Stähle für Schmiedestücke im Maschinen- und Anlagenbau: Stahlauswahl und Wärmebehandlung

Von Ing. (grad.) Peter Roth, Krefeld, und Ing. (grad.) Johann Scherak, Duisburg

Aus der Vielzahl der genormten Stahlsorten ist für jedes Bauteil der bestgeeignete Stahl zu bestimmen.
Aus der Bewertung der Anwendungsanforderungen

- mechanische Belastung (Art, Höhe)
- thermische Belastung
- korrosive Belastung

wird bereits die Anzahl der möglichen Werkstoffe eingegrenzt. Die Berücksichtigung der Weiterverarbeitungsbedingungen — Schweißen, mechanische Bearbeitung etc. — die Prüfung der mengenmäßigen Verfügbarkeit sowie die Betrachtung der Werkstoffkosten sollen letztlich zur Verwendung derjenigen Stahlsorte führen, die den jeweiligen technischen Anforderungen genügt und gleichzeitig die wirtschaftlich optimale Lösung darstellt.
Oftmals können die im Maschinen- und Anlagenbau eingesetzten Schmiedeteile hinsichtlich der Werkstoffsorte nicht isoliert betrachtet werden. Dort, wo sie als Verbindungselemente mit anderen Bauteilen bzw. Stahlsorten in Berührung kommen, ist die Stahlgüte vielfach nicht mehr frei wählbar. Regelwerte der Anlagenbetreiber, Technischen Überwachungs-Vereine oder Klassifikationsgesellschaften grenzen über Zulassungen den „qualitativen Rahmen" der möglichen Werkstoffe bereits ein. Auch aus der Forderung nach Verwendung von möglichst gleichen Stählen innerhalb einer Konstruktion ergeben sich letztlich Einschränkungen in der Stahlauswahl, da die gleichzeitig verwendeten anderen Stahlerzeugnisse wie Bleche, Rohre etc. vielfach ein quantitatives und somit kostenrelevantes Übergewicht haben.
Bei schwierigen Problemstellungen neigt der Konstrukteur vielfach dazu, aus der Erfahrung zu schöpfen und auf „altbewährte Werkstofflösungen" zurückzugreifen, obwohl Neu- bzw. Weiterentwicklungen auf dem Werkstoffsektor andere, durchaus bessere Möglichkeiten bieten könnten. Aus diesem Grunde sei daher an dieser Stelle die Empfehlung ausgesprochen, im Rahmen einer Werkstoffberatung auf die bei den Stahl- und Schmiedestückherstellern vorliegenden Erfahrungen zurückzugreifen.

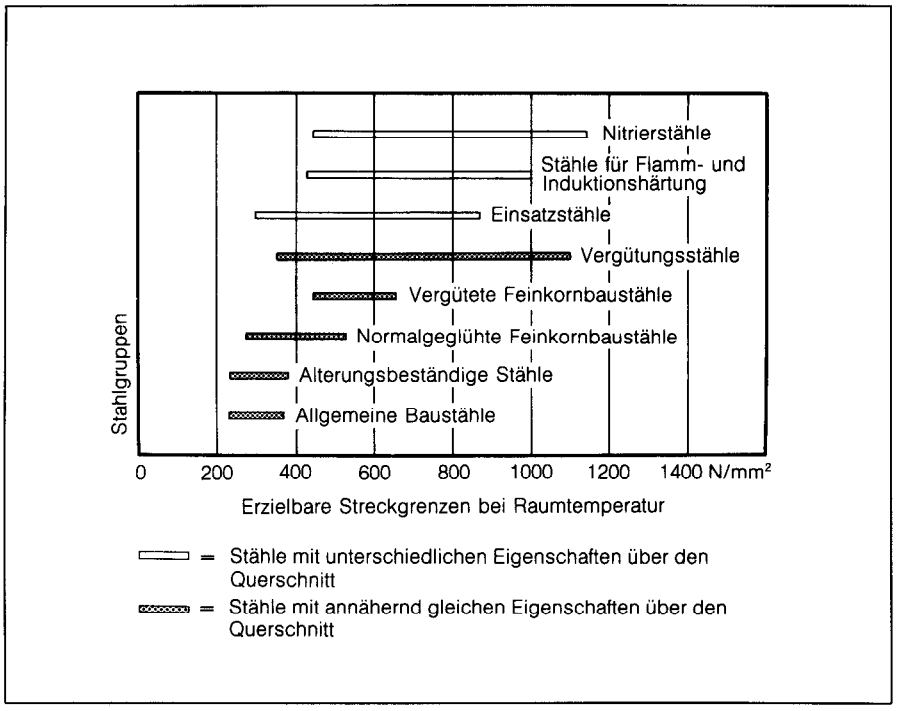
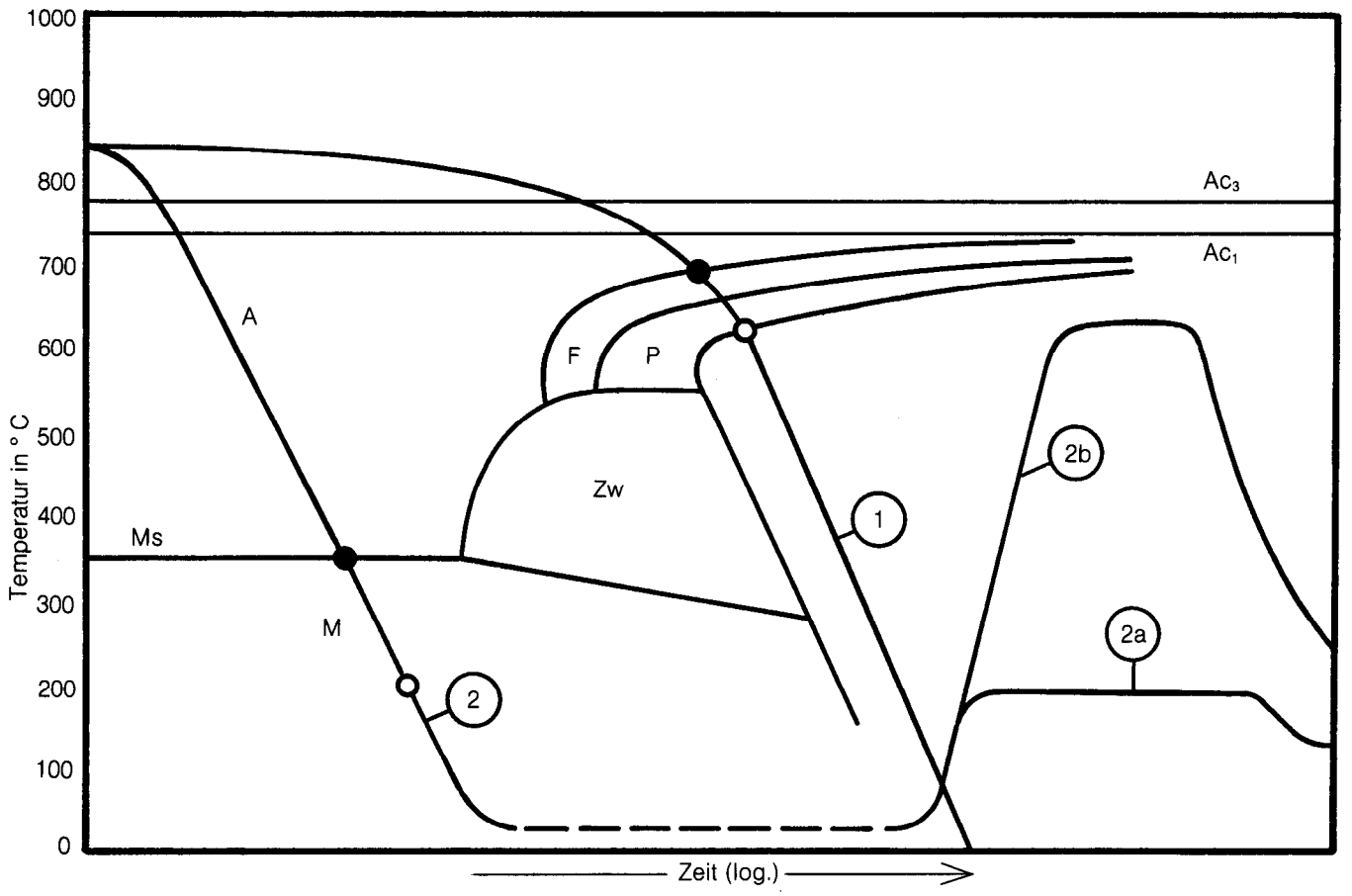


Bild 1: Überblick über die wichtigsten Stahlgruppen für den Maschinen- und Anlagenbau

Die heute zur Verfügung stehenden zahlreichen Stahlsorten wurden unter Einbeziehung der verschiedensten Anwendungsbereiche in DIN-Normen zusammengefaßt. Einen Überblick über die für den Maschinen- und Anlagenbau bedeutendsten Werkstoffgruppen gibt das *Bild 1.*
Die Eigenschaften einer Stahlsorte werden im wesentlichen durch die

- chemische Zusammensetzung bzw. Legierung
- Wärmebehandlung
- sowie eine Kombination miteinander festgelegt.

Der Einfluß der Legierungs- bzw. Begleitelemente ist in der Literatur hinreichend beschrieben, so daß an dieser Stelle nicht mehr im Detail darauf eingegangen wird. Es muß nur darauf hingewiesen werden, daß letztlich die Möglichkeit des Legierens dem Stahl Anwendungsbereiche eröffnet, die durch die jeweiligen Wärmebehandlungsverfahren beträchtlich erweitert werden.
Bei den in Bild 1 wiedergegebenen Stahlgruppen bestimmen Wärmebehandlungen zu einem erheblichen Anteil die Werkstoffeigenschaften. Zum besseren Verständnis der werkstofflichen Zusammenhänge wurde daher eine Beschreibung der Wärmebehandlungsverfahren vorangestellt.



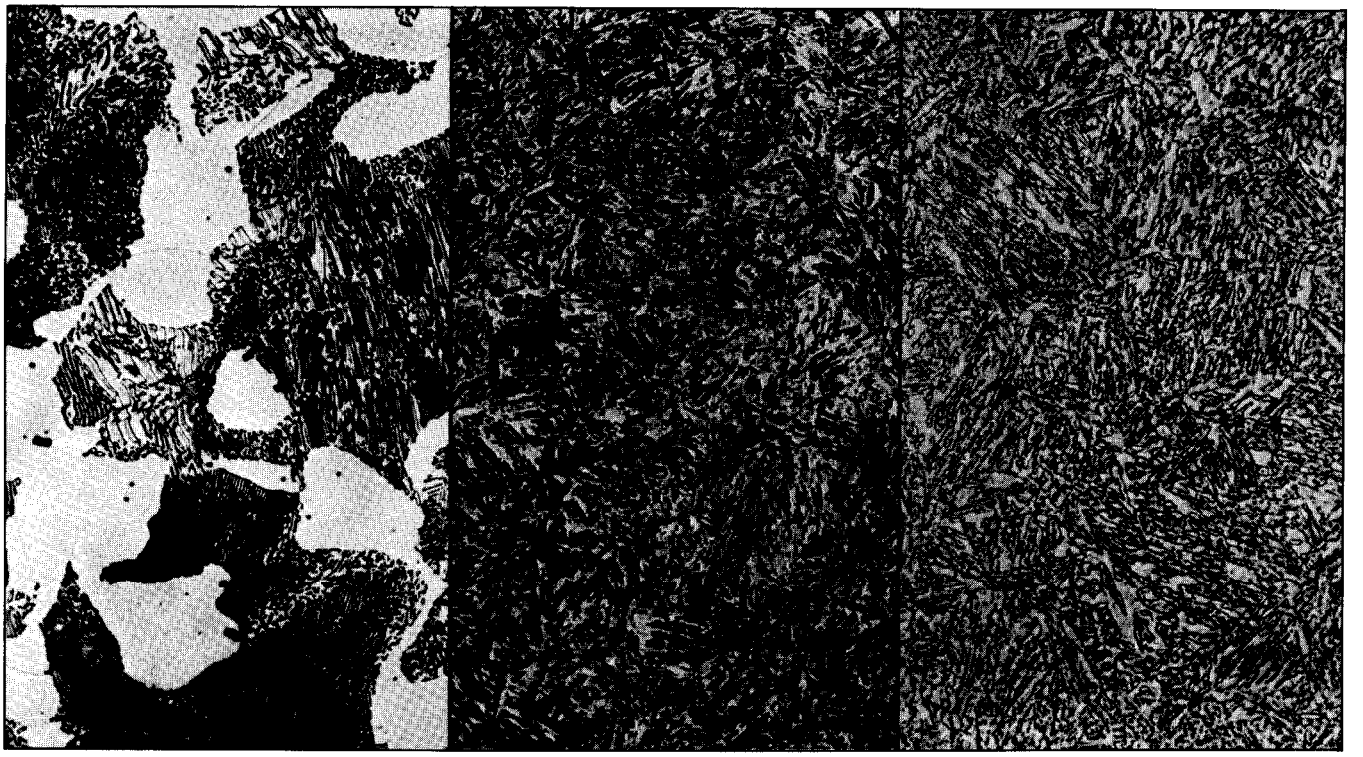
● = Beginn der Umwandlung
○ = Ende der Umwandlung

A Bereich des Austenits
F Bereich der Ferritbildung
P Bereich der Perlitbildung

Zw Bereich der Zwischenstufen-Gefügebildung
M Bereich der Martensitbildung

Bild 2: Schematische Darstellung von Wärmebehandlungen im (kontinuierlichen) ZTU-Schaubild

a) normalgeglüht | b) gehärtet | c) gehärtet und angelassen



Ferrit — Perlit | Martensit | Angelassener Martensit | V = 500 :1

Bild 3: Gefügeausbildung beim Stahl Ck 45

Beeinflussung der Stahleigenschaften durch die Wärmebehandlung

Verfahren zur Erzielung annähernd gleicher Eigenschaften über den Querschnitt

Zum besseren Verständnis ist an dieser Stelle ein Zeit-Temperatur-Umwandlungsbild eingefügt *(Bild 2),* das die erzielbaren Gefügezustände eines leicht legierten Stahles in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit beschreibt.
Bei durchgreifender Erwärmung auf eine Temperatur oberhalb der Temperaturlinie Ac_3 (siehe Bild 2) liegt ein homogenes, als Austenit bezeichnetes Gefüge vor. Bei der nachfolgenden Abkühlung findet eine Gefügeumwandlung statt. Je nach Abkühlgeschwindigkeit, die vom Abkühlmedium, aber auch vom Querschnitt abhängt, treten unterschiedliche Gefügezustände auf, die als Martensit, Zwischenstufe, Perlit und Ferrit bezeichnet werden, wobei Martensit die höchste, Ferrit die niedrigste Härte aufweist.
Bild 3 zeigt die verschiedenen Gefügeausbildungen bei dem Stahl Ck 45.

Normalglühen (Kurvenverlauf 1)

Beim Normalglühen wird das Werkstück über den gesamten Querschnitt auf eine Temperatur ca. 30 bis 50 °C oberhalb des Umwandlungspunktes Ac_3 erwärmt und nach einer definierten Haltezeit an ruhender Luft abgekühlt. Die relativ langsame Abkühlgeschwindigkeit führt meist zu einem Ferrit-Perlit-Gefüge. Als Endwärmebehandlung wird das Normalglühen überwiegend nur bei unlegierten und niedrig legierten Stählen angewendet und dient im Regelfall zur Beseitigung von durch Schweißen oder Warmumformen hervorgerufenen ungünstigen Gefügeausbildungen.

Härten (Kurvenverlauf 2)

Im Gegensatz zum Normalglühen wird beim Härten schroff, je nach Werkstoff und Abmessung entweder in Wasser oder Öl, abgekühlt. Angestrebt wird eine Umwandlung in der Martensit- bzw. Zwischenstufe, um eine möglichst hohe Härte zu erreichen.

Anlassen (Kurvenverlauf 2a und 2b)

Nur gehärtete Werkstücke sind zwar sehr hart, aber auch spröde. Bauteile, die ihre Härte weitgehend behalten sollen, z. B. auf Verschleiß beanspruchte Teile, Wälzlager u. ä., werden nur bei Temperaturen von etwa 200 °C angelassen. Die Härte verringert sich kaum, die inneren Spannungen werden jedoch abgebaut (Kurve 2a).

Werden Temperaturen oberhalb von etwa 450 °C angewendet, so bezeichnet man die aus Härten und Anlassen bestehende Behandlung als Vergüten (Kurvenverlauf 2 und 2b). Im Temperaturbereich von etwa 500—680 °C werden zwar Festigkeit und Streckgrenze gegenüber dem nur gehärteten Zustand stärker verringert, dafür wird aber die Duktilität erheblich gesteigert. Im Abschnitt Vergütungsstähle wird hierauf noch näher eingegangen.

Verfahren zur Steigerung der Oberflächenhärte

Von zahlreichen Bauteilen, wie Getriebeteilen, Wellen und dgl. wird gefordert, daß sie eine Oberfläche aufweisen, die einen hohen Verschleißwiderstand besitzt. Der Kern aber soll gleichzeitig bei einer hohen Festigkeit bzw. Streckgrenze eine gute Zähigkeit besitzen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, durch eine zusätzliche Wärmebehandlung eine harte Randschicht zu erzeugen. Hierzu sind zahlreiche Verfahren entwickelt worden. Die zwei wichtigsten Verfahrensgruppen werden kurz beschrieben:

Verfahren, bei denen die chemische Zusammensetzung der Randschicht nicht verändert wird

Flamm- und Induktionshärten

Hierbei wird die äußere Zone des vorher meist vergüteten oder normalgeglühten Bauteils durch örtliche Erwärmung mittels einer Flamme oder durch Induzierung von Wirbelströmen in der Randschicht auf Härtetemperatur gebracht und unmittelbar danach meist mit Wasser abgeschreckt. Zur Beseitigung der Spannungen ist ein anschließendes Entspannen bei etwa 150—200 °C erforderlich.
Vorteil der genannten Härteverfahren ist, daß nur die für die Oberflächenhärtung bestimmten Partien erwärmt werden müssen. Typische Anwendungsfälle sind Wellen, die nur an den Laufflächen gehärtet werden, Kurbelwellen, Führungsleisten u. dgl.

Verfahren, bei denen die chemische Zusammensetzung der Randschicht verändert wird

Aufkohlen und Einsatzhärten

Hierbei wird Kohlenstoff bei Temperaturen von etwa 900—930 °C in die Oberfläche der zu behandelnden Teile eindiffundiert. Die Einsatzbehandlung besteht aus 3 Teilschritten:

- dem Aufkohlen der Randschicht auf bestimmte Randkohlenstoffgehalte und Aufkohlungstiefen
- dem Härten
- dem Anlassen bzw. Entspannen.

Die optimalen Randkohlenstoffgehalte liegen je nach Stahltyp zwischen 0,6 und 0,9%. Niedrigere Gehalte bringen nicht die geforderte hohe Randhärte, höhere Gehalte führen zu Überkohlungen mit Bildung von meist unerwünschtem Korngrenzenzementit und Restaustenit. Nach dem Aufkohlen weisen Rand und Kern unterschiedliche Kohlenstoffgehalte auf und damit unterschiedliche Gefüge und Eigenschaften nach einer Wärmebehandlung.
Die möglichen Wärmebehandlungsfolgen für Einsatzstähle sind in DIN 17 220, Bild 2, angegeben. Die am häufigsten angewendeten Verfahren sind das Direkthärten aus dem Einsatz und das Einfachhärten. Das Direkthärten ist das wirtschaftlichste Verfahren. Es wird vor allem bei der Großserienfertigung von Getriebeteilen eingesetzt. Voraussetzung sind Stähle, die bei den angewendeten Aufkohlungstemperaturen nicht zur Grobkornbildung und Überkohlung neigen. Beim Einfachhärten läßt man die aufgekohlten Teile zunächst in Kohlungsmittel oder an Luft abkühlen und erwärmt sie anschließend auf Härtetemperatur. Die Verwendung von Feinkornstählen ist vorteilhaft. Die Behandlungsfolgen Einfachhärten mit Zwischenglühen, Einfachhärten mit isothermischer Umwandlung und Doppelhärten werden meist nur in Sonderfällen, z. B. bei großen Werkstücken bzw. bei den höher legierten Einsatzstählen angewendet.
Nach dem Härten wird bei niedrigen Temperaturen um 150—200 °C angelassen. Das martensitische Randgefüge wird hierdurch zäher und neigt weniger zu Rissen. Die Härte der Randzone fällt nur geringfügig um etwa 1—2 HRC ab.

Nitrieren

Beim Nitrieren werden die vergüteten und fertig bearbeiteten Teile bei Temperaturen zwischen 500 und 590 °C einem Stickstoff abgebendem Mittel ausgesetzt. Dabei diffundiert atomarer Stickstoff in die Randzone ein und bildet mit den Eisenatomen Nitride. Bei Vorhandensein von Eisenkarbiden wird ferner ein Teil des Stickstoffes zu Eisenkarbonitrid abgebunden. In ähnlicher Weise reagieren Chrom, Molybdän und Vanadin. Bei den mit Aluminium legierten Stählen bildet sich ferner das sehr harte Aluminiumnitrid.
Je nach angewendetem Verfahren spricht man von Gasnitrieren, Badnitrieren, Pulvernitrieren, Glimmnitrieren.
An sich können bei allen Nitrierverfahren, gleicher Werkstoff vorausgesetzt, annähernd gleiche Oberflächenhärten

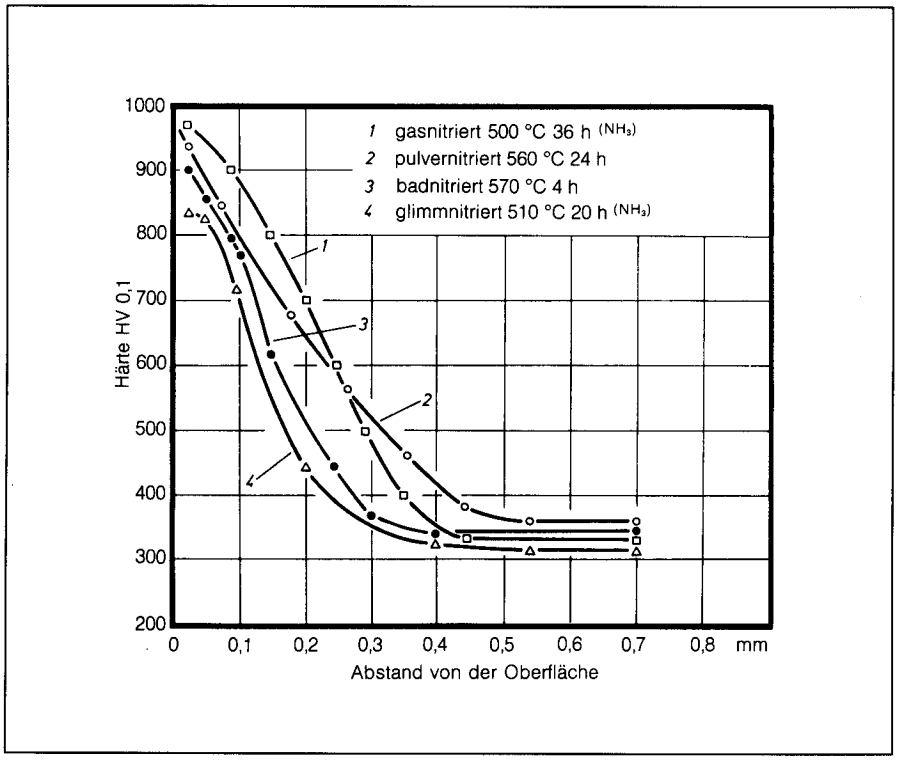


Bild 4: Härteverlauf im Nitrierstahl 31 CrMoV 9 V nach unterschiedlicher Nitrierung

erzielt werden *(Bild 4)*, in der Zusammensetzung und im Aufbau der äußersten Randschicht, der sog. Verbindungsschicht, sowie in der angrenzenden Diffusionsschicht ergeben sich jedoch Unterschiede mit unterschiedlichen Eigenschaften.
Das Nitrierverfahren eignet sich vor allem für Bauteile mit starken Querschnittsübergängen, dünnwandige oder sehr lange Teile, die bei anderen Oberflächenhärteverfahren zu Verzug oder Rißbildung neigen würden. Typische Beispiele sind Extruderschnecken, Kurbel- und Nockenwellen, Ritzel, Zahnräder, Ventilteile, Dichtungsringe.

Wärmebehandlungen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit

Durch Einstellen eines Gefüges, das die Zerspanung oder das Kaltumformen erleichtert, können Verarbeitungskosten gesenkt werden.
Nachstehend sind die wichtigsten Wärmebehandlungen aufgeführt:

Weichglühen (Zustand G)

Ziel dieser Behandlung ist eine niedrige Härte zur Erleichterung der mechanischen Bearbeitung.
Der Stahl wird im Bereich des unteren Umwandlungspunktes geglüht und anschließend langsam abgekühlt. Ein bestimmter Gefügezustand soll nicht erzielt werden, lediglich eine niedrige Härte.

Behandeln auf kugeligen Zementit (Zustand GKZ)

Diese Behandlung wird vornehmlich für die Kaltmassivumformung angewendet. Durch langzeitiges Glühen im Bereich des unteren Umwandlungspunktes wird eine möglichst kugelige Einformung des Zementits angestrebt, die hierbei erzielten niedrigen Härten liegen niedriger als beim Zustand G.

Behandeln auf eine bestimmte Festigkeit (Zustand BF)

Ziel dieser Behandlung ist, ein „Schmieren" bei der mechanischen Bearbeitung, wie es bei zu niedrigen Härten auftreten kann, zu vermeiden.
Der Stahl wird von einer Temperatur zwischen 850—950 °C unterschiedlich abgekühlt und gegebenenfalls zwischen 550 und 650 °C angelassen, um eine untere und obere Härte gewährleisten zu können.

Behandeln auf Ferrit-Perlit-Gefüge (Zustand BG)

Ziel dieser Behandlung ist die Einstellung eines gut zerspanbaren Ferrit-Perlit-Gefüges. Dazu werden die Stähle zunächst auf eine Temperatur zwischen 900 und 1000 °C erwärmt und anschließend rasch auf die Temperatur der Perlitumwandlung abgekühlt und solange bei dieser Temperatur gehalten, bis das Gefüge vollständig in Perlit und Ferrit umgewandelt ist. Die benötigten Haltezeiten zur vollständigen Umwandlung verlängern sich mit steigendem Legierungsgehalt.

Stahlsorten

Stähle mit annähernd gleichen Eigenschaften über den Querschnitt

Allgemeine Baustähle

Als allgemeine Baustähle gemäß DIN 17 100 gelten unlegierte und niedrig legierte Baustähle, die im wesentlichen aufgrund ihrer Streckgrenze und Zugfestigkeit im warmgeformten oder normalgeglühten Zustand eingesetzt werden.
Kennzeichnend für die allgemeinen Baustähle ist die Einstellung der mech. Kennwerte über die üblicherweise verwendeten festigkeitstragenden Legierungselemente Kohlenstoff und Mangan. Grundsätzlich gilt, daß mit zunehmender Streckgrenze und Zugfestigkeit die Gehalte an Kohlenstoff und Mangan zunehmen. Unter Berücksichtigung der in der DIN 17 100 festgelegten Höchst- bzw. ungefähren Mittelwerte, ist jedoch die Kombination dieser Elemente untereinander zur Sicherstellung der mechanischen Eigenschaften dem Stahlhersteller überlassen.
Mit der Festlegung der maximalen bzw. mittleren Gehalte an Kohlenstoff, der Höchstgehalte an Phosphor, Schwefel, Stickstoff (bei St 52-3 auch Silizium und Mangan) werden die jeweiligen Forderungen an die technologischen Eigenschaften wie z. B. Sprödbruchunempfindlichkeit und Schweißeignung abgesichert.
Die allgemeinen Baustähle unterteilen sich in zwei Gütegruppen (Gütestufe 2 und 3), die bei teilweise gleichen Kennwerten für die Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung Unterschiede in der chem. Zusammensetzung, in der Verarbeitbarkeit, in der Sprödbruchunempfindlichkeit sowie der Schweißeignung aufweisen.
Die Stähle der beiden Gütegruppen unterscheiden sich im wesentlichen in ihrer Sprödbruchunempfindlichkeit, die über definierte Werte der Kerbschlagarbeit festgelegt sind. Im warmgeformten nicht wärmebehandelten Zustand gilt die Kerbschlagarbeit von mind. 27 Joule ($\leq$63 mm Dicke) bei der Gütestufe 2 für die Prüftemperatur von +20 °C, bei der Gütestufe 3 für die Prüftemperatur von ±0 °C. Durch eine Wärmebehandlung (Normalglühen) läßt sich infolge einer Gefügeoptimierung der Grenzwert der Kerbschlagarbeit zu einer erniedrigten Temperatur von —20 °C verschieben. Dies wird durch ausreichende Gehalte von stickstoffab-

bindenden Elementen (z. B. Aluminium) sichergestellt.

Alterungsbeständige Stähle

Als alterungsbeständige Stähle gemäß DIN 17 135 werden unlegierte und niedrig legierte Stähle in normalgeglühtem Zustand bezeichnet. Das Merkmal Alterungsbeständigkeit ist dabei die Kerbschlagarbeit — gemessen an einer künstlich gealterten DVM-Kerbschlagprobe. Hierfür wird die Probe um 10% (bei A St 52 um 5%) kaltverformt und anschließend ½ h bei 250 °C angelassen. Die Prüfung erfolgte bei 20 °C, wobei die Mindestwerte gemäß DIN 17 135 erzielt werden müssen.
Aufgrund der Verwendungsbereiche werden ergänzend Werte für die Kerbschlagarbeit bis −40 °C sowie die Streckgrenze bis nahezu 400 °C angegeben. Gemäß Tabelle 3 in DIN 17 135 muß jedoch berücksichtigt werden, daß für Schmiedestücke die Kerbschlagwerte zunächst nur als Anhaltswerte anzusehen sind. Werkstofflich betrachtet, weisen diese Stähle Ähnlichkeiten mit den allgemeinen Baustählen der Gütegruppe 3 auf. Neben ausreichenden Zugaben von stickstoffabbindenden Elementen (z. B. Aluminium) zur Erzielung der Alterungsbeständigkeit führt eine Normalglühung zur Beseitigung ungünstiger Warmverformungsgefüge zu einer ausreichenden Zähigkeit bei Temperaturen bis −40 °C.

Schweißgeeignete Feinkornbaustähle

Schweißgeeignete Feinkornbaustähle gewinnen aufgrund ihrer höheren mech. Eigenschaften besonders beim Leichtbau an Bedeutung. Die Kombination der Eigenschaften wie hohe Streckgrenze, gute Zähigkeit, Sicherheit gegen Sprödbruch, Schweißeignung, ist das Merkmal dieser Stähle. Als „höherfeste Stähle" können Werkstoffe mit Streckgrenzen >350 N/mm² bezeichnet werden.
Die schweißbaren Feinkornbaustähle werden in 2 Gruppen unterteilt:

Normalgeglühte schweißbare Feinkorn-Baustähle gemäß SEW 089

Ein bedeutendes Kriterium dieser Stähle ist die Schweißeignung bei möglichst niedriger Rißempfindlichkeit. Aus diesem Grunde wird der Kohlenstoffgehalt bei schweißgeeigneten Baustählen auf <0,20% begrenzt. Zur Erzielung höherer Streckgrenzen ist daher eine Erhöhung der Legierungsgehalte erforderlich. Mangangehalte von 1,2 bis 1,6% kennzeichnen diesen Stahltyp.
Die Verwendung von karbid- oder nitridbildenden Elementen wie Aluminium, Niob und Titan in geringen Konzentrationen verbessern das Zähigkeitsverhalten bzw. führen bei gleicher Grundanalyse (Kohlenstoff u. Mangan) zu höheren Streckgrenzen. Werkstofflich betrachtet führt eine Verfeinerung des Gefüges sowie eine Mischkristallbildung mit den Elementen Mangan und Nickel zu diesen Werkstoffeigenschaften, wobei zur Beseitigung der bei hohen Umformtemperaturen auftretenden Kornvergrößerung eine Normalglühung als Endwärmebehandlung erforderlich ist.
Die mit StE 36 bis StE 51 bezeichneten Güten werden im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 089 sowie in Euronorm 113 beschrieben. Eine analoge DIN-Norm befindet sich z. Z. in Vorbereitung.
Entspr. SEW 089 unterteilen sich die Werkstoffe in eine

- Grundreihe
- warmfeste Reihe (z. B. WStE 36)
- kaltzähe Reihe (z. B. TTStE 36)

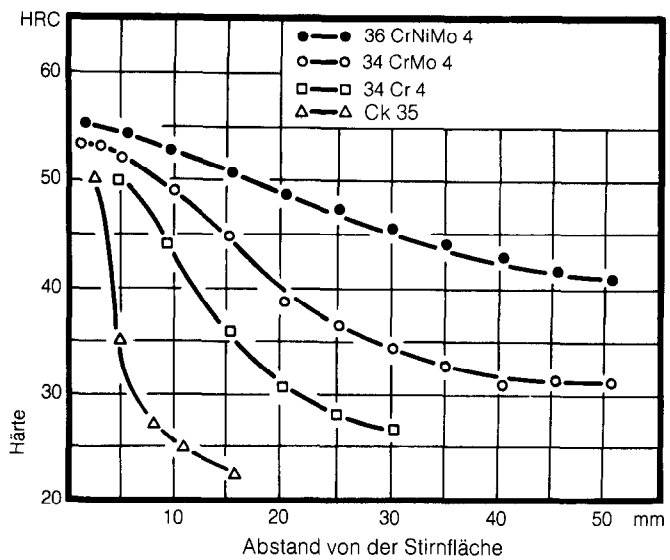
Kennzeichnend für die Stähle der warmfesten Reihe sind Grenzwerte für Warmstreckgrenzen bis <400 °C. Die kaltzähen Stähle zeichnen sich durch definierte Kerbschlagzähigkeit bei Temperaturen bis −60 °C aus.
Stähle der kaltzähen Reihe können, sofern bei der Bestellung vereinbart, auch mit Streckgrenzen bei höheren Temperaturen geliefert werden.

Wasservergütete schweißbare Feinkornbaustähle (Entwurf SEW 094)

Das Vergüten führt zu einer starken Beeinflussung der mech. Eigenschaften. Als charakteristisches Merkmal der wasservergüteten schweißbaren Baustähle kann der begrenzte Gehalt an Kohlenstoff bei definierten Legierungsgehalten an Mangan, Chrom und Molybdän angesehen werden. Die chem. Zusammensetzung wird letztlich durch die Forderung bestimmt, daß beim Schmelzschweißen dieser Stähle unter Vermeidung einer Rißempfindlichkeit in der thermisch beeinflußten Zone dem Grundwerkstoff entsprechende mech. Kennwerte erhalten bleiben.

Vergütungsstähle

Die Vergütungsstähle gemäß DIN 17 200 weisen Kohlenstoffgehalte zwischen 0,20 und 0,60% auf. Als zusätzliche Legierungselemente kommen Mangan, Chrom, Molybdän, Nickel und Vanadin in Betracht. Man spricht deshalb von unlegierten bzw. Mangan-, Chrom-,



Analysen (Mittelwerte der Stähle)

	Ck 35	34 Cr 4	34 CrMo 4	36 CrNiMo 4
C	.35	.33	.33	.34
Si	.25	.25	.25	.25
Mn	.65	.65	.65	.65
Cr	—	1.05	1.05	1.05
Mo	—	—	.22	.22
Ni	—	—	—	1.05

Bild 5: Stirnabschreckkurven (Mittelwerte) der Stähle Ck 35, 34 Cr 4, 34 CrMo 4 und 36 CrNiMo 4

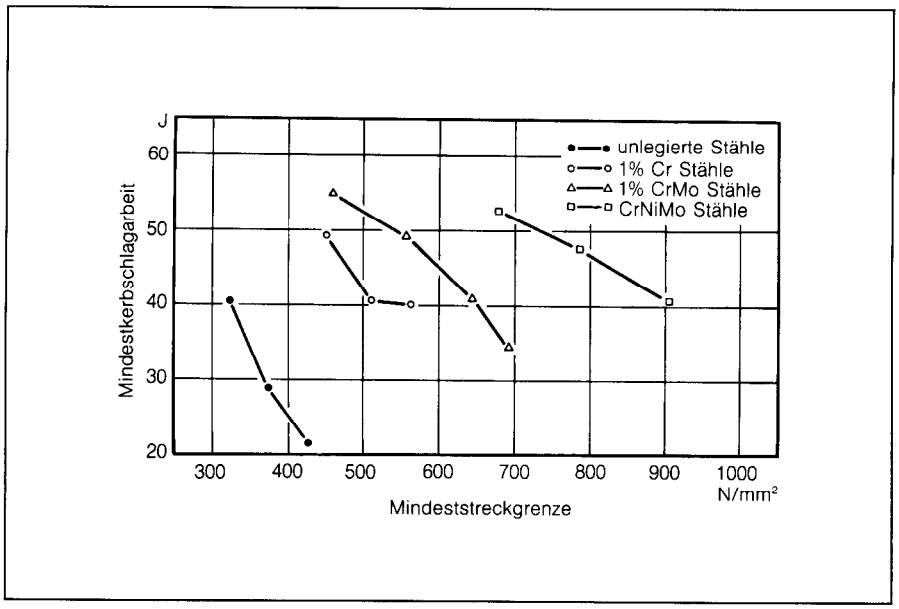


Bild 6: Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Zähigkeit von Vergütungsstählen im Abmessungsbereich 40—100 mm Ø (Mindestwerte nach DIN 17 200)

Chrom-Molybdän-, Chrom-Nickel-Molybdän-Stählen. Innerhalb jeder Legierungsgruppe gibt es mehrere Stähle mit abgestuftem Kohlenstoff- und/oder Legierungsgehalt. Während die „Aufhärtbarkeit", d. h. die in der Randschicht erzielbare höchste Härte in erster Linie eine Funktion des Kohlenstoffgehaltes ist, wird die „Einhärtbarkeit", d. h. die erreichbare Einhärtungstiefe, vor allem durch die Art und Menge der Legierungselemente bestimmt.

Über diese beiden für die Stahlauswahl sehr wichtigen Eigenschaften gibt der Stirnabschreckversuch nach DIN 50 191 Auskunft. Hierbei wird ein Stahlzylinder von 25 mm Ø und 100 mm Länge auf Härtetemperatur des betreffenden Stahles erwärmt und anschließend an einer Stirnfläche durch einen Wasserstrahl abgeschreckt. Auf der Mantelfläche werden 2 Meßbahnen, die um 180° versetzt sind, abgeschliffen. Der Härteverlauf wird in genormten Abständen auf der Mantelfläche nach dem Rockwell C-Verfahren gemessen und in einer Kurve dargestellt. Höhe und Verlauf der Kurve geben Aufschluß über die Härtbarkeit des betreffenden Stahles.

In *Bild 5* sind die Stirnabschreckkurven der Stähle Ck 35, 34 Cr 4, 34 CrMo 4 und 36 CrNiMo 4 miteinander verglichen. Die 4 Stähle weisen praktisch den gleichen Kohlenstoffgehalt auf, die erzielbare Aufhärtbarkeit ist deshalb annähernd gleich. Die Mangan- und Siliziumgehalte unterscheiden sich kaum. Deutlich ist zu erkennen, daß durch Zulegieren von 1% Chrom die Einhärtbarkeit wesentlich erhöht wird, weitere Steigerungen werden durch Molybdän und Nickel erzielt. Daraus folgt, daß zur Erzielung gleicher Festigkeitseigenschaften mit steigendem Vergütungsquerschnitt der Legierungsgehalt der Stähle angehoben werden muß.

Die erzielbaren Mindeststreckgrenzen der einzelnen Stähle in Abhängigkeit vom Querschnitt sind in DIN 17 200 dargestellt. Durch Variierung der Anlaßtemperatur läßt sich ferner das gewünschte Verhältnis von Streckgrenze und Festigkeit zu Dehnung und Einschnürung einstellen. Anhaltswerte geben die Vergütungsschaubilder. Mit steigendem Legierungsgehalt wird auch die Zähigkeit der Stähle, gemessen als Schlagarbeit an der Kerbschlagprobe, erhöht, *Bild 6.* Wird bei großen Querschnitten gleichzeitig hohe Festigkeit und Zähigkeit verlangt, so werden vorwiegend die Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle verwendet.

Wälzlagerstähle

Die Wälzlagerstähle sind in DIN 17 230 genormt. Am meisten werden die durchhärtenden Stähle mit etwa 1% Kohlenstoff und 1,5% Chrom verwendet. Typischer Vertreter ist der Stahl 100 Cr 6. Für größere Abmessungen kommen die Stähle mit weiteren Zusätzen an Mangan bzw. Molybdän in Betracht. Im gehärteten und angelassenen Zustand weisen die Wälzlagerstähle ein martensitisches, mit Karbiden angereichertes Gefüge mit einer Härte von etwa 60 HRC auf. Dies bewirkt einen hohen Verschleißwiderstand. Die auftretenden hohen örtlichen Zug-Druck-Wechselspannungen werden gut aufgenommen. Deshalb eignen sich diese Stähle auch für Anwendungsfälle außerhalb der eigentlichen Wälzlagerindustrie, wenn ähnliche Betriebsbedingungen vorliegen. Bei gleichzeitigem Angriff eines Korrosionsmediums können die nichtrostenden Stähle X 45 Cr 13 und X 102 CrMo 17 eingesetzt werden.

Stähle mit Anforderungen an die Zerspanbarkeit

Bei hoher Zerspanungsarbeit muß geprüft werden, ob ggf. der Einsatz eines Stahles mit verbesserter Zerspanbarkeit wirtschaftliche Vorteile bietet. Kennzeichnend für die Stähle mit guten Zerspanungseigenschaften sind die höheren Gehalte an Schwefel, Phosphor sowie Blei. Als wichtigste in eine Norm eingeordnete Stahlgruppe müssen die Automatenstähle gemäß DIN 1651 bezeichnet werden. Während die Werkstoffe, die nicht für eine Wärmebehandlung vorgesehen sind, wie 9 S 20 bis 9 S MnPb 28, für Schmiedestücke nur eine geringe Bedeutung aufweisen, haben die Einsatz- und Vergütungsautomatenstähle (10 S 20 — 60 S 20) durchaus ihren festen Platz in der Palette der verwendeten Stahlsorten.

Als Ergänzung zu den Automatenstählen haben auch diejenigen Stähle an Bedeutung gewonnen, deren verbessertes Zerspanungsverhalten ausschließlich auf den Zusatz von Blei (0,15/30%) zurückzuführen ist. Als besonderes Merkmal muß bei diesen Stählen die Tatsache hervorgehoben werden, daß die Verbesserung der Zerspanbarkeit ohne Verschlechterungen der mech. Eigenschaften zu erzielen ist. Die Verbesserung der Zerspanbarkeit durch Blei wird besonders bei den Einsatz- und Vergütungsstählen genutzt. Ebenso besteht die Möglichkeit, eine begrenzte Verbesserung der Zerspanbarkeit über einen definierten S-Gehalt (0,020/35%) sicherzustellen.

Stähle, die mit unterschiedlichen Eigenschaften über den Querschnitt eingesetzt werden und bei denen die chemische Zusammensetzung der Randschicht nicht verändert wird

Stähle für Flamm- und Induktionshärtung

Diese Stähle sind in DIN 17 212 genormt. Es sind Abwandlungen der bereits bekannten Vergütungsstähle, sie werden jedoch in Hinblick auf ihre Verwendung unter besonderen Vorgaben erzeugt. Zur Vermeidung der Rißgefahr werden sie grundsätzlich als Feinkornstähle erschmolzen; gegenüber den Vergütungsstählen sind die Kohlenstoffspannen eingeengt und der Phosphorgehalt wird mit max. 0,025% begrenzt.

Um eine ausreichende Oberflächenhärte zu erzielen, sind Kohlenstoffgehalte von mindestens 0,30% erforderlich. Da andererseits die maximale Aufhärtbarkeit bei etwa 0,60% Kohlenstoff erreicht

wird, bewegen sich die Kohlenstoffgehalte dieser Stähle zwischen 0,40 und 0,60%, mit Ausnahme der unlegierten Stähle Cf 35 und Cf 70, die überwiegend für dünnwandige Teile bestimmt sind. Für größere Querschnitte werden, zur Erzielung ausreichender mechanischer Eigenschaften im Kernbereich, Chrom- bzw. Chrom-Molybdänstähle eingesetzt. Mit steigendem Kohlenstoff- und vor allem Legierungsgehalt nimmt naturgemäß die Neigung zur Rißbildung zu. Um das Auftreten von Spannungsrissen infolge des raschen Temperaturwechsels und den damit verbunden Volumenänderungen zu vermeiden, muß bereits bei der Konstruktion darauf geachtet werden, daß scharfe Ecken und große Querschnittsübergänge vermieden werden. Die Härtung ist sehr sorgfältig durchzuführen. Unmittelbar danach ist ein Entspannen von mindestens einer Stunde bei etwa 150—200 °C durchzuführen.

Stähle, die mit unterschiedlichen Eigenschaften über den Querschnitt eingesetzt werden und bei denen die chemische Zusammensetzung der Randschicht verändert wird

Einsatzstähle

Einsatzstähle nach DIN 17 210 sind Baustähle mit Kohlenstoffgehalten zwischen etwa 0,10 und 0,25%, die für eine spätere Aufkohlung und Härtung bestimmt sind. Nach dem Härten weisen sie in der Randzone eine hohe Härte auf, während der Kern zäh bleibt. Die wesentlichen Eigenschaften sind hoher Verschleißwiderstand, gute Dauerfestigkeit und geringe Kerbempfindlichkeit. Der durch die Einsatzschicht verursachte Eigenspannungzustand verbessert die Schwingungsfestigkeit.
Die Verwendung einsatzgehärteter Bauteile ist auf allen Gebieten des Maschinenbaus üblich. Je nach Abmessung und Beanspruchung werden unlegierte und legierte Stähle verwendet. Der gebräuchlichste unlegierte Stahl ist Ck 15. Für höhere Beanspruchungen haben die Chrom-Mangan-Stähle weitgehende Verbreitung gefunden. Wird bei hoher Festigkeit gleichzeitig eine hohe Zähigkeit gefordert, so werden Chrom-Nickel- bzw. Chrom-Nickel-Molybdänstähle eingesetzt. Die Legierungselemente müssen so abgestimmt sein, daß bei einem gegebenen Querschnitt eine Durchhärtung erzielt wird. Auch hier geben die Streubänder des Stirnabschreckversuches Auskunft über die erzielbaren Werte, ferner die mechanischen Eigenschaften „blindgehärteter" Proben für die genormten Abmessungen von 11, 30 und 63 mm Ø.
Für die Direkthärtung wurden Feinkornstähle entwickelt, deren Chromgehalt mit 0,80% begrenzt und die gewünschte Kernhärtbarkeit durch Zusatz von Molybdän und Nickel erzielt wird. Typische Vertreter sind die Werkstoffe 20 MoCr 4, 25 MoCr 4 sowie die noch nicht genormten Stähle 20 NiMoCr 2 und 20 NiMoCr 6.

Nitrierstähle

Grundsätzlich sind alle Stähle nitrierbar. Als Nitrierstähle gemäß DIN 17 211 gelten vergütbare Stähle, die wegen der in ihnen enthaltenen Nitridbildner für das Nitrieren besonders geeignet sind. Neben Eisen bilden die Elemente Chrom, Molybdän und Vanadin mit Stickstoff zusammen Nitride. Eine besonders hohe Affinität zum Stickstoff besitzt Aluminium, wobei besonders harte Aluminiumnitride entstehen. Die höchsten erzielbaren Oberflächen werden deshalb bei den aluminiumhaltigen Stählen, die rund 1% Aluminium enthalten, erzielt.
Der Legierungsgehalt wird, wie bei den Vergütungsstählen, auf die verlangte Festigkeit bzw. Streckgrenze bei einem gegebenen Querschnitt bezogen. Da das Nitrieren unterhalb der Anlaßtemperatur erfolgt, werden die mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes nicht verändert. Um eine optimale Härteannahme der Randschicht zu erzielen, ist es erforderlich, daß beim Härten eine möglichst ferritfreie Randschicht erzielt wird.

Bildnachweis:
Bilder 1, 2, 3, 5 und 6: Thyssen Edelstahlwerke, Krefeld.
Bild 4: Merkblatt 447 „Nitrieren", Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf.