliffes erkennen. In Kombination mit gelöstem Sauerstoff tritt das FeO-FeS-Eutektikum mit einem Schmelzpunkt etwa bei 865°C oder 908°C, das Fe-FeS-Eutektikum bei 988°C auf. Die niedrigschmelzenden Eutektika verursachen in einem Temperaturbereich von 800 bis 1000°C die Rotbrüchigkeit, die durch ungenügende oder nicht mehr vorhandene Duktilität bei der Warmumformung zum Versagen führt. Oberhalb von 1200°C verursachen FeS und andere niedrigschmelzende Ausscheidungen auf den Korngrenzen bei einer Warmumformung einen Heißbruch. Um die schädlichen Wirkungen des Schwefels zu vermindern, wird dem Stahl stets eine gewisse Menge Mangan, das eine größere Schwefelaffinität als Eisen aufweist, zulegiert. Mangan bildet mit Schwefel das bei 1610°C schmelzende Mangansulfid oder Mn-Fe-Sulfide. In Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung

und den Erstarrungsbedingungen werden in technischen Stählen bis zu vier verschiedene Mischsulfidtypen Me-Mn-S mit unterschiedlichen Schmelzpunkten gefunden.

Obwohl Schwefel im allgemeinen als Begleitelement im Stahl wegen der Verschlechterung mechanischer Eigenschaften unerwünscht ist, enthalten Automatenstähle, die für die Automatenverarbeitung vorgesehen sind, neben einem erhöhten Mangangehalt und ggf. einer Pb-Zugabe höhere Schwefelgehalte. Automatenstähle weisen etwa 0,15 bis 0,3% Schwefel auf, da durch die geringe Festigkeit der Mangansulfide und ihre Wechselwirkung mit der Matrix ein kurzbrechender Span bei der spanabhebenden Bearbeitung erreicht und die Oberflächenbeschaffenheit wesentlich verbessert wird. Edelbaustähle enthalten in bestimmten Fällen einen garantierten Schwefelgehalt oder in Normen oder Spezifikationen vorgegebene Analysengrenzen für die Automatenbearbeitung.

### ***Automatenstähle***

Wirkung: Kurzbrechender Span bei der Automatenbearbeitung

Gehalt: 0,15 - 0,30% S

Beispiel: 9 SMnPb 28

### ***Edelbaustähle***

Wirkung: Kurzbrechender Span bei der Automatenbearbeitung

Gehalt: 0,020 - 0,035% S

Beispiel: 16 MnCr 5 S

## **Chrom**

Chrom gehört zu den wichtigsten Legierungselementen der Stähle. Es erhöht die Zugfestigkeit, während die Dehnung nur geringfügig verschlechtert wird. Durch Herabsetzen der kritischen Abkühlgeschwindigkeit wird die Einhärtbarkeit wesentlich gesteigert.

Eine Erhöhung der Härte wird weiterhin durch die karbidbildende Wirkung des Chroms hervorgerufen. Höhere Chromgehalte verbessern die Warmfestigkeit und Anlaßbetändigkeit. Die Zunderbeständigkeit wird insbesondere in Kombination mit Silizium oder Aluminium erhöht. Chromstähle sind gut härt- und vergütbar, sie neigen allerdings zur Anlaßsprödigkeit und in Gegenwart von Wasserstoff zur Flockenbildung, die jedoch bei Cr-Ni-Stählen durch die übliche Vakuumbehandlung kein Problem mehr darstellt. Da Stähle mit mehr als 12,2% Cr eine Passivschicht (O-adsorbierende Grenzschicht) bilden und damit gegen Korrosionsangriff medienunempfindlich werden, ist Chrom das wichtigste Legierungselement der hochlegierten rost- und säurebeständigen Stähle.

### ***Vergütungsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Einhärtbarkeit

Gehalt: bis ca. 2% Cr

Beispiel: 41 Cr 4

### ***Warmfeste Stähle***

Wirkung: Erhöhung der Warmfestigkeit durch Mischkristallbildung und Karbidausscheidung

Gehalt: bis 2,5% Cr

Beispiel: 21 CrMoV 5 7

### ***Nitrierstähle***

Wirkung: Erhöhung der Nitrierschichthärtung durch Bildung von Chromnitriden

Gehalt: bis 2,5% Cr

Beispiel: 34 CrAlMo 5

### ***Druckwasserstoffbeständige Stähle***

Wirkung: Verringerung der Entkohlungsneigung durch Bildung von - auch bei erhöhten Temperaturen - beständigen Karbiden

Gehalt: niedriglegiert bis 3% Cr  
hochlegiert bis 12% Cr

Beispiel: 25 CrMo 4

### ***Werkzeugstähle-Kaltarbeitsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Anlaßbeständigkeit und Verbesserung der Härbarkeit

Gehalt: unter- und übereutektoid bis 1,5% Cr  
ledeburitisch 12% Cr  
rostfreie Werkzeugstähle 15-19% Cr

Beispiele: 105 WCr 6, X 210 Cr 12, X 35 CrMo 17

### ***Werkzeugstähle-Warmarbeitsstähle***

Wirkung: Verbesserung der Härbarkeit

Gehalt: 1,0-5,0% Cr, bei sehr hoch beanspruchten Werkzeugen bis 13% Cr

Beispiele: X 38 CrMoV 5-1; X 30 WCrV 5-3, X 50 NiCrWV 13-13

### ***Werkzeugstähle-Schnellarbeitsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Härbarkeit durch die Bildung leicht löslicher Karbide

Gehalt: 4% Cr

Beispiel: S 18-1-2-5

### ***Rost- und säurebeständige Stähle***

Wirkung: Bildung einer Passivschicht, die den Stahl ab 12,2% Cr unempfindlich gegen atmosphärische Korrosion macht

Gehalt: bis 28 % Cr

Beispiele: X 20 Cr 13, X 1 CrNiMo 28-4-2

### ***Hitze- und zunderbeständige Stähle***

Wirkung: Bildung einer festhaftenden Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht durch selektive Oxidation des Chroms.

Gehalt: bis 30% Cr

Beispiel: X 10 CrAl 18, X 20 CrNiSi 25 4

## **Nickel**

Nickel gehört zu den Legierungselementen, die eine Erstarrung nach dem stabilen Eisen-Kohlenstoffsystem begünstigen. Durch die Verringerung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit erhöht Nickel die Durchhärtung und Durchvergütung. Weiter erhöht Nickel vor allem die Zähigkeit, besonders im Tieftemperaturgebiet, wirkt kornfeinend und senkt die Überhitzungsempfindlichkeit. Der 18/10 Chrom-Nickel-Stahl zählt zu den Hauptvertretern der korrosionsbeständigen austenitischen Stähle. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stählen erreicht bei 36% Nickel ein Minimum (Invarstahl). Der elektrische Widerstand wird durch Nickel erhöht (Heizleiterdrähte, Konstantan).

### ***Wasservergütete schweißbare Baustähle***

Wirkung: Absenken der kritischen Abkühlgeschwindigkeit

Gehalt: 1,0% Ni

Beispiel: S 460 N (StE 460)

### ***Einsatzstähle***

Wirkung: Steigerung der Zähigkeitseigenschaften durch Kornfeinung

Gehalt : 1,4 - 1,7 % Ni

Beispiel: 15 CrNi 6, 17 CrNiMo 6

### ***Vergütungsstähle***

Wirkung: Verbesserung der Durchhärtung und Durchvergütbarkeit durch Senken der kritischen Abkühlgeschwindigkeit, besonders wichtig bei Stählen für große Schmiedestücke

Gehalt: 1,0 - 4,5% Ni

Beispiel: 36 NiCrMo 16, 36 CrNiMo 4

### ***Warmfeste Stähle***

Gehalt: bis 1,3% Ni

Beispiel: 20 MnMoNi 4-5, 28 NiCrMo 4

### ***Werkzeugstähle für Kaltarbeit***

Gehalt: bis 4% Ni

Beispiel: X 45 NiCrMo 4

### ***Kaltzähe Nickelstähle***

Wirkung: Verbesserung der Zähigkeitseigenschaften auch bei tiefen Temperaturen

Gehalt: etwa 4% Ni

Beispiele: 10 Ni 14, X 8 Ni 9

### ***Austenitische Cr-Ni-Stähle***

Wirkung: Festigkeitssteigerung durch Mischkristallbildung

Gehalt: mehr als 8% Ni

Beispiel: X 5 CrNi 18-10

### ***Martensitushärtende Stähle***

Wirkung: Bildung intermetallischer Phasen (z.B. Ni<sub>3</sub>Mo)

Gehalt: etwa 18% Ni

Beispiel: X2 NiCoMo 18-8-5

### ***Invar-Stahl***

Wirkung: extrem niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient

Gehalt: etwa 36% Ni

Beispiel: Ni36

### **Molybdän**

Molybdän erhöht die Härtebarkeit und Warmfestigkeit und verringert die Anlaßversprödung der chrom- und manganhaltigen Vergütungsstähle. Die dafür notwendigen Molybdängehalte liegen zwischen 0,2 und 0,4%. Eine Zugabe von 1% Molybdän hat auf die Durchhärtung etwa den gleichen Einfluß wie eine Zulegierung von 2% Chrom. Aus seiner Eigenschaft Karbide zu bilden ergibt sich eine Erhöhung der Verschleißfestigkeit und Anlaßbeständigkeit, daher wird Molybdän in niedriglegierten Warmarbeitsstählen verwendet. In höher legierten Warmarbeitsstählen und in den Schnellarbeitsstählen kann Molybdän weitgehend Wolfram ersetzen. In Einsatzstählen bewirkt Molybdän eine geringe Erhöhung der Eindringtiefe des Kohlenstoffs und führt zu einer Steigerung des Randkohlenstoffgehaltes. Austenitischen Stählen wird Molybdän zur Verbesserung der Korrosions- und Warmfestigkeit zulegiert. Ähnlich wie Chrom und Nickel neigt auch Molybdän zur Passivierung. Ein Zusatz von 2 bis 5% Molybdän verbessert die Lochfraßkorrosionsbeständigkeit hochlegierter Stähle. Bei hohen Temperaturen verbessert Molybdän die Zunderbeständigkeit des Stahls.

### ***Edelbaustähle-Vergütungsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Anlaßbeständigkeit und der Einhärtbarkeit, Verringerung der Gefahr der Anlaßversprödung

Gehalt: bis 0,5% Mo

Beispiel: 42 CrMo 4

#### ***Edelbaustähle-Warmfeste Stähle***

Wirkung: Steigerung der Warmfestigkeit und der Zeitstandfestigkeit durch Mischkristallhärtung und Karbidausscheidung

Gehalt: bis 1 % Mo

Beispiel: 15 Mo 3; 21 CrMoV 5 11

#### ***Edelbaustähle-Nitrierstähle***

Wirkung: Erhöhung der Härte der Nitrierschicht durch Bildung von Mo-Nitriden

Gehalt: 0,15% bis 1% Mo

Beispiel: 34 CrAlMo 5; 31 CrMo 12

#### ***Edelbaustähle-Druckwasserstoffbeständige Stähle***

Wirkung: Verringerung der Entkohlungsneigung durch Karbidbildung. Karbide auch bei erhöhten Temperaturen stabil

Gehalt: bis 0,5% Mo in niedriglegierten und etwa 1% Mo in hochlegierten Stählen

Beispiele: 24 CrMo 10; X 20 CrMoV 12-1

#### ***Rost- und säurebeständige Stähle***

Wirkung: Erhöhung der Lochfraßbeständigkeit gegenüber chloridhaltigen Medien

Gehalt: bis 2% Mo

Beispiel: X 12 CrNiMo 17-12-2

### **Kupfer**

Die Verbesserung der Witterungsbeständigkeit durch Massenanteile von 0,07 bis 0,15% Kupfer, besonders in Gegenwart von Phosphor, führte zur Einführung von Kupfer als Legierungselement in witterungsfesten Baustählen. Dabei reichen schon Kupfergehalte von 0,2 bis 0,3% zur Erzielung eines erhöhten Rostwiderstandes aus. Kupferzusätze steigern die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Härtebarkeit. Deshalb werden Qualitätsstähle, für die auch eine erhöhte Witterungsbeständigkeit gefordert wird, mit Kupferzusatz erschmolzen, z.B., St 52-3 Cu3 mit 0.25 bis 0.35% Kupfer. In Werkzeugstählen hat Kupfer noch keine Verwendung gefunden, da die Verbesserung der Härtebarkeit durch andere Legierungselemente wirtschaftlicher zu erreichen ist und Kupfer Oberflächenfehler bei der Warmverformung bewirken kann. Bei der Warmverarbeitung von kupferhaltigen Stählen kann an der Oberfläche angereichertes Kupfer unter Wirkung von Zugspannungen in die Korngrenzen eindringen und zu Oberflächenrissen führen (Lötbrüchigkeit). In rostfreien austenitischen Stählen bewirkt ein Kupferzusatz von bis zu 3% besonders in Verbindung mit Molybdän eine Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit.

#### ***Wetterfeste Baustähle***

Wirkung: Bildung wetterfester Deck- und Schutzschichten in Verbindung mit Phosphat- und Sulfatkomplexen zusammen mit Cr

Gehalt: 0,25%- 0,55%

Beispiele: S355J2WP ( ≈ 9 CrNiCuP 3-2-4 )

#### ***Austenitische Cr-Ni-Stähle***

Wirkung: Erhöhung der Beständigkeit gegen Salz- und Schwefelsäure

Gehalt: 1%-2%

Beispiel: X 2 NiCrMoCu 25-20-5

#### ***Sinterstähle***

Wirkung : Schwundkompensation  
Gehalt: ca. 1,5%

### **Kobalt**

Kobalt gehört zu der Gruppe der Austenitbildner, verschiebt aber die Ferritumwandlung in Massenanteilen bis zu 70% zu höheren Temperaturen und weist die höchste Curie-Temperatur aller Metalle mit 1121°C auf.

### ***Martensitahärtende Stähle***

Wirkung: Kobalt ist in der Matrix gelöst und bewirkt eine erhöhte Versetzungsdichte des Ni-Martensits. Außerdem wird die Wirkung ausscheidungsbildender Elemente durch eine verminderte Löslichkeit im Stahl durch Kobalt verstärkt.

Gehalt: 8 - 12% Co

Beispiel: X 2 NiCoMo 18-8-5

### ***Schnellarbeitsstähle (und hochlegierte Warmarbeitsstähle)***

Wirkung: Durch Mischkristallbildung werden die Warmhärte und die Anlaßbeständigkeit durch Beeinflussung der Kohlenstoffdiffusion erhöht. Das Sekundärhärtemaximum wird zu höheren Anlaßtemperaturen verschoben.

Gehalt: 5 - 10% Co

Beispiele: HS 18-1-2-5, X 20 CrCoWMo 10-10

### ***Dauermagnetstähle***

Wirkung: Erhöhung der Sättigungs- und Remanenzflußdichte und der Koerzitivfeldstärke von Dauermagneten

Gehalt: bis 50 % Co

Beispiel: AlNiCo 30/10

### ***Hochwarmfeste Stähle und Legierungen***

Gehalt: ca. 20% Co

Beispiele: X 12 CrCoNi 21-20; NiCr 20 Co Mo

### ***Warmarbeitsstähle***

Gehalt: bis 20% Co

Beispiel: X 20 CoCrWMo 10-9

### **Wolfram**

Wolfram ist ein sehr starker Karbidbildner zumal es das Austenitgebiet einengt (Ferritbildner). Es erhöht die Warmfestigkeit, Anlaßbeständigkeit und die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen bis hin zur Rotglut.

### ***Kaltarbeitsstähle***

Wirkung: Erhöhung des Verschleißwiderstandes durch Karbidausscheidungen

Gehalt: bis 2% W

Beispiel: 105 WCr 6, X 210 CrW 6

### ***Warmarbeitsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Warmfestigkeit, der Anlaßbeständigkeit und der Verschleißfestigkeit durch Sonderkarbidausscheidungen

Gehalt: bis 8% W

Beispiel: X 30 WCr V 5-3

### ***Schnellarbeitsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Warmhärte, der Anlaßbeständigkeit und der Verschleißfestigkeit durch Sonderkarbidausscheidungen  
Gehalt: 2 - 18% W  
Beispiel: HS 2-9-1, HS 18-1-2-5

### **Niob**

Die Elemente Nb, Ti und V sind die "klassischen" Mikrolegierungselemente, die für die thermomechanische Behandlung eingesetzt werden. Alle drei Elemente weisen eine hohe Affinität zu Kohlenstoff und Stickstoff auf, so daß Karbide, Nitride oder Karbonitride gebildet werden.

#### ***Feinkornbaustahl (TM-Stahl)***

Wirkung: Feinkornhärtung durch Rekristallisationsbehinderung und Behinderung des Austenitkornwachstums, Ausscheidungshärtung, daher hohe Festigkeit bei guter Zähigkeit  
Gehalt: weniger als 0,1% Nb, meist < 0,05% Nb  
Beispiel: FeE 420 KGTM (StE 420 TM)

#### ***Stabilisierte austenitische Cr-Ni-Stähle***

Wirkung: Steigerung der Zeitstandfestigkeit. Das Abbinden des Kohlenstoffs als NbC verhindert die Ausscheidung von Chromkarbiden, die Kornzerfallsgeschwindigkeit wird erniedrigt  
Gehalt: 10-fache des prozentualen Gehaltes an C, doch nicht mehr als 1%  
Beispiel: X 6 CrNiNb 18-10

#### ***Stabilisierte ferritische Chromstähle***

Gehalt: 10-fache des prozentualen Gehaltes an C, doch nicht mehr als 1%  
Beispiel: X 1 CrNiMoNb 28-4-2

#### ***Hochwarmfeste Nickellegierungen***

Wirkung: Niob ersetzt Aluminium in der intermetallischen Phase Ni<sub>3</sub>Al  
Gehalt : etwa 5% Nb  
Beispiel: Inconel 718 (Handelsname)

### **Titan**

#### ***Feinkornbaustähle (TM-Stähle)***

Wirkung: Feinkornhärtung durch Rekristallisationsbehinderung und Behinderung des Austenitkornwachstums, Ausscheidungshärtung durch Titankarbide, daher hohe Festigkeit bei guter Zähigkeit  
Gehalt: weniger als 0,2% Ti

#### ***Stabilisierte austenitische Cr-Ni-Stähle***

Wirkung: Steigerung der Zeitstandfestigkeit. Das Abbinden des Kohlenstoff in TiC verhindert die Ausscheidung von Chromkarbiden  
Gehalt: 5-fache des prozentualen Gehaltes an Kohlenstoff, doch nicht mehr als 0,8% Ti  
Beispiel: X 6 CrNiTi 18-10

#### ***Stabilisierte ferritische Chromstähle***

Gehalt: 7-fache des prozentualen Gehaltes an Kohlenstoff  
Beispiel: X 6 CrTi 17

#### ***Hochwarmfeste Nickellegierungen***

Wirkung: Titan ersetzt Aluminium in der intermetallischen Phase Ni<sub>3</sub>Al  
Gehalt: etwa 5% Ti  
Beispiel: Nimonic 90 (Handelsname)

### Vanadium

#### ***Feinkornbaustähle (TM-Stähle)***

Wirkung: Ausscheidungshärtung. Gelöst wirkt Vanadium umwandlungsverzögernd. Die kornfeinende Wirkung ist wesentlich geringer als die von Niob und Titan. Durch die relativ hohe Löslichkeit ist eine Ausscheidungshärtung auch nach dem Normalglühen möglich

Gehalt: weniger als 0,22% V

#### ***Schnellarbeitsstähle***

Gehalt: 1,0 - 4,0% V

Beispiel: HS 6-5-2

#### ***Warmarbeitsstähle***

Wirkung: Steigerung der Härte, Erhöhung des Verschleißwiderstandes und Verbesserung der Anlaßbeständigkeit

Gehalt: weniger als 1% V

Beispiel: X 40 CrMoV 5-1

#### ***Warmfeste ferritische Stähle***

Gehalt: weniger als 1 % V

Beispiel : X20 CrMoV12-1

### Aluminium

Neben Silizium ist Aluminium das wichtigste Desoxidationsmittel. In beruhigt vergossenen Stählen beträgt der Aluminiumgehalt etwa 0.01%.

#### ***Feinkornbaustähle***

Wirkung: Beim Einstellen bestimmter Al- und N-Gehalte wird die Keimbildung bei der  $\alpha/\gamma$ -Umwandlung begünstigt, das Kornwachstum behindert und die Feinkörnigkeit verbessert.

Gehalt:  $\geq 0,02\%$  Al, falls N nicht durch Nb, Ti oder V abgebunden wird

Beispiel: FeE 460 KGTM (StE 460 TM)

#### ***Nitrierstähle***

Wirkung: Erhöhung der Härte der Nitrierschicht und des Verschleißwiderstandes

Gehalt: 0,8 - 1,2% Al

Beispiel: 34 CrAl 6; 41 CrAlMo 7

#### ***Hitze- und zunderbeständige Stähle***

Wirkung: Herabsetzen der Zundergeschwindigkeit durch die Bildung einer festhaftenden Al-reichen Deckschicht

Gehalt: 0,5 - 1,7% Al

Beispiel: X 10 CrAl 18

#### ***Heizleiterlegierungen***

Wirkung: Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes. In Verbindung mit hohen Chromgehalten erhöht Aluminium die Zunderbeständigkeit

Gehalt: 4,0 - 6,0% Al

Beispiel: CrAl 20-5

**Warmfeste, hochwarmfeste Stähle, aushärtbare Stähle**

Wirkung: Erhöhung der Warmfestigkeit durch Ausscheidung von intermetallischen Phasen

Gehalt: 0,05 - 0,15% Al

Beispiel: X 2 NiCoMo 18-8-5; X 32 NiCrAlTi 32-20; X 7 CrNiAl 17-7

**Stickstoff**

Stickstoff wirkt als Austenitbildner ähnlich wie Kohlenstoff. Die geringe maximale Löslichkeit des Eisens für Stickstoff (max. 0,10 1% N bei 594°C) ist jedoch deutlich größer als die für Kohlenstoff (max. 0,02% C bei 723°C). Durch Zulegierung anderer Elemente oder Druckaufstickung kann der Stickstoffgehalt im Stahl deutlich erhöht, ein Teil des Nickels in austenitischen Stählen ersetzt die Wirkung des Kohlenstoffes und der Kohlenstoffgehalt kann abgesenkt werden.

***Austenitische Cr-Ni Stähle***

Wirkung: Festigkeitssteigerung und Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

Gehalt: bis ca. 0,25% N

Beispiel: X 2 CrNiN 18-10

***Rost- und säurebeständige Stähle***

Wirkung: Substitution des Austenitbildners Nickel. Erhöhung der Warmfestigkeit und in Kombination mit Mo der Beständigkeit gegen Lochkorrosion.

Gehalt: 0,1 - 0,5% N

Beispiele: X 2 CrNiMoN 17-13-5; X 2 CrNiMoN 22-5

***Feinkornbaustähle***

Wirkung: Verbesserung der Keimbildung und Behinderung des Kornwachstums durch AlN

***Automatenstähle***

Wirkung: Verbesserung des Spanbruchs unter Berücksichtigung des P-Gehaltes

Gehalt: 0,007 - 0,020% N

***Ventilstähle***

Wirkung: Erhöhung der Warmfestigkeit und Härte

Gehalt : 0,20 - 0,50% N

Beispiel: X 55 CrMnNiN 20-8

***Vergütungsstähle***

Wirkung: Erhöhung der Härte und der Festigkeit durch ungebundenen Stickstoff

Gehalt: ca. 0,2% N

**Bor**

Bor verzögert die Austenitumwandlung in der Ferritstufe bereits in sehr geringen Massenanteilen sehr wirkungsvoll. Im Bereich erhöhter Temperaturen verbessern mit Bor gebildete Ausscheidungen die Festigkeit austenitischer CrNi-Stähle.

***Vergütungsstähle***

Wirkung: in niedriglegierten Vergütungsstählen wird die kritische Abkühlgeschwindigkeit so weit abgesenkt, daß eine Öl- anstatt einer Wasserhärtung erfolgen kann.

Gehalt: 0,001 - 0,004% B

Beispiele: 30 MnCrB 5

***Werkzeugstähle***

Wirkung: Verbesserung der Warmumformbarkeit

Gehalt: ca. 0,004% B

Beispiel : NiCr 26 B

***Stähle für die Kalt- und Massivumformung***

Wirkung: Härthebarkeitssteigerung ohne wesentliche Verschlechterung der Umformbarkeit

Gehalt: ca. 0,002% B

Beispiel: 35 B 2

***Einsatzstähle***

Wirkung: durch Bildung von Bornitriden erfolgt eine Erhöhung der Schlagfestigkeit und -zähigkeit

Beispiel: 23 CrMoB 33

***Chrom-Nickel Stähle***

Wirkung: Erhöhung der Streckgrenze und der Festigkeit auch bei höheren Temperaturen durch Ausscheidungshärtung

***Automatenstähle***

Wirkung: Verbesserung der Zerspanbarkeit durch die Bildung komplexer Mn-B-Oxide

***Federstähle***

Gehalt :  $\geq 0,0005\%$  B

Beispiel: 52 MnCrB 3