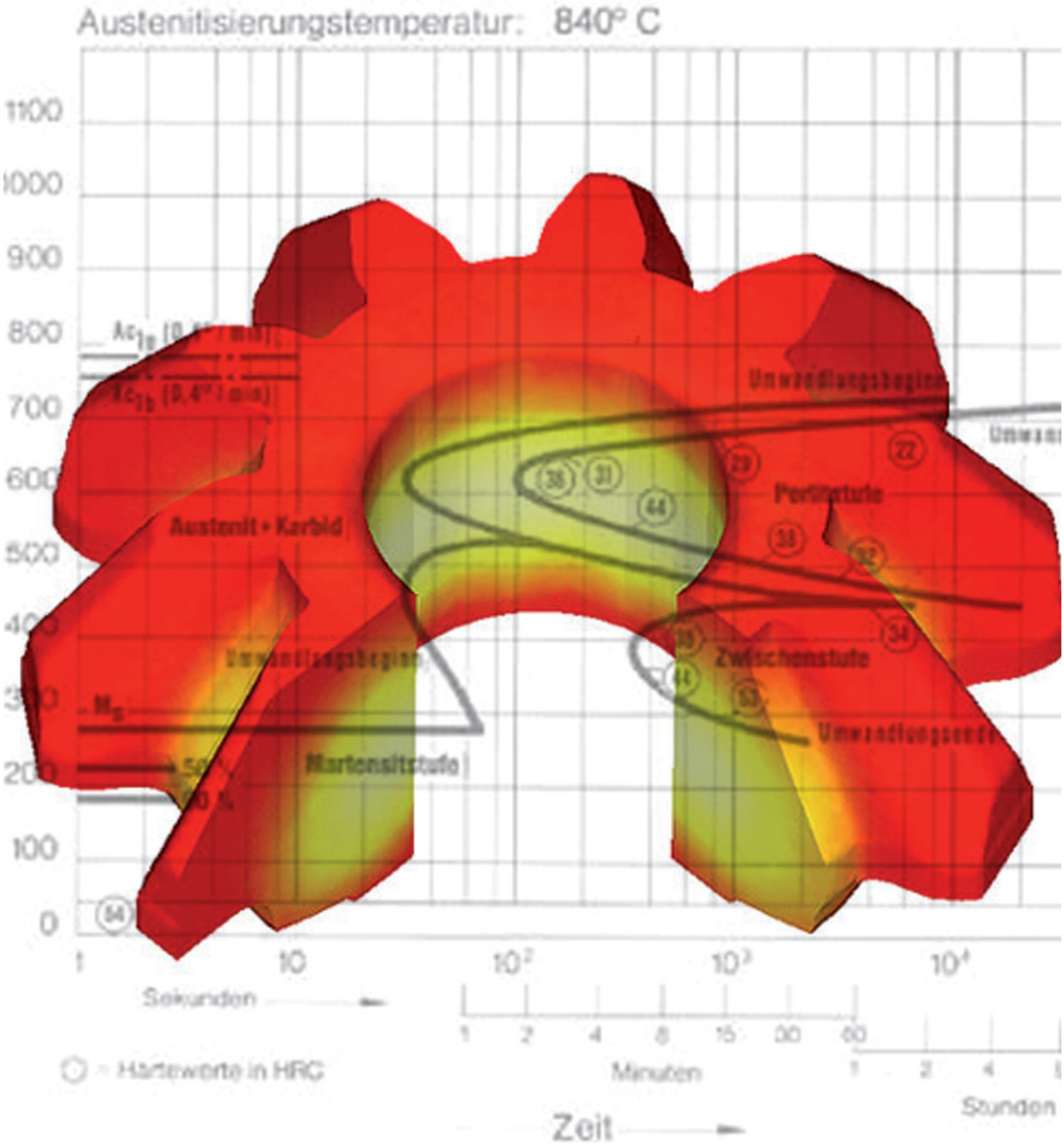
TECHNISCHE DOKUMENTATION

WÄRMEBEHANDLUNG DER STÄHLE



TD0040

fach - informations - portal - stahl

Ingenieurbüro für Werkstoffberatung

MANFRED FEURER
Dipl.-Ing.

fach - informations - portal - stahl
Ingenieurbüro 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

Werkstoffberatung fips

TECHNISCHE DOKUMENTATION

WÄRMEBEHANDLUNG DER STÄHLE

Autor:
Dipl.-Ing. Manfred Feurer

Auflage 2016
© 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

1. Wärmebehandlung der Stähle 7

3.1 Glühen 8
3.1.1 Spannungsarmglühen (Spannungsfreiglühen) 9
3.1.2 Rekristallisationsglühen 9
3.1.3 Weichglühen, Pendelglühen 9
3.1.4 Normalglühen (Feinkornglühen) 10
3.1.5 Diffusionsglühen 11
3.1.6 Grobkornglühen (Hochglühen) 11

3.2 Härten 12
3.2.1 Härtetemperatur 12
3.2.2 Gefügeveränderungen beim Härten, Martensitbildung 12
3.2.3 Abschrecken 13
3.2.4 Härtespannungen 13
3.2.5 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm (ZTU-Diagramm) 14
3.2.6 Zusammenfassung 16
3.2.7 Härteverfahren 17
3.2.7.1 Gebrochenes Härten 17
3.2.7.1 Warmbadhärten 17
3.2.8 Thermomechanische Behandlung 18
3.2.9 Aushärtung von Karosserien aus Bake Hardening Stahl 19
3.2.10 Martensitaushärtung 19
3.2.11 Härtefehler 20

3.3 Vergüten 21
3.3.1 Anlassen 21
3.3.2 Vergütungsschaubild 21
3.3.3 Vergütungsstähle 22
3.3.4 Patentieren 22
3.4 Randschichthärten 23
3.4.1 Einsatzhärten – Pulveraufkohlung - 24
Salzbadaufkohlung – Gasaufkohlung 25
3.4.2 Randschichthärten 27
3.4.2.1 Flammhärten 27
3.4.2.2 Induktionshärten 27
3.4.3 Nitrieren – Gasnitrierung – Salzbadnitrieren 29
Carbonitrieren – Badcarbonitrieren – Gascarbonitrieren 31

3.5 Zusammenfassung 32

3. WÄRMEBEHANDLUNG DER STÄHLE

Die Technik erfordert heute in ihren vielfältigen Erscheinungsformen Werkstoffe mit zum Teil sehr speziellen Eigenschaften. Stahl, so wie ihn der Stahlhändler verkauft, hat in den wenigsten Fällen die Eigenschaften, die für das spätere Werkstück (z.B. einen Kolbenbolzen oder eine Pleuelstange) geeignet sind. Entweder ist der Stahl zu hart, und er lässt sich dadurch sehr schwer be- oder verarbeiten, oder er ist zu weich, zu brüchig oder zu wenig verschleißfest, sodass das Bauteil in seinem Einsatz nicht bestehen kann. Durch Behandlung des Stahls mit Wärme (Wärmebehandlung) kann man die Eigenschaften des Stahls für die jeweiligen Erfordernisse passend verändern. Wo dies nicht gelingt, muss man auf andere Werkstoffe zurückgreifen.

In dieser „Technischen Dokumentation“ erhalten Sie einen Überblick über die gängigsten Wärmebehandlungen von Stahl. Sie werden informiert über die Ziele der Wärmebehandlung, und es wird Ihnen gezeigt, welche Bedeutung die Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU) für die Beratungskompetenz eines Stahlhändlers besitzen. Sowohl die Kenntnisse über die ZTU als auch über das EKD schaffen die Voraussetzungen für ein umfassendes Verständnis der entsprechenden Verfahren, wie das Glühen, Vergüten, Härten und Härten der Randschicht.

Ziele der Wärmebehandlung

Das Zustandsschaubild des Systems Eisen-Kohlenstoff, wie es in der Technischen Dokumentation TD 03 beschrieben wurde, resultiert aus Abkühlungskurven verschiedener Fe-C- bzw. Fe-Fe^3 C-Legierungen bei sehr langsamer Abkühlung. Nur unter dieser Bedingung gelten die in den einzelnen Feldern des Schaubildes ausgewiesenen Gefügezusammensetzungen. Werden die Abkühlgeschwindigkeiten erhöht und somit der Realität der Stahlbehandlung angepasst, können die zur jeweiligen Gefügeausbildung notwendigen Diffusionsvorgänge (= Wanderung von Teilchen) nicht vollständig ablaufen. Es entstehen so in Abhängigkeit von der Abkühlungsgeschwindigkeit sehr unterschiedliche Gefüge mit stark voneinander abweichenden Eigenschaften. Bestimmte Eigenschaften lassen sich folglich durch eine geeignete Temperaturführung erreichen. Die nachfolgende Aufstellung soll einen Überblick über die verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren geben (*Abbildung 3.1*). Später werden die einzelnen Verfahren genauer beschrieben.

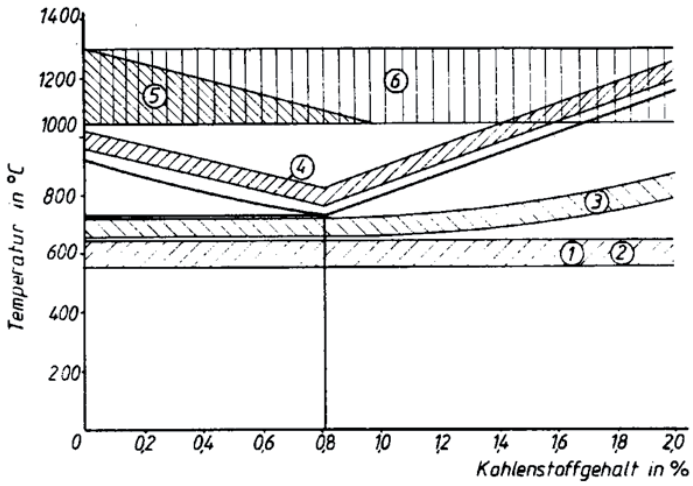
3.1 GLÜHEN

Beim Glühen wird das Werkstück auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, eine bestimmte Zeit auf dieser Temperatur gehalten und dann wieder abgekühlt. Erwärmungsgeschwindigkeit, Glühtemperatur, Haltezeit und Abkühlgeschwindigkeit sind vom Zweck des Glühens abhängig. Bei der nachfolgenden Beschreibung einzelner Glühverfahren werden auch Temperaturen angegeben. Diese sind jedoch nur als Richtwerte zu betrachten, damit man weiß, in welchem Temperaturbereich sich die Behandlung abspielt. Die *Abbildung 3.2* zeigt die Temperaturbereiche der einzelnen Glühverfahren im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm an. Grundsätzlich muss man sich bei der Wärmebehandlung nach den Normen oder den Vorschriften des Stahlherstellers richten. Er hat durch Versuche die jeweils günstigsten Glühtemperaturen, Haltezeiten und Abkühlgeschwindigkeiten ermittelt. Nach dem Zweck des Glühens unterscheidet man Spannungsarm-glühen, Rekristallisationsglühen, Weichglühen, Normalglühen, Diffusionsglühen und Grobkornglühen.

Grundverfahren der Wärmebehandlung

Thermische Verfahren	Thermochemische Verfahren
Glühen	Aufkohlen
Härten	Carbonitrieren
Anlassen	Nitrocarburieren
Vergüten	Nitrieren
	Borieren

Abbildung 3.1: Thermische Verfahren ändern die Eigenschaften nur durch Wärme, thermochemische durch Änderung der Stahlzusammensetzung in den Randschichten und zusätzliche Wärmebeeinflussung



1 = Spannungsarmglühen
2 = Rekristallisationsglühen
3 = Weichglühen
4 = Normalglühen
5 = Grobkornglühen
6 = Diffusionsglühen

Abbildung 3.2: Im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm sind die Temperaturbereiche der verschiedenen Glühverfahren durch schraffierte Flächen gekennzeichnet

3.1.1 SPANNUNGSARMGLÜHEN (SPANNUNGSFREIGLÜHEN)

(siehe Zone 1 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

In gewalzten, geschmiedeten oder gegossenen Werkstücken aus Stahl können durch unterschiedliche Temperaturzustände beim Abkühlen Spannungen entstehen. Spannungen können ebenfalls entstehen, wenn an dem Werkstück Schweißarbeiten vorgenommen werden oder wenn es stark spanabhebend bearbeitet wird. Die Folge dieser Spannungen ist häufig ein Verziehen (krumm werden) der Werkstücke, insbesondere, wenn sie recht lang sind. Durch das Spannungsarmglühen können solche Spannungen vermindert werden. (Früher sagte man Spannungsfreiglühen, da aber die Spannungen nicht restlos beseitigt werden können, ist der Ausdruck nicht korrekt.) Bei diesem Glühverfahren wird das Werkstück auf ca. 500-600 °C erwärmt, es hält die Temperatur je nach Größe und Form des Werkstücks bis zu zwei Stunden und erkaltet dann langsam (im abgeschalteten Glühofen). Bei dieser Glühtemperatur können sich die Kristalle, die durch eine vorhergehende Behandlung (Walzen, Schmieden, Schweißen usw.) in eine Zwangslage gekommen sind, wieder aus dieser befreien: Die Spannungen werden abgebaut.

> Spannungsarmglühen baut Spannungen im Gefüge ab und vermindert so die Riss- und Verzugsgefahr.

3.1.2 REKRISTALLISATIONSGLÜHEN

(siehe Zone 2 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

Durch Kaltumformung (Kaltwalzen oder Ziehen) verformt sich das Stahlgefüge derart, dass eine weiter Formung unmöglich oder gar zum Bruch führen wird. Durch Rekristallisationsglühen wird die Bildsamkeit des Gefüges wieder zurückgewonnen. Dazu sind Glühtemperaturen zwischen 550°C und 650°C notwendig, die Haltezeit beträgt je nach Verformung bis zu mehreren Stunden. Beim Glühen ordnen sich die in einen Zwangszustand verschobenen Atome zu völlig neuen Kristallen.

> Durch Rekristallisationsglühen wird ein Gefüge nach einer Kaltverfestigung neugebildet und damit wieder plastisch verformbar.

3.1.2 WEICHGLÜHEN

(siehe Zone 3 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

Durch Weichglühen soll der Stahl ein möglichst weiches Gefüge erhalten. Es wird angewendet, um harten Stahl, aber auch um gewalzte oder geschmiedete Werkstücke für eine spanende Bearbeitung möglichst weich zu machen. Die Standzeit der Werkzeuge (das ist die Zeit, die ein Werkzeug ständig spanend im Eingriff ist) ist dann länger, die notwendige Schnittleistung nicht so groß.
Die Glühtemperaturen liegen bei untereutektoiden Stählen (Kohlenstoffgehalt kleiner als 0,8 %) zwischen 680 und 720 °C, bei übereutektoiden Stählen (Kohlenstoffgehalt größer als 0,8 %) zwischen 730 und 750 °C. Bei legierten Stählen muss je nach Menge der Legierungszusätze zwischen 50 °C und 100 °C höher erwärmt werden. Die Glühdauer hängt von der Werkstückgröße und der Stahlart ab, sie liegt zwischen ein und zwei Stunden. Das Abkühlen muss sehr langsam erfolgen, es geschieht am besten im Ofen selbst, wobei nur die Ofenheizung abgeschaltet wird. Die Werkstücke müssen dabei aber nicht bis zur Raumtemperatur im Ofen abkühlen, ab ca. 500 °C können sie aus dem Ofen genommen werden, um dann an der Luft schneller abkühlen

zu können. Unterhalb von 500°C tritt nämlich keine für das Weichglühen nachteilige Veränderung mehr ein. Durch den Glühvorgang wandelt sich der streifenförmige Zementit (Streifenzementit) und, sofern vorhanden, ein Teil des Korngrenzen-Zementits in körnigen Zementit um. Die Werkzeugschneide kann in körnigen Zementit leichter eindringen als in streifenförmigen, der Werkstoff ist deshalb weicher.

Durch Weichglühen werden Stähle mit höherem Kohlenstoffanteil besser verform- und zerspanbar.

Pendelglühen

Die Glühdauer kann man etwas verkürzen, wenn man das Pendelglühen anwendet. Hierbei lässt man die Glühtemperatur dauernd um die Umwandlungstemperatur von 723 °C pendeln, mal etwa 20 °C mehr, dann wieder etwa 20 °C weniger als 723 °C. Durch dieses Pendeln um die Umwandlungstemperatur erhält man sehr schnell körnigen Zementit, also weichen Stahl. Durch die Verkürzung der Glühdauer kann man große Heizenergien einsparen.

Nachteilig bei allen Glühverfahren ist, dass die Werkstückoberfläche verzundert. Zunder entsteht, wenn sich der Luftsauerstoff mit der glühenden Stahloberfläche zu Eisenoxid ver-bindet. Wenn diese Verzunderung nicht sein soll, kann man die Werkstücke auch zunderfrei glühen. Dazu werden sie in Stahlkisten verpackt und in den Kisten mit Gusseisenspänen umgeben. Während des Glühens kann dann kein Sauerstoff von außen an das Werkstück. Der Sauerstoff, der sich in der Kiste befindet, reagiert viel lieber mit den kohlenstoffreicheren Gusseisenspänen als mit dem Stahlwerkstück. Die Oberfläche bleibt dadurch zunderfrei. In der Massenproduktion werden besondere Glühöfen verwendet, die eine Schutzgasatmosphäre haben. Das Schutzgas hält dann ebenfalls den Luftsauerstoff von der Werkstückoberfläche fern.

3.1.4 NORMALGLÜHEN (Feinkornglühen)

(siehe Zone 4 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

Andere Bezeichnungen dafür sind Normalisieren, Rückfeinen oder Umkörnen. Durch Walzen, Schmieden oder Gießen kann der Stahl ein ungleichmäßiges, vor allem grobes Korn bekommen. Diese Grobkornbildung entsteht, wenn der Stahl lange sehr hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Unter solchem Grobkorn leidet vor allem die Festigkeit, der Stahl wird kerbschlagempfindlicher. Um diesen Fehler zu beseitigen, muss das grobe Gefüge in Lösung gebracht werden, d.h., es ist eine Erwärmung über die Umwandlungslinie notwendig. Da die Umwandlungstemperatur vom Kohlenstoffgehalt abhängig ist, ist somit auch die Glühtemperatur vom Kohlenstoffgehalt abhängig. Sie liegt zwischen 750°C und 1.100°C. Die Glühdauer soll möglichst kurz sein, mindestens aber so lange, dass der ganze Querschnitt des Werkstücks die vorgeschriebene Temperatur erreicht. Abgekühlt wird an der Luft. Zur schnelleren Abkühlung kann auch Gebläseluft verwendet werden.

Soll mit dem Normalglühen ein Spannungsarmglühen verbunden werden, so muss langsam abgekühlt werden. Da beim Normalglühen ein grobes Gefüge wieder fein gemacht wird, nennt man es auch Rückfeinen oder Umkörnen.

Normalglühen führt zu einem feinen, homogenen Gefüge mit besonders guten mechanischen Eigenschaftten (günstiges Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit).

3.1.5 DIFFUSIONSGLÜHEN

(siehe Zone 6 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

Beim Vergießen von Stahl kann es vorkommen, dass die Legierungsstoffe des Stahls sich nicht ganz gleichmäßig über das ganze Werkstück verteilen. Dies trifft besonders stark bei unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit am Werkstück auf. Durch das Diffusionsglühen, ein Glühen bei Temperaturen zwischen 1.050°C und 1.300°C, können die Legierungsstoffe nachträglich verteilt werden. Die Glühdauer beträgt bis zu 20 Stunden, je nach Werkstückgröße und Grad der Verteilung. Die Abkühlgeschwindigkeit muss sehr langsam sein. Diffusionsglühen ist vor allem bei sehr großen legierten Stahlgussstücken notwendig.

Diffusionsglühen soll Konzentrationsunterschiede (Seigerungen) im Gefüge ausgleichen.

3.1.6 GROBKORNGLÜHEN (Hochglühen)

(siehe Zone 5 im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm; Abbildung 3.2)

Grobkornglühen wird bei weichen Stählen mit feinem Gefüge angewandt, die beim Zerspanen zur Fließspanbildung (zum Schmieren) neigen. Dadurch entsteht eine unsaubere Oberfläche auf dem Werkstück. Das Grobkornglühen bewirkt genau das Gegenteil vom Normalglühen. Um Werkstücke wirtschaftlich spanabhebend bearbeiten zu können, muss die Werkzeugschneide leicht in das Korn eindringen können. Bei grobem Korn ist das leichter möglich, als bei feinem Korn. Das grobe Korn entsteht bei langem Glühen bei hohen Temperaturen. Während des langen Glühens wachsen die Austenitkörner zusammen. Bei sehr langsamer Abkühlung entsteht dann aus dem großen Austenitkorn ein grobes Ferrit/ Perlit-Gefüge, je nach Kohlenstoffgehalt des Stahls. Dieses Gefüge besitzt zwar eine geringere Festigkeit, ist aber – wie bereits erwähnt – besser spanabhebend zu bearbeiten. Die Glühtemperatur liegt je nach C-Gehalt zwischen 950°C und 1.200°C. Falls notwendig, kann das grobe Gefüge nach der Bearbeitung durch Normalglühen wieder feinkörnig gemacht werden.

3.2 HÄRTEN

Nach DIN EN 10052 ist Härten eine Wärmebehandlung, bestehend aus den Arbeitsschritten Austenitisieren (d.h. Erwärmen auf Temperaturen oberhalb AC_3) und Abkühlen, so dass eine Härtezunahme durch mehr oder weniger vollständige Umwandlung des Austenits in Martensit und gegebenenfalls Bainit (= Zwischengefüge) erfolgt. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass rascher abgekühlt wird, als sich Ferrit und Perlit bilden können. Der harte Martensit entsteht durch Umklappen des Austenit-Gitters ohne Platzwechsel der Kohlenstoffatome.

3.2.1 HÄRTETEMPERATUR

Wie bereits erwähnt, löst sich bei Temperaturen oberhalb 723°C der im Zementit enthaltene Kohlenstoff im Eisen vollkommen auf. Man erhält das Gefüge Austenit. Aus dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild ist ersichtlich, dass die notwendige Temperatur für ein reines Austenitgefüge vom Kohlenstoffgehalt abhängig ist. Nur bei eutektoidem Stahl beträgt sie 723°C, bei untereutektoidem Stählen steigt sie bis 911°C und bei übereutektoiden Stählen sogar bis 1.150°C.

Bei langsamer Abkühlung wandelt sich das Austenit-Gefüge in seine ursprüngliche Form zurück. Je nach Kohlenstoffgehalt des Stahls entstehen aus dem Austenit wieder Ferrit und Perlit, reiner Perlit oder Perlit und Zementit.

> Die Ausgangstemperatur beim Härten, von Der das Werkstück abgeschreckt wird, heißt Härtetemperatur.

Sie liegt für untereutektoide Stähle oberhalb der G-S-Linie im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, also im Bereich der reinen Austenitkristalle.
Für untereutektoide Stähle oberhalb der Linie S-E, im Bereich der Austenit-Mischkristalle und des Sekundärzementits. Da letzterer ohnehin sehr hart ist, muss er nicht aufgelöst werden.

3.2.2 GEFÜGEVERÄNDERUNGEN BEIM HÄRTEN, MARTENSITBILDUNG

Bei schneller Abkühlung (der Fachmann sagt Abschrecken) wird der Austenit an der Rückbildung in seine ursprüngliche Gefügeform gehindert, die Umwandlungstemperatur wurde zu schnell durchfahren. Das Gefüge bleibt deshalb auch nach dem Abschrecken in dem Zustand, in dem es sich vorher befunden hat. Das ist um so vollkommener der Fall, je schneller die Abkühlung erfolgt.

Bei etwa 250°C verwandelt sich jedoch das flächenzentrierte γ-Eisen in raumzentriertes α-Eisen, ohne dass Kohlenstoff ausgeschieden wird. Letzterer bleibt vielmehr im Gitter des α-Eisens verteilt, so dass praktisch eine feste Lösung bestehen bleibt. Dieses Gefüge nennt man Martensit. Das Martensit-Gefüge ist, je nach dem Kohlenstoffgehalt des Stahls, nadelig bis sehr feinkörnig (samtartig) und etwa 40 bis 240 mal so hart wie Ferrit.

> Härten heißt also, dass sich durch schnelles Abkühlen (Abschrecken) des austenitisierten Stahles, das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter schlagartig in das kubisch-raumzentrierte Kristallgitter umwandelt. Das Kohlenstoffatom in der Würfelmitte hat keine Zeit, aus der Würfelmitte herauszuwandern und mit Eisenionen wieder Zementit zu bilden. Es bleibt also im Würfelinneren eingesperrt. Durch das Vorhandensein zweier Atome in der Würfelmitte verzerrt sich das Kristallgitter. Die Verzerrung führt zur Bildung des Härte gefüges, also zu dem Martensit.

Ist die Abkühlung nicht schroff genug, so bildet sich ein Gefüge, das in seinen Eigenschaften zwischen Martensit und Perlit liegt. Es ist das Zwischengefüge, auch Bainit genannt. In einem Übergangsbereich der Abkühlung können alle drei Gefügearten – Martensit, Bainit und Perlit – in unterschiedlichen Anteilen entstehen (*siehe Abschnitt 3.2.5 ZTU-Diagramm*).

Voraussetzung für die Härtbarkeit eines Stahles ist das Vorhandensein von ausreichendem Kohlenstoff. Stahl mit weniger als 0,2 % Kohlenstoff ist nicht härtbar, weil ein zu geringer Martensitanteil gebildet wird.

3.2.3 ABSCHRECKEN

Das Abschrecken der austenitisierten Werkstücke wird durch Eintauchen in flüssige Abschreckmittel oder durch Anblasen mit Luft erreicht. Die notwendige Abkühlungsgeschwindigkeit (kritische Abkühlgeschwindigkeit v_K in Grad Celsius pro Sekunde), die zur Vermeidung von Ferrit- und Perlitbildung nicht unterschritten werden darf, nimmt mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab (Abbildung 3.3). Mit zunehmendem Gehalt an Mangan, Nickel, Chrom und Molybdän kann die Abkühlgeschwindigkeit wirkungsvoll herabgesetzt werden. Je nach erforderlichem Abkühlmittel spricht man von wasserhärtenden Stählen (unlegiert), ölhärtenden Stählen (niedrig legiert) und lufthärtenden Stählen (hochlegiert).

Die Abkühlgeschwindigkeit wird also bestimmt durch das abkühlende Medium. Wasser hat seine maximale Abkühlgeschwindigkeit wegen seiner Dampfhautbildung erst bei 350°C. Durch Natronlauge wird die Dampfhautbildung unterbunden. Die Abschreckwirkung ist bei 550°C doppelt so hoch wie bei Wasser. Öl hat nur etwa ein Drittel der Abkühlgeschwindigkeit des Wassers bei 550°C. Bei Kohlenstoffstählen kann also die Perlitbildung nicht ganz unterdrückt werden. Bei Luftkühlung fällt die Verdampfung weg, daher sinkt die Abkühlgeschwindigkeit mit der Temperaturdifferenz. Sie beträgt nur 1% von Wasser. Durch Steigerung der Luftgeschwindigkeit kann sie erhöht werden, es besteht dann jedoch die Gefahr ungleichmäßiger Abkühlung und damit der Bildung von Spannungen im zu härtenden Werkstück.

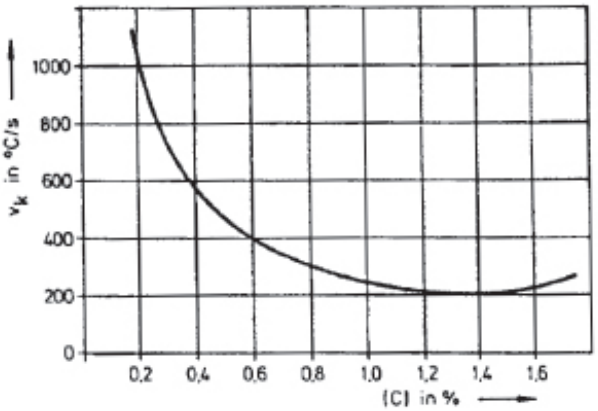


Abbildung 3.3: Die kritische Abkühlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kohlenstoff

3.2.4 HÄRTESPANNUNGEN

Bei unlegierten Stählen kann es beim Härten durch das schroffe Abschrecken im Wasser zum Verziehen oder oberflächigem Anreißen der Werkstücke kommen. Dies kann durch Verwendung eines weniger schroffen Abschreckmittels z.B. einer Wasser-Öl-Emulsion oder durch nur kurzzeitiges Abschrecken in Wasser und nachfolgendem Abkühlen in Öl oder durch Abschrecken im Warmbad vermieden werden.

Nachfolgend soll die Entstehung der Härtespannung an einem Stahlzylinder vorgestellt werden (*Abbildung 3.4*).

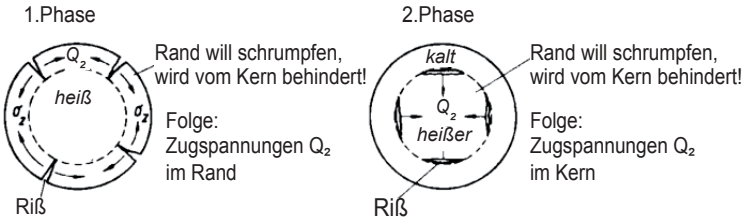


Abbildung 3.4: Entstehung der Härtespannungen an einem Stahlzylinder

Beim Abschrecken will sich der Mantel schneller abkühlen, also stärker zusammenziehen, als der Kern. Dieser wird dabei wegen der geringeren Festigkeit bei der höheren Temperatur zusammengedrückt (Zug im Mantel, Druck im Kern). Nun kühlt sich auch der Kern ab und zieht sich dabei zusammen (Zug zwischen Kern und Mantel, Druck im Mantel). Die Druckspannungen ergeben guten Schutz gegen Kerbwirkung und Oberflächenrisse, da eine äußere Zugspannung, um zu wirken, erst die Härte-Druckspannung aufheben muss. Wenn nicht durchgehärtet wird, vergrößern sich aber die Zugspannungen zwischen Mantel und Kern, so dass es zu einem Abplatzen der Härteschicht kommen kann.

Durch Anlassen nach dem Abschrecken auf 100°C bis 150 °C vermindern sich die Spannungen und die Härterissgefahr ohne Absinken der Härte.

3.2.5 ZEIT-TEMPERATUR-UMWAND-LUNGSDIAGRAMM (ZTU-DIAGRAMM)

Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild ist nicht geeignet, die für eine gezielte Wärmebehandlung notwendigen Informationen zu liefern, da es – wie bereits ausgeführt – lediglich die Gefügezustände beschreibt, wie sie sich bei nahezu unendlich langsamer Abkühlung einstellen. Solch niedrige Abkühlungsgeschwindigkeiten findet man in der Praxis jedoch nicht, und es müssen folglich andere Informationsträger herangezogen werden, wenn man eine für die gewünschten Eigenschaften günstige Temperaturführung bestimmen will: die Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (kurz: ZTU-Schaubilder). Sie beinhalten als wichtige Größe die Zeit und geben Auskunft darüber, nach welcher Zeit welche Verteilung und Anordnung in einem Gefüge bestimmter Zusammensetzung (bei gegebener Temperatur) vorliegt.

Es wird also die Temperatur gegen die Zeit aufgetragen. Die Gefügezusammensetzung erscheint nicht mehr im Diagramm, und folglich gilt ein ZTU-Schaubild immer nur für einen Stahl ganz bestimmter Zusammensetzung.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Temperaturführung:

Kontinuierliche Abkühlung aus dem Austenitbereich mit einer gewählten Abkühlungsgeschwindigkeit.

Schnelles Abkühlen (Abschrecken auf eine bestimmte Temperatur, die dann konstant gehalten wird, bis die Gefügeumwandlung isotherm (ohne weitere Veränderung der Temperatur) stattgefunden hat.

Betrachten wir zunächst das ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung (Abbildung 3.5). Es wird aus vielen Versuchsreihen etwa wie folgt konstruiert: Eine Stahlprobe wird zunächst aus dem Austenitbereich mit einer bestimmten Geschwindigkeit – z.B. an Luft – abgekühlt und bei Erreichen einer gewählten Temperatur so plötzlich abgeschreckt, dass der in diesem Moment vorhandene Gefügezustand gewissermaßen eingefroren und metallographisch bestimmbar wird. Beim zweiten Versuch kühlt man mit der gleichen Geschwindigkeit auf eine etwas niedrigere Temperatur bis zum Abschrecken, untersucht wieder die Probe usw. Auf diese Weise kann das Fortschreiten der Gefügeumwandlung bei einer bestimmten Abkühlungsgeschwindigkeit verfolgt werden. Die charakteristischen Punkte in der Kurve – z.B. Beginn und Ende einer Umwandlung – lassen sich markieren (*Abbildung 3.5 a*).

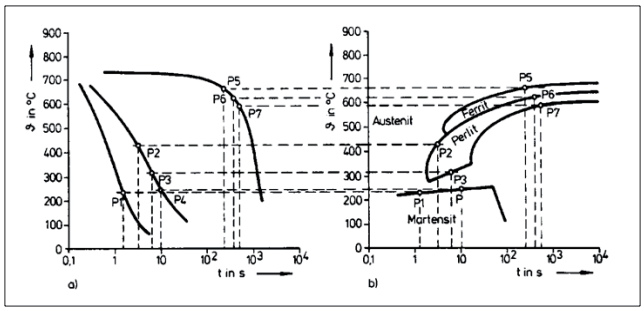


Abbildung 3.5: Konstruktion des ZTU-Schaubildes für kontinuierliche Temperaturführung. Die gleiche Versuchsreihe wird mit anderen Abkühlgeschwindigkeiten wiederholt (z.B. Abkühlung im Wasser, Salzlösung oder in Öl).

Trägt man alle charakteristischen Punkte, an denen Gefügeänderungen beginnen oder abgeschlossen sind, in das ZTU-Schaubild ein und verbindet diese entsprechend miteinander (z.B. alle, die den Beginn der Perlitbildung anzeigen), entstehen Umwandlungslinien (Abbildung 3.5b) die für jede kontinuierliche Abkühlung, gleich welcher Geschwindigkeit, das entstehende Gefüge und damit die Werkstoffeigenschaften nach der Wärmebehandlung vorhersagbar machen.

ZTU-Schaubilder für **kontinuierliche** Abkühlung zeigen an, mit welcher Geschwindigkeit ein Stahl bestimmter Zusammensetzung abgekühlt werden muss, damit er ein bestimmtes Gefüge mit den gewünschten Eigenschaften ausbildet.

Ein ZTU-Schaubild für **isotherme Temperaturführung** (*Abbildung 3.6*) wird konstruiert, indem man Proben des entsprechenden Werkstoffes jeweils bis zum Austenitbereich erwärmt, dann auf verschiedene Temperaturen abschreckt und dort isotherm hält. Für jede Haltetemperatur wird eine Versuchsreihe angelegt, bei der nach verschiedenen Zeitpunkten der Fortschritt der Gefügeumwandlung bestimmt wird (wieder durch Einfrieren des Zustandes, d.h. Abschrecken nach einer bestimmten Zeit).

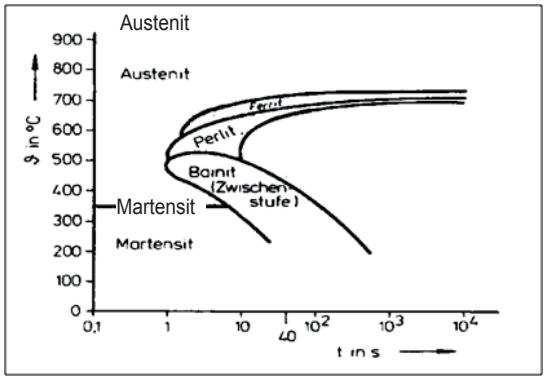


Abbildung 3.6: ZTU-Schaubild für isotherme Temperaturführung

Das Ergebnis der vollständigen Versuchsreihe ergibt dann das obige Diagramm, das allerdings jetzt nur für eine isotherme Temperaturführung zugrunde gelegt werden darf.

ZTU-Schaubilder für **isotherme** Temperaturführung geben an, bei welcher Temperatur ein Stahl nach vorangegangenem Abschrecken gehalten werden muss, damit sich isotherm ein bestimmtes Gefüge mit den gewünschten Eigenschaften ausbildet.

Beispiel:

a) Welches Gefüge ist zu erwarten wenn ein Stahl (*Abbildung 3.5 b*) kontinuierlich mit 5°C/s abgekühlt wird (Anfangstemperatur 800°C)?

b) Welches Gefüge liegt vor, wenn ein Stahl (*Abbildung 3.6*) nach vorangegangenem Abschrecken (Abschreckzeit 0,1 s) 2 Minuten bei 550° C gehalten wird?

Lösung:

a) Die Kurve A in *Abbildung 3.7* zeigt den Temperaturverlauf bei der vorgegebenen Abkühlgeschwindigkeit von 5°C/s. Es bildet sich an Punkt P1 zunächst Ferrit und von P2 an Perlit, so dass beide Gefüge nebeneinander vorliegen, jedoch kein Martensitgefüge entsteht.

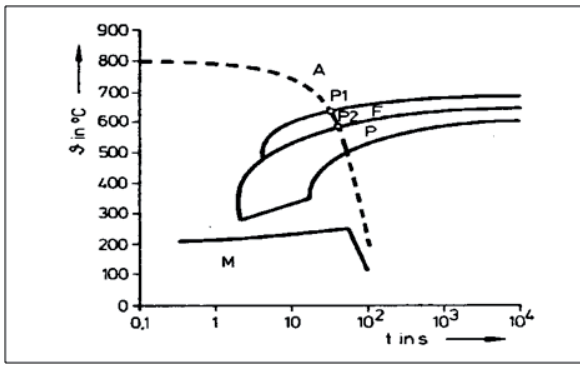


Abbildung 3.7: Lösung zu Beispiel a

b) Es beginnt bei P1 die Perlitbildung, die bei P2 beendet ist. Es liegt dann reines Perlitgefüge vor (*Abbildung 3.8*).

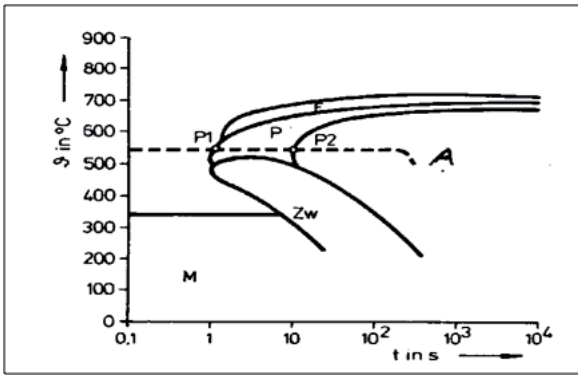


Abbildung 3.8: Lösung zu Beispiel b

3.2.6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Wärmebehandlung von Stählen wird mit verschiedenen Zielen durchgeführt. Man strebt damit z.B. den Abbau von Spannungen in Metallgefügen an, versucht die Korngröße zu beeinflussen, eine ganz bestimmte Gefügeausbildung zu erreichen oder einen Legierungsbestandteil homogen im Werkstoff zu verteilen. In jedem Falle zielt man damit auf bestimmte Eigenschaften des Werkstoffs, die optimal im Hinblick auf seinen vorgesehenen Einsatz sind.

Entscheidend bei der Wärmebehandlung eines Stahls ist die Temperaturführung, denn sie bestimmt die zur Gefügeausbildung jeweils notwendigen Diffusionsvorgänge (Wanderung von Teilchen, insbesondere von Kohlenstoffatomen).

Zur Ermittlung der optimalen Temperaturführung bedient man sich der Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder, die für nur einen Stahl entweder die günstigste kontinuierliche Abkühlungsgeschwindigkeit angeben oder die ideale Isotherme, bei der die Umwandlung eines Gefüges stattfinden sollte, wenn man eine bestimmte Endstruktur des Werkstoffes anstrebt.

3.2.7 HÄRTEVERFAHREN

Das einfache Härten oder Abschreckhärten wurde bisher beschrieben. Es wird nur angewandt bei unlegierten Stählen, da es wegen der erforderlichen hohen Abkühlgeschwindigkeiten nur für unkompliziert geformte Bauteile anzuwenden ist (Rissgefahr durch starke Temperaturunterschiede zwischen Randschicht und Kern).

Einfaches Härten eignet sich nur für legierte und hochlegierte Stähle oder für unkompliziert geformte Werkstücke aus unlegiertem Stahl. Es besteht die Gefahr von Härterissen, die aber durch nachfolgende Glühbehandlung gemindert werden kann.

Die nachstehende *Abbildung 3.9* zeigt den Zeit-Temperatur-Verlauf beim Abschreckhärten, gebrochenen Härten und Warmbadhärten. Es ist deutlich sichtbar, dass die Abkühlgeschwindigkeit (rechte Seite des Kurvenverlaufes) beim Abschreckhärten sehr schroff abfällt und beim Warmbadhärten zunächst schroff und dann im Ölbad allmählich abfällt.

Nachfolgend werden das gebrochene Härten und das Warmbadhärten beschrieben.

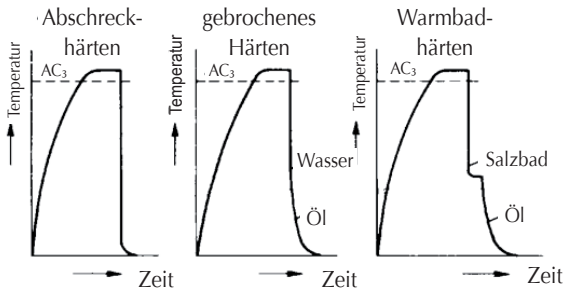


Abbildung 3.9: Zeit-Temperatur-Verlauf beim Abschreckhärten, gebrochenen Härten und Warmbadhärten

3.2.7.1 GEBROCHENES HÄRTEN

Beim gebrochenen Härten (*Abbildung 3.10, Kurve 2 und Abbildung 3.9b*) versucht man durch Einsatz von zwei verschiedenen Abschreckmitteln, den Prozess optimaler zu gestalten. Zunächst wird (z.B. mit Wasser) schnell abgeschreckt, und damit wird die Ferrit- und Perlitbildung vermieden. Bevor jedoch die Martensitbildung beginnt, wird – ohne dass ein Temperturausgleich zwischen Rand und Kern stattgefunden hat – die Abkühlungsgeschwindigkeit vermindert (z.B. im Ölbad) und damit die Rissneigung des nun spröden Werkstoffes verringert.

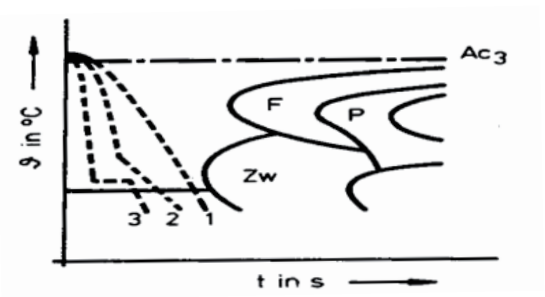


Abbildung 3.10: Härteverfahren im ZTU-Schaubild
1 = einfaches Härten (Abschreckhärten)
2 = gebrochenes Härten
3 = Warmbadhärten

3.2.7.2 WARMBADHÄRTEN

Wegen der relativ schwierigen Temperaturführung beim gebrochenen Härten zieht man meist das Warmbadhärten vor (Abbildung 3.10, Kurve 3 und Abbildung 3.9c), das letztlich zum gleichen Ergebnis führt. Das austenitisierte Werkstück kommt hier in ein Warmbad (Salz- oder Metallbad), dessen Temperatur etwas über der Umwandlungslinie zum Martensit liegt. Dort wird es gehalten, bis ein Temperaturausgleich stattgefunden hat (der Zwischenstufenbereich darf noch nicht erreicht sein). Anschließend wird in Öl oder an Luft langsam in den Martensitbereich hinein abgekühlt, wobei nur relativ geringe Umwandlungsspannungen erzeugt werden.

Da im Warmbad sehr schnell abgekühlt werden muss (sonst steht nicht genügend Haltezeit zur Verfügung), härten nur Werkstücke geringer Dicke ganz durch. Außerdem darf die Umwandlungslinie (MS-Linie) nicht zu hoch liegen, da sonst die Perlitbildung zu $C \geq 0{,}6\,\%$.

Stähle mit $C \geq 0{,}6$ % und komplizierter Form werden zur Vermeidung großer Umwandlungsspannungen bevorzugt warmbadgehärtet. Die Abschreckung erfolgt sehr schnell auf eine Temperatur knapp oberhalb MS, und erst nach erfolgtem Temperaturausgleich im Werkstück (Haltezeit) wird langsam weiter abgekühlt.

3.2.8 THERMOMECHANISCHE BEHANDLUNG

Thermomechanische Behandlung nennt man die Verbindung von Umformvorgängen mit Wärmebehandlungen. Dabei werden die Verfestigungsmechanismen Kornverfeinerung, Aushärtung und Erhöhung der Versetzungsdichte ausgenutzt. Bei der Durchführung der thermomechanischen Behandlung treten diese Mechanismen in Kombination miteinander auf, sodass die Vorteile der einen die Nachteile der anderen überdecken.

Der erste Behandlungsschritt besteht im Lösungsglühen des in Form von Vorbrammen vorliegenden Walzgutes in einem Stoßofen. Die Lösungsglüh-/Stoßofentemperatur bestimmt die Menge der gelösten Mikrolegierungsbestandteile und die Austenitkorngröße. Das auf hohe Temperatur gebrachte Walzgut wird zunächst in den Vorgerüsten zu Vorband gewalzt. Dieses Vorwalzen ist für die mechanischen Eigenschaften des Vorbandes ohne Bedeutung und in *Abbildung 3.11* nicht eingezeichnet.

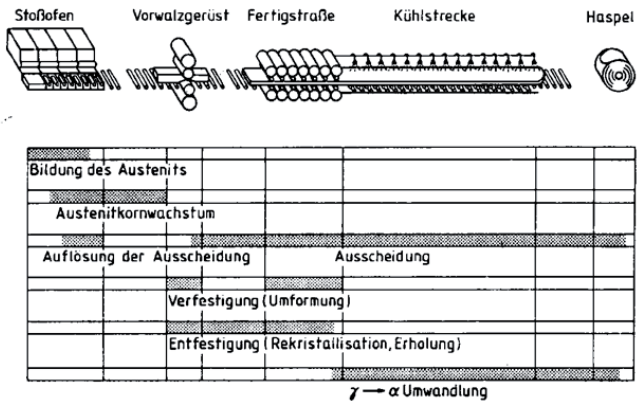


Abbildung 3.11: Thermomechanische Behandlung von warmgewalzten Feinkornstählen zum Kaltumformen, schematisch

In der Fertigstraße wird das Vorband in schneller Folge stark verformt und durch eine hohe Versetzungsdichte verfestigt. Dabei wird durch die Mikrolegierungselemente Vanadium und Niob der Beginn der Rekristallisation zu längeren Zeiten verschoben, sodass ein gestrecktes Austenitkorn entsteht und in den letzten Fertiggerüsten die γ→α-Umwandlung, die Rekristallisation und die Ausscheidung von Niobcarbonitriden gleichzeitig ablaufen. Durch die Gleichzeitigkeit dieser Vorgänge entsteht feinkörniger Ferrit mit hoher Versetzungsdichte, der aushärtungsfähige Carbonitridteilchen enthält.

In der Kühlstrecke erfolgt die Einstellung der Aushärtungstemperatur. Die verzögerte Abkühlung im Coil bewirkt die Ausscheidung feiner Carbonitridteilchen und entspricht einer Aushärtungsbehandlung.

Was vorstehend für Brammen-/Bandwalzung gesagt ist, gilt sinngemäß natürlich auch für Stab- bzw. Profilwalzung aus Vorblöcken bzw. Knüppeln.

Durch thermomechanische Behandlung von aushärtbaren mikrolegierten Stählen führen Aushärtung und Erhöhung der Versetzungsdichte zur Erhöhung der Streckgrenzen. Die dadurch bedingte Verminderung ihrer Zähigkeit / Sprödbruchsicherheit wird durch starke Kornverfeinerung aufgehoben.

3.2.9 AUSHÄRTUNG VON KAROSSERIEN AUS BAKE HARDENING STAHL

Bei diesem Stahl wird die Übersättigung des im Ferrit gelösten Kohlenstoffs so eingestellt, dass nur durch die Art der Wärmebehandlung beim Lackeinbrennen eine Verfestigung des Stahles hervorgerufen wird, nicht bei üblicher Lagerung bei Raumtemperatur durch Alterung. Bake Hardening bedeutet also eine Festigkeitssteigerung durch in Ferrit gelöste Kohlenstoffatome, die in übersättigter Lösung in die Versetzungen diffundieren und diese blockieren.

3.2.10 MARTENSITAUSHÄRTUNG

Die Martensitaushärtung ist ein Sonderfall der thermomechanischen Behandlungen zur Erzielung von Streckgrenzwerten bis zu 4.000 N/mm². Bei den kohlenstoffarmen (C ≈ 0,05 %) martensitaushärtenden Stählen wird durch Ni-Gehalte von 18 % erreicht, dass sich bei der Abkühlung, von etwa 800 °C beginnend, ein weicher Martensit aus dem Austenit bildet. Beim Wiedererwärmen erfolgt die Rückumwandlung in Austenit erst oberhalb 500 °C. Die Löslichkeit des Austenits für Cobalt, Molybdän, Titan und andere Legierungselementen ist wesentlich größer als die des Martensits. Bei der Martensitumwandlung von 200 °C können sich die Legierungselemente aus dem Martensit jedoch nicht mehr ausscheiden, da die Anzahl der Leerstellen bei dieser Temperatur zu gering ist. Wird ein solcher übersättigter Martensit erwärmt, so treten bei 450 °C bis 500 °C Vorausscheidungen auf, die eine beträchtliche Aushärtung bewirken.

Verfahrensfolge in der Praxis:

1. Lösungsglühen und Abkühlen zur Martensitbildung. Die dabei erreichte Härte setzt sich zusammen aus Mischkristallhärtung und Versetzungsfestigung durch martensitische Umwandlung.
2. Kaltverformung. Dadurch tritt eine Härtesteigerung durch Versetzungsverfestigung ein.
3. Auslagern. Dabei erfolgt eine beträchtliche Härtesteigerung durch Teilchenhärtung.

3.2.11 HÄRTEFEHLER

Fehler	mögliche Ursache
Werkstück nicht genügend hart	Härtetemperatur war zu niedrig Abschreckmittel war zu warm Abschreckmittel war falsch, Öl statt Wasser Anlasstemperatur war zu hoch
Werkstück ungleichmäßig hart	Werkstück wurde zu schnell, deshalb ungleichmäßig erwärmt Beim Abschrecken haben Dampf-blasenbildung oder sonstige Verunreinigungen den Zutritt des Wassers beeinträchtigt
Werkstück zu hart und spröde	Härtetemperatur zu hoch Abschreckmittel wirkte zu schroff, Wasser anstatt Öl Werkstück wurde nicht oder zu wenig angelassen
Werkstück verzogen	Werkstück wurde falsch in das Abschreckbad getaucht Werkstück besaß bereits vor dem Härten Spannungen, die von der vorherigen Bearbeitung herrührten. Durch die Wärmebehandlung wurden sie frei und haben das Werkstück verzogen
Werkstück hat Härterisse	Werkstück wurde zu hoch erwärmt, zu schroff abgeschreckt, nicht oder zu wenig angelassen

3.3 VERGÜTEN

Die zum Vergüten verwendeten Stähle haben nur einen Kohlenstoffgehalt von ca. 0,2% bis ca. 0,6%; man bezeichnet sie als Vergütungsstähle. Sie können unlegiert, niedrig oder hoch legiert sein.

Unter Vergüten versteht man eine Wärmebehandlung von Baustählen, die aus Härten mit nachfolgendem Anlassen besteht. Der Stahl wird ebenfalls über seine Umwandlungstemperatur (723°C bis 911°C) erwärmt, in Wasser oder Öl abgeschreckt und anschließend auf eine höhere Temperatur angelassen.

Durch den Härtevorgang tritt nunmehr eine Kornverfeinerung ein, diese steigert die Festigkeit des Stahls. Parallel zur Festigkeitssteigerung tritt eine Verminderung der Dehnung ein (die Dehnung gibt an, um wieviel % ein Werkstück gedehnt werden kann, bis es bricht). Um diesen Nachteil wieder zu beseitigen, erfolgt nach dem Härtevorgang ein Anlassen.

3.3.1 ANLASSEN

Anlassen nennt man das Erwärmen eines gehärteten Werkstücks oder Werkzeuges auf eine Temperatur zwischen Raumtemperatur und 723°C (meist 450°C und 650°C) und Halten dieser Temperatur mit nachfolgendem zweckentsprechendem Abkühlen (*Abbildung 3.12*).

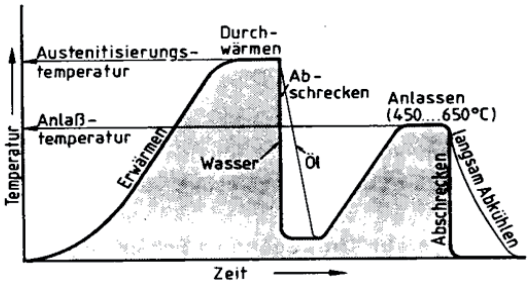


Abbildung 3.12: Temperaturverlauf beim Vergüten

Anlassgefüge ist die gebräuchlichste aber unklare Bezeichnung für das Gefüge, das sich beim Anlassen aus dem Härtungsgefüge bildet. Welches Abschreckmittel letztlich verwendet wird, ist vom Kohlenstoffgehalt und vom Legierungsanteil des Vergütungsstahls abhängig.

3.3.2 VERGÜTUNGSSCHAUBILD

Nach dem Härten ist der Stahl glashart und hochfest, aber spröde und bruchempfindlich, sodass er nicht in diesem Zustand verwendbar ist. Wie bereits gesagt, kann durch nachfolgendes Anlassen die Glashärte beseitigt werden, und je nach Anforderung in der Praxis kann eine gewünschte Kombination der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Zähigkeit (Bruchdehnung) eingestellt werden. (*Abbildung 3.13: Vergütungsschaubild zeigt den Zusammenhang dieser Werkstoffkenngrößen*). Dabei bedeuten niedrige Anlasstemperaturen hohe Festigkeit, aber geringe Zähigkeit, und hohe Anlasstemperaturen geringere Festigkeit und grosse Zähigkeit. Je nach Art der Vergütung spricht man von zähvergütet (große Zähigkeit) oder härtevergütet (hohe Festigkeit).

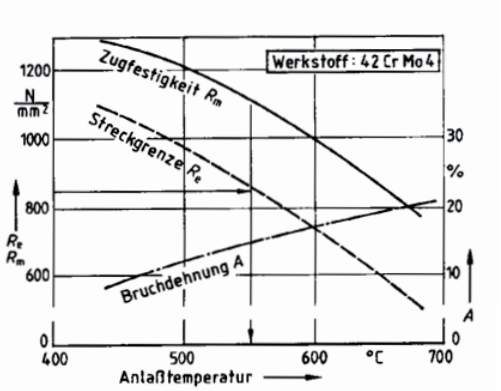


Abbildung 3.13: Vergütungsschaubild zeigt den Zusammenhang der Werkstoffkenn größen Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung zum Verlauf der Anlasstemperatur

Vergüten ist Härten und danach Anlassen im oberen möglichen Temperaturbereich zum Erzielen guter Zähigkeit bei gegebener Zugfestigkeit.

Nach dem beim Härten verwendeten Abschreckmittel spricht man von Öl-, Wasser- oder Luftvergüten.

3.3.3 VERGÜTUNGSSTÄHLE

Baustähle, die im vergüteten Zustand Verwendung finden, werden als Vergütungsstähle (DIN EN 10083) bezeichnet. Die Kohlenstoffgehalte liegen zwischen etwa 0,2 und 0,6%.

Die unlegierten Vergütungsstähle erlangen ihre Vergütungseigenschaften durch ihren Gehalt an Kohlenstoff und Mangan. Mit steigendem Gehalt an diesen Elementen sind erhöhte Streckgrenze und Zugfestigkeit zu erzielen.

Durch Legieren mit Mn, Mn-Si und Mn-V wird die Durchvergütungsfähigkeit von dickwandigen Werkstücken verbessert. Nachteilig ist aber, dass sie zur Bildung eines gröberen Kornes neigen, was aber durch den Zusatz von geringen Mengen an Vanadium abgeschwächt werden kann. Die Härtefähigkeit kann gesteigert werden durch einen höheren Siliziumgehalt, ebenso die Anlassbeständigkeit durch einen höheren Mn-Gehalt.

Chromlegierte Stähle mit Cr-Zusätzen von etwa 1% haben neben dem feineren Korn auch eine gesteigerte Durchvergütungsfähigkeit. Vorteil dieser Stähle ist eine höhere Zähigkeit nach dem Vergüten. Werden diese Stähle zusätzlich mit Molybdän legiert, wird die Durchvergütbarkeit und Anlassbeständigkeit verbessert.

Cr-Mo-V-Stähle und Cr-Ni-Mo-legierte Stähle sind durch höhere Durchvergütbarkeit gekennzeichnet und ergeben hohe Zugfestigkeiten auch bei großen Durchmessern. Mo verringert zusätzlich die Neigung zur Anlasssprödigkeit.

Nur durchhärtbare Stähle sind vergütbar!

3.3.4 PANTENTIEREN

Eine dem Vergüten ähnliche Wärmebehandlung ist das Patentieren von Drähten (Federstahldraht und Drahtseildraht) oder Bändern (z.B. für Bandsägen). Patentierte Werkstoffe sind besonders für eine Kaltverformung geeignet.
Man unterscheidet:

- Badpatentieren durch Abschrecken aus Austenittemperatur in Bädern (Salz- oder Metallbad) von 400°C bis 550°C und Halten bis zur vollständigen Umwandlung in feinstreifigen Perlit (Sorbit).
- Luftpatentieren: Austenit mit sehr grobem Korn, das bei hoher Temperatur erzeugt wurde, wird nunmehr an der Luft abgekühlt. Es verzögert die perlitische Umwandlung.

Das Patentieren wird durchgeführt, um Besonders hohe Verformungsgrade und damit eine hohe Kaltverfestigung, bis zu 4.200 N/mm², zu erreichen.

3.4 RANDSCHICHTHÄRTEN

Ein Härten, das sich nur auf die äußeren Schichten eines Werkstücks beschränkt, kann erst an der (fast) fertigbearbeiteten Oberfläche erfolgen. Es kommt also für solche Teile in Betracht, die an den Außenflächen ganz oder teilweise zusätzlich Härte annehmen sollen. Das kann durch unterschiedliche Weise geschehen:

1. Einsatzhärten
2. Nitrieren
3. Carbonitrieren
4. Flammhärten
5. Induktionshärten
6. Strahlhärten
7. Tauchhärten

Der Begriff Randschichthärten soll nach DIN EN 10052 nur noch für Verfahren benutzt werden, bei denen die chemische Zusammensetzung der Randschicht nicht verändert wird. Dies trifft nur für die unter 4. bis 7. der obigen Übersicht genannten Verfahren zu. Bei den erstgenannten drei Verfahren werden aber die Randschichten chemisch verändert, wie gleich gezeigt werden wird.

Für den Stahlhändler ist vorrangig wichtig, die Bedürfnisse der Verbraucher oder Verarbeiter zu kennen und sich darauf einzustellen.

Viele Werkstücke verlangen für eine lange Lebensdauer eine verschleißfeste, also harte Oberfläche. Man kann z.B. Kurbelwellen und Lagerzapfen, Getriebezahnräder, Schalthebel im Getriebe usw. dazu zählen. Alle diese Teile reiben an anderen, werden also auf Verschleiß beansprucht. Gleichzeitig müssen diese Teile auch zäh sein (z.B. die Kurbelwelle), um den wechselnden stoßartigen Beanspruchungen standhalten zu können. Es wird von diesen Teilen also eine harte verschleißfeste Oberfläche und gleichzeitig ein zäher Kern verlangt. Diese Eigenschaften können durch unterschiedliche Arten von Wärmebehandlungen erreicht werden. Nachstehendes Schema soll zunächst einen Überblick über die Verfahren „Veränderung der Randschicht“ geben[1].

Abbildung 3.14: Übersicht über die Wärmebehandlungsverfahren zur Änderung der Randschichteigenschaften

[1] nach Stahl-Informations-Zentrum; Merkblatt 452

3.4.1 EINSATZHÄRTEN

Damit Bauteile und Werkzeuge durch Härten eine den Anforderungen genügende Härte erreichen, muss der verwendete Stahl einen ausreichenden Kohlenstoffgehalt aufweisen. Um eine erforderliche Härte von 65 HRC zu erzielen, ist ein Massenanteil von mindestens 0,56 – 0,64% Kohlenstoff erforderlich.

Im Gegensatz dazu lässt sich das Zerspanen und Umformen meist nur dann optimal durchführen, wenn der Kohlenstoffgehalt des Stahls möglichst niedrig ist, sodass der Werkstoff im ungehärteten Zustand relativ weich ist. Dies wird durch Verwendung von Stählen mit einem Kohlenstoffmassenanteil von deutlich unterhalb von 0,6% gewährleistet, wie es z.B. auf den Einsatzstahl zutrifft (DIN EN 10084). Der Kohlenstoffgehalt der Einsatzstähle liegt zwischen 0,05% und 0,2%. Werden diese Stähle über die Umwandlungstemperatur erwärmt und anschließend abgeschreckt, so erfolgt kaum eine Härtesteigerung – der Kohlenstoffgehalt ist viel zu niedrig. Nun kann man mit verschiedenen Verfahren in die Randschicht des Werkstückes Kohlenstoff einsetzen, damit die Randschicht härtbar wird. Wird dann das Werkstück über die Umwandlungstemperatur erwärmt und anschließend abgeschreckt, so ist die Randschicht durch den hohen Kohlenstoffgehalt hart geworden, der kohlenstoffarme Kern bleibt aber weich und zäh (*Abbildung 3.15*).

Zum Aufkohlen (Einsetzen) werden die Werkstücke in einem Gas, in flüssigen oder körnigen, kohlenstoffenthaltenden Mitteln bei Temperaturen, die vorzugsweise so hoch sind, dass das Stahlgefüge austenitisch ist, geglüht. Man unterscheidet dabei die Pulver-, Salzbad- und Gasaufkohlung.

Pulveraufkohlung

Beim Pulveraufkohlen werden die Werkstücke in Glühkästen aus Stahlblech gelegt und mit einem kohlenstoffhaltigen Pulver umgeben. Zuvor müssen sie aber von Öl und Fett gesäubert sein. Als Pulver verwendet man meist Mischungen aus Holzkohle und Koksgrus, aber auch Bariumcarbonat ($BaCO^3$), Natriumcarbonat ($NaCO^3$) oder Calziumcarbonat ($CaCO^3$) bzw. Mischungen davon. Diese Aufkohlungsmittel sind bereits fertig gemischt im Fachhandel erhältlich.
Während des Glühens zerfällt das Aufkohlungspulver und gibt Kohlenstoff in gasförmigem Zustand ab. Dieser dringt in die Randschicht des Werkstückes ein, wobei die Eindringtiefe von der Glühdauer und der Glühtemperatur abhängig ist. Der Kohlenstoffgehalt der aufgekohlten Schicht liegt bei etwa 1%. Nachstehendes Diagramm (*Abbildung 3.17*) zeigt den Zusammenhang von Aufkohlungstiefe und Glühdauer.

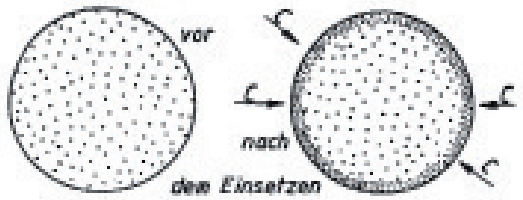


Abbildung 3.15: Kohlenstoffgehalt eines Einsatzstahls vor und nach dem Einsetzen

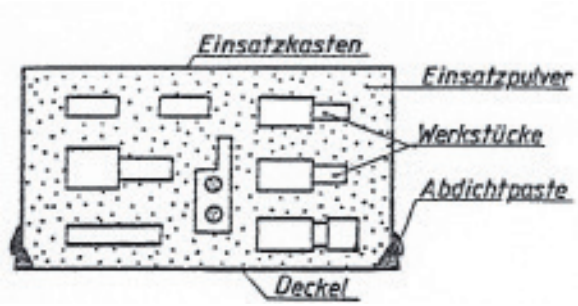


Abbildung 3.16: Stahlblech-Glühkasten für Pulver-Aufkohlung (Deckel unten)

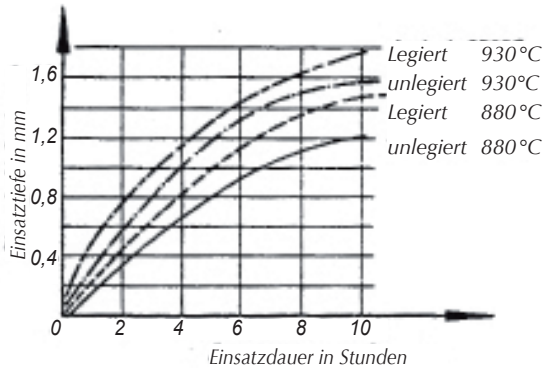
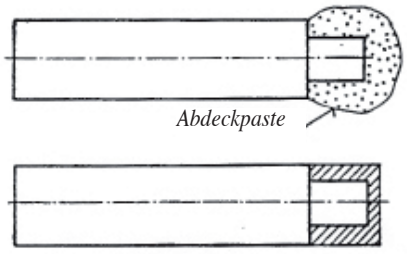


Abbildung 3.17: Zusammenhang von Aufkohlungstiefe und Glühdauer

Besonders vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass im Bedarfsfall auch nur bestimmte Teile des Werkstückes aufgekohlt werden können. Will man, dass ein Teil des Werkstückes nicht aufgekohlt wird, so wird dieser Teil einfach mit einer hitzebeständigen Abdeckpaste zugeschmiert. Der Kohlenstoff kann dann während des Glühvorganges nicht in die Oberfläche eindringen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass man den Teil, der nicht aufgekohlt werden soll, mit Übermaß herstellt. Nach dem Einsetzen (dann ist das Werkstück ja noch weich) wird dann die kohlenstoffhaltige Schicht (das Übermaß) spanabhebend (Drehen, Fräsen) entfernt.



Aufgekohlte Materialzugabe wird nach dem Einsetzen abgedreht

Abbildung 3.18: Schutz gegen Aufkohlung: oben durch Abdecken mit Abdeckpaste, oder unten durch Vorfertigen mit Übermaß und Abdrehen der Materialzugabe

Durch die lange Glühdauer während des Aufkohlens hat sich das Gefüge des Materials vergröbert. Diesen Fehler kann man durch Zwischenglühen bei 600°C und 680°C und ein bis zwei Stunden Glühdauer wieder beseitigen. Zur eigentlichen Härtung wird das Werkstück dann wieder auf Härtetemperatur (760°C und 800°C) gebracht und bei unlegierten Stählen in Wasser, bei legierten Stählen in Öl abgeschreckt.

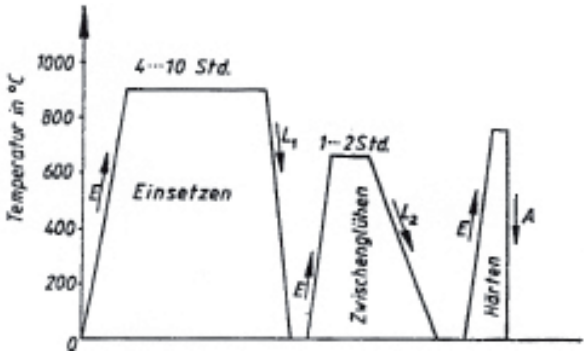


Abbildung 3.19: Temperatur/Zeit-Schaubild beim Einsatzhärten:
E = Erwärmen,
A = Abschrecken,
L2 = Langsames Abkühlen,
L1 = Abkühlen

Diese Kasteneinsatzhärtung ist sehr arbeitsintensiv, und da das Werkstück mehrmals erwärmt werden muss, auch sehr energieaufwendig. Sie wird deshalb in der Serienfertigung kaum mehr verwendet, für die Einzelfertigung ist sie aber immer noch aktuell.

Salzbadaufkohlung

Wesentlich kürzere Aufkohlungszeiten als die Pulveraufkohlung hat die Salzbadaufkohlung. Weitere Vorteile dieses Verfahrens sind die größere Gleichmäßigkeit der aufgekohlten Schicht, kei-

ne verzunderten Oberflächen, feineres Korn (wegen der kürzeren Glühzeit), geringerer Werkstückverzug und Energieeinsparung, weil das Werkstück, zumindest bei der Einfachhärtung, nur einmal erwärmt werden muss.

Die Aufkohlung der Einsatzstähle erfolgt dadurch, dass man die Werkstücke in eine kohlenstoffabgebende Cyansalzschmelze taucht. Die Temperatur der Salzschmelze liegt zwischen 850°C und 930°C. Nach einer Stunde Tauchzeit (Aufkohlungszeit) beträgt die Einsatztiefe bereits ca. 0,6 bis 0,8 mm.

Die Werkstücke, die mit Draht zu einer Einsatztraube zusammengebunden sind, werden dann aus der Salzschmelze herausgezogen und sofort in Wasser oder Öl abgeschreckt. Die nun harte Randschicht ist jedoch sehr grobkörnig und spröde. Das kommt daher, dass die Werkstücke aus der Einsatztemperatur heraus abgeschreckt worden sind. Diese Einsatztemperatur ist aber viel höher als die dem Kohlenstoffgehalt der Randschicht entsprechende Härtetemperatur.

Legt man Wert auf feinkörniges Gefüge, so müssen die Werkstücke nach dem ersten Härten nochmals erwärmt werden, diesmal aber auf die richtige Härtetemperatur. Das Abschrecken erfolgt dann wieder in Wasser oder Öl, je nach Werkstoffart. Soll das Werkstück besondere Zähigkeit aufweisen, so muss es nach dem Härten zwischen 150°C und 200°C angelassen werden.

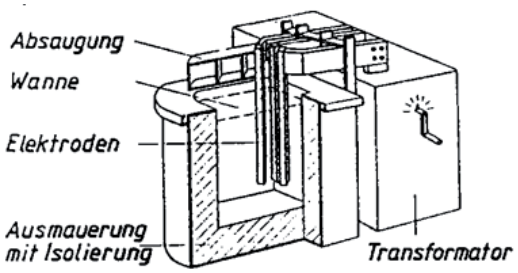


Abbildung 3.20: Elektroden-Schmelzbad-Wannenofen

Gasaufkohlung

In der modernen Massenproduktion wird für die Einsatzhärtung heute Gasaufkohlung angewandt. Die aufzukohlenden Werkstücke werden wie bei der Salzbadaufkohlung zu Einsatztrauben zusammengebunden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Werkstücke nicht gegenseitig berühren. An den Berührungsstellen könnte sonst kein Kohlenstoff in die Oberfläche eindringen.

Die Einsatztraube wird dann in einen elektrisch oder gasbeheizten Ofen gehängt. Wenn eine Glühtemperatur von 850°C bis 920°C erreicht ist, lässt man ein kohlenstoffabgebendes Gas (Kohlenmonoxid, Propan) durch den Ofen strömen. Dabei dringt der Kohlenstoff des Gases in die Randschicht der Werkstücke ein. Es werden Aufkohlungstiefen von 0,2 bis 0,3 mm pro Stunde erreicht. Das Abschrecken, gegebenenfalls ein nochmaliges Härten oder Anlassen, erfolgt in genau der gleichen Weise wie bei der vorher beschriebenen Salzbadaufkohlung.

Bei den bisher beschriebenen Verfahren zur Oberflächenhärtung wurde kohlenstoffarmer Stahl (Einsatzstahl) verwendet. In die zu härtende Randschicht wurde dann Kohlenstoff eingesetzt und diese somit härtbar gemacht. Eine andere Möglichkeit, nur die äußere Schicht eines Werkstücks hart zu machen, besteht darin, dass man einen bereits härtbaren Stahl verwendet. Damit aber nicht das ganze Werkstück hart wird, wird es nur an der Stelle erwärmt, an der es hart werden soll. Sofortiges Abschrecken nach Erreichen der Härtetemperatur verhindert, dass die nun harte Schicht zu dick wird. Dieses Verfahren bezeichnet man als Randschichthärtung.

3.4.2 RANDSCHICHTHÄRTEN

Für die Randschichthärtung verwendet man Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,3% und 0,6%, die unlegiert oder niedrig legiert sein können und die ihrer Natur nach Vergütungsstähle sind. Die Höhe des Kohlenstoffgehalts hängt von der verlangten Härte ab; je härter die Randschicht sein soll, desto höher muss auch der Kohlenstoffgehalt sein. Oft werden deshalb die Werkstücke vor der Randschichthärtung noch vergütet. Man bekommt dann Teile mit verschleißfester, harter Oberfläche und mit hoher Festigkeit. Als typisches Beispiel dazu kann man die Kurbelwelle nennen. Die ganze Kurbelwelle ist vergütet, die Hub- und Lagerzapfen sind zusätzlich noch randschichtgehärtet. Die vorhin erwähnte schnelle Erwärmung der Randschicht kann mittels einer starken Flamme (Flammhärtung) oder elektrisch (Induktionshärtung) erfolgen.

3.4.2.1 FLAMMHÄRTEN

Bei diesem Verfahren werden die zu härtenden Werkstückflächen mit einem Brenner sehr schnell auf Härtetemperatur gebracht. Als Brenngas verwendet man Leuchtgas, Erdgas oder ein Azetylen/Sauerstoffgemisch. Die Härtetemperaturen liegen zwischen 820°C und 850°C. Unmittelbar nach der Erwärmung wird mit einer Brause die erwärmte Randschicht abgeschreckt und somit gehärtet. Die Tiefe der gehärteten Schicht beträgt ca. 1 bis 1,5 mm. Wird die Vorschubbewegung des Brenners oder des Werkstückes verlangsamt, so kann die Wärme weiter in das Werkstück eindringen, die Härtetiefe wird dann größer.

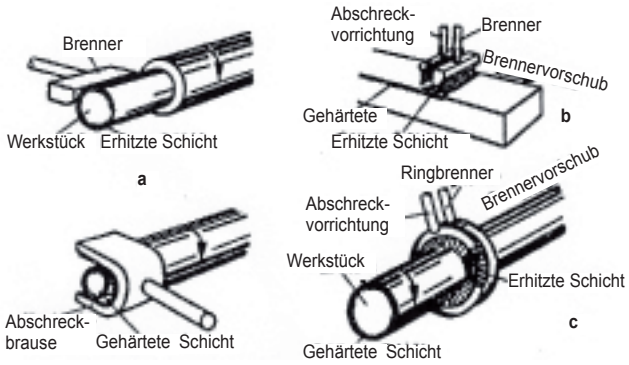


Abbildung 3.21: Je nach Gestaltung des Brenners bzw. der Brause unterscheidet man bei der Flammhärtung die Mantelhärtung (a), die Linienhärtung (b) oder die Ringhärtung (c).

3.4.2.2 INDUKTIONSHÄRTEN

Das Grundprinzip der Induktionshärtung ist das gleiche wie bei der Flammhärtung: Die Randschicht des Werkstückes wird auf Härtetemperatur gebracht und sofort abgeschreckt. Die Erwärmung der Randschicht erfolgt hier aber durch Wirbelströme. Dazu muss die zu erwärmende Oberfläche von einer Kupferspule, dem Heizinduktor, umgeben sein. Der Heizinduktor ist hohl, damit er mit Wasser gekühlt werden kann. Lässt man nun durch den Heizinduktor einen Wechselstrom fließen, so entsteht um den Induktor ein magnetisches Feld, das ständig seine Richtung ändert. Dieses magnetische Feld bewirkt, dass die Elektronen in der Randschicht des Werkstückes mit hoher Geschwindigkeit umherwirbeln - es entsteht ein Wirbelstrom. Die Folge dieses Wirbelstroms ist eine Wärmeentwicklung. Die Wärme wird also nicht von außen an das Werkstück gebracht, sie wird vielmehr im Werkstück selbst erzeugt. So werden kürzeste Aufheizzeiten von nur wenigen Sekunden bis zu Bruchteilen von Sekunden erzielt.

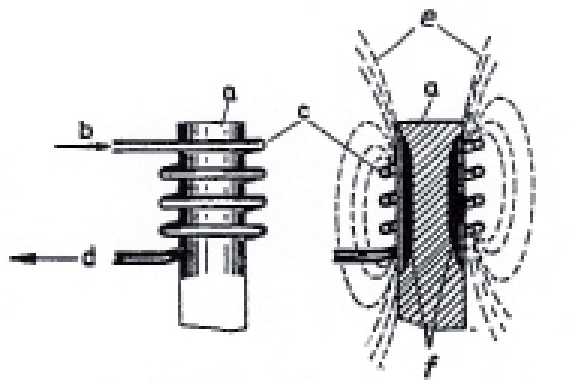


Abbildung 3.22: *Schematische Darstellung der Induktionserwärmung. (a) Werkstück; (b) Kühlwasserzufluss in den Heizinduktor; (c) Heizinduktor; (d) Kühlwasserrückfluss; (e) Magnetfeld des Heizinduktors; (f) durch Wirbelströme erwärmte Randschicht.*

Die Frequenz, d.h., die Zahl, die angibt, wie oft der Strom seine Flussrichtung in einer Sekunde ändert, liegt zwischen 1.000 und 1.000.000; sie wird in Hertz (Hz) angegeben. Zum Vergleich sei erwähnt, dass unser elektrisches Netz eine Frequenz von 50 Hz aufweist. Die Erzeugung der hochfrequenten Ströme erfolgt in Frequenzgeneratoren. Die Form des Heizinduktors und die Frequenz der Wechselströme sind vom Werkstück abhängig. Die Eindringtiefe ist von der elektrischen Leitfähigkeit, der magnetischen Eigenschaft des Werkstücks und natürlich von der Frequenz abhängig. Ganz allgemein kann man sagen, dass mit steigender Frequenz die Eindringtiefe sinkt.

Wenn die Randschicht des Werkstückes die Härtetemperatur erreicht hat, wird es aus der Heizschleife (dem Induktor) genommen und – je nach Werkstoffart – in Wasser oder Öl abgeschreckt. Dieser Vorgang wird häufig automatisch gesteuert. Es stehen zwei Arbeitsverfahren zur Verfügung, die Gesamtflächenhärtung und die Vorschubhärtung.

Bei der Gesamtflächenhärtung wird zunächst die gesamte zu härtende Schicht auf Härtetemperatur gebracht und unmittelbar danach abgeschreckt.

Bei der Vorschubhärtung erfolgen Aufheizen und Abschrecken gleichzeitig. Dazu ist dann aber eine Bewegung des Induktors zum Werkstück notwendig. Durch diese Bewegung gelangt der im Induktor aufgeheizte Bereich in die Abschreckzone. Hier entsteht durch die rasche Abkühlung das gewünschte Härtegefüge. Abschreckbrause und Heizinduktor sind in einem bestimmten Abstand fest miteinander verbunden. Bei bestimmten Werkstücken (langen Wellen, Führungsbahnen von Werkzeugmaschinen usw.) wird ausschließlich mit Vorschubhärtung gearbeitet.

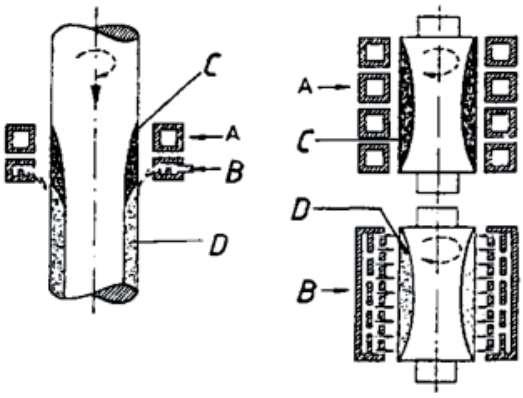


Abbildung 3.23: *Schematische Gegenüberstellung von Vorschubhärtung (links) und Gesamtflächenhärtung. (A) Heizinduktor; (B) Abschreckbrause, (C) erwärmte Randschicht; (D) abgeschreckte Randschicht*

Die für die Induktionshärtung notwendigen Einrichtungen (Frequenzgenerator, an die Werkstückform angepasster Heizinduktor, Steuerungseinrichtung) sind sehr teuer. Das Induktionshärten lohnt sich deshalb nur bei Massenproduktion, wie z.B. im Automobilbau. Die Induktionshärtemaschinen werden dann auch vollautomatisch gesteuert. Als Beispiele für induktionsgehärtete Teile seien angeführt: Kurbelwelle, Nockenwelle, Kipphebel, Ventilstößel, Ventile, Kipphebelachsen usw. Bei jedem dieser Bauteile wird aber nur die auf Verschleiß beanspruchte Stelle gehärtet.

3.4.3 NITRIEREN

Beim Nitrieren, auch als Nitrierhärten oder Aufsticken bezeichnet, wird Stickstoff verwendet. Der Name Nitrieren wurde von dem lateinischen Wort für Stickstoff (nitrogenium) abgeleitet. Voraussetzung für das Nitrieren ist, dass der Stahl mit Chrom und Aluminium legiert ist. Dann bildet der Stickstoff mit den Legierungsbestandteilen äußerst harte Nitride. Diese Nitride bilden sich beim Eindringen des Stickstoffs in die Randschicht des Stahls, Abschrecken ist nicht notwendig. Stähle, die zum Nitrieren geeignet sind, bezeichnet man als Nitrierstähle. Sie haben einen Kohlenstoffgehalt von 0,26 - 0,34%, der Aluminiumanteil liegt bei ca. 0,5 bis 1,5%, der Chromgehalt zwischen 1 bis 2%.

Als typische Vertreter der Nitrierstähle seien genannt:
34CrAlMo5 und 34CrAlNi7. Der Stickstoff kann in einer Gasatmosphäre oder auch im Salzbad dem Werkstück zugeführt werden. Man unterscheidet deshalb die Gasnitrierung und die Salzbadnitrierung.

Gasnitrierung

Als Gas wird aus Kostengründen kein reiner Stickstoff, sondern das stickstoffhaltige Gas Ammoniak (NH_3) verwendet. Die meisten Werkstücke werden vor dem Nitrieren vergütet. Die hohe Festigkeit verhindert dann ein Eindrücken der harten Nitrierschicht. Wäre der Untergrund für die Nitrierschicht zu weich, so könnte bei starker Beanspruchung diese Schicht etwas nachgeben. Es bilden sich dann Risse, und die Nitrierschicht blättert ab. Durch das Vergüten wird auch ein gleichmäßiges Gefüge erreicht, welches auch Voraussetzung für eine gleichmäßige Stickstoffaufnahme ist. Die Werkstücke müssen sauber und fettfrei sein. Sollen bestimmte Flächen nicht hart werden, so müssen sie gegen die Stickstoffaufnahme geschützt werden. Das kann durch Verzinnen (seltener durch Verkupfern) der zu schützenden Flächen geschehen. Es sind auch Abdeckpasten im Handel erhältlich.

Nach den Vorbereitungsarbeiten werden dann die Werkstücke mit Drähten in einen Kasten gehängt. Dieser Nitrierkasten wird gasdicht verschlossen. Damit der Sauerstoff aus dem Kasten herauskommt, wird nun mit Ammoniak gespült. Das Ammoniak wird über einen Entfeuchter (Kalksteine) geleitet. Die Kalksteine entziehen dem Ammoniak eventuell vorhandenes Wasser. Bei der Anwesenheit von Wasser misslingt das Nitrieren, außerdem würden sich auf der Werkstückoberfläche Flecken bilden. Nun wird der Nitrierkasten mit den Werkstücken in einem elektrisch beheizten Ofen langsam auf Nitriertemperatur von 500°C bis 520°C erwärmt. Die Erwärmungsgeschwindigkeit beträgt ca. 50°C pro Stunde. Das langsame Erwärmen ist vor allem bei Werkstücken mit stark verschiedenen Querschnitten notwendig. So wird ein Verziehen vermieden. Bei der Glühtemperatur von 500°C

bis 520°C zersetzt sich Ammoniak in Stickstoff und Wasserstoff. Der frei werdende Stickstoff kann in die Oberfläche der Werkstücke eindringen, die restlichen Gase entweichen über einen Schornstein.

Die Nitrierdauer ist sehr lang. Sie dauert je nach Eindringtiefe zwischen 12 und 100 Stunden. Bei ca. 50 Stunden wird eine Härtetiefe von etwa 0,6 mm erreicht, bei 90 Stunden etwa 0,9 bis 1,0 mm. Größere Härtetiefen sind kaum erreichbar, aber auch nicht notwendig.

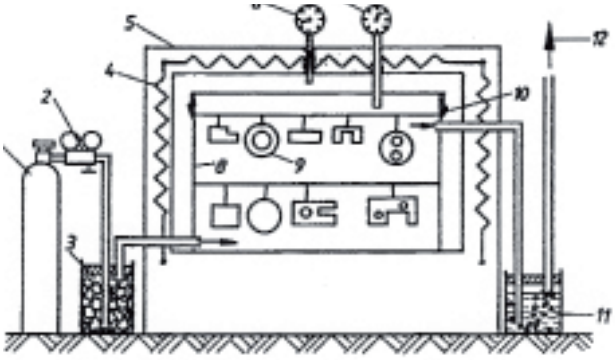


Abbildung 3.24:
Schematische Darstellung einer Gasnitrieranlage.

(1) Ammoniakgasflasche; Ammoniak liefert den notwendigen Stickstoff.
(2) Druckminderer; links ein Manometer für den Flaschendruck, rechts eines für den Arbeitsdruck.
(3) Gasentfeuchter; die Kalksteine entziehen dem vorbeiströmenden Gas eventuell vorhandenes Wasser.
(4) Heizspiralen.
(5) elektrisch beheizter Kammerofen.
(6) Thermometer für die Ofentemperatur.
(7) Thermometer für die Temperatur im Nitrierkasten.
(8) Nitrierkasten
(9) aufgehängte Werkstücke
(10) Abdichtpaste.
(11) Abgaskontrolle; an den Gasblasen, die im Wasser hochsteigen, kann man kontrollieren, ob Ammoniak durchströmt.
(12) Abzug durch den Schornstein

Seit geraumer Zeit gibt es Nitrieranlagen, bei denen die Werkstücke direkt in den Ofen gehängt werden können. Der Ofen muss dann aber gasdicht verschlossen werden können, damit das stechend riechende Ammoniak nicht entweichen kann.

Vorteile des Nitrierens

Größere Härte als beim Kohlenstoffhärten
Härte bleibt bis ca. 500°C bestehen (anlassbeständig)
Werkstücke müssen nicht abgeschreckt werden
Oberflächen der Werkstücke verzundern nicht
Geringer Verzug der Werkstücke
Gute Gleit- und Laufeigenschaft der nitrierten Oberfläche

Nachteile des Nitrierens

Durch das Nitrieren erhalten die Werkstücke eine geringfügige Volumenzunahme. Genaue Maße (Passungen) müssen nach dem Nitrieren fertig bearbeitet (geschliffen) werden. Es dürfen aber nicht mehr als 0,02 bis 0,04 mm abgeschliffen werden, weil da die Nitrierschicht die größten Härtewerte aufweist.

Anwendungsbeispiele

Als Beispiele für nitriergehärtete Werkstücke seien aufgeführt: Kolbenbolzen, Getriebezahnräder,Ventile, Kurbelwellen, Nockenwellen und Zylinderlaufbuchsen.

Salzbadnitrieren

Wesentlich schneller als das Gasnitrieren ist das Salzbadnitrieren. Man verwendet dazu cyanhaltige Salzbäder. Diese bestehen aus 32 bis 38% Kaliumcyanat (KCNO) und 55°C bis 60% Kaliumcyanid (KCN). Bei der Nitriertemperatur von 570°C zerfällt das Kaliumcyanat, Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C) werden frei. Beide Stoffe dringen in die Stahloberfläche ein und bilden eine harte Randschicht (das Eindringen eines Gases nennt der Fachmann diffundieren). Die Behandlungsdauer liegt zwischen einer und drei Stunden, dabei werden Härtetiefen zwischen 0,05 und 0,2 mm erreicht. Die Nitrierwirkung kann wesentlich verbessert werden, wenn während der Behandlung Luft durch die Schmelze geblasen wird. Das stickstoffhaltige Salzbad wird dann reaktionsfähig.

Die Tiegel, in denen die Nitrierbäder eingeschmolzen werden, bestehen aus Stahlblech oder aus Titanblech. Letztere haben den Vorteil, dass die Schmelze länger verwendet werden kann als bei Stahltiegeln. Bei diesen löst nämlich die Schmelze Eisen aus der Behälterwandung heraus, der Eisengehalt der Schmelze steigt dadurch an. Ein hoher Eisengehalt beeinträchtigt aber den Nitriererfolg. Erfolgt das Nitrieren in belüfteten und mit Titan ausgekleideten Tiegeln, so spricht man vom Tenifer-Verfahren. Das Wort Tenifer kommt von tenax = zäh, nitrogenium = Stickstoff und ferrum = Eisen.

Für das Salzbadnitrieren eignen sich unlegierte und legierte Baustähle sowie verschiedene Gusseisensorten. Spezielle Nitrierstähle (wie beim Gasnitrieren erforderlich) sind hier also nicht notwendig.

Durchführung der Salzbadnitrierung
Die Werkstücke müssen vor dem Nitrieren sauber, das heißt öl-, fett- und rostfrei sein. Dann werden sie auf ca. 500°C vorgewärmt. Das geschieht am zweckmäßigsten in einem Luftumwälzofen. Die an Drähten aufgehängten Werkstücke werden dann in das Salzbad getaucht. Nach der gewünschten Behandlungsdauer können sie, falls ein eventueller Verzug keine Rolle spielt, in Wasser oder Öl abgekühlt werden. Verzugsempfindliche Werkstücke lässt man an der Luft erkalten. Wichtig ist in beiden Fällen, dass man die Werkstücke nach dem Nitrieren mit Heißwasser abspritzt, damit eventuelle Salzreste entfernt werden.

Carbonieren

Carbonitrieren bedeutet gleichzeitige die Aufnahme von Kohlenstoff und Stickstoff. Das Wort Carbonitrieren setzt sich zusammen aus carboneum = Kohlenstoff und nitrogenium = Stickstoff. Zum Carbonitrieren verwendet man kohlenstoffarme Stähle. Damit sich in der Randschicht ein Härtegefüge (Martensit) bildet, muss das Werkstück Temperaturen oberhalb der Umwandlungslinie ausgesetzt sein und anschließend abgeschreckt werden. Die Qualitätsverbesserung (große Härte und hohe Verschleißfestigkeit) gegenüber der Einsatzhärtung durch Aufkohlung ergibt sich aus der ergänzenden Wirkung von Kohlenstoff und Stickstoff. Das Carbonitrieren kann im Salzbad (Badcarbonitrieren) oder auch in einer Gasatmosphäre (Gascarbonitrieren) erfolgen.

Badcarbonieren

Es werden cyanidhaltige Salzschmelzen verwendet. Das Badcarbonitrieren wird bei Temperaturen zwischen 750°C und 850°C durchgeführt. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch die Eindringgeschwindigkeit. Die Verweildauer im Bad ist von der gewünschten Härtetiefe abhängig (bis zu vier Stunden). Das Abschrecken der Werkstücke erfolgt meist in Öl.

Gascarbonieren

Beim Gascarbonitrieren werden die Werkstücke, wie beim Gasnitrieren, in Nitrierkästen gegeben oder direkt in gasdichte Öfen gehängt. Als Gas verwendet man ein Gemisch aus Kohlenmonoxid (CO) und Ammoniak (NH^3). Kohlenmonoxid liefert den Kohlenstoff (C), Ammoniak den Stickstoff (N). Temperaturen, Behandlungsdauer und das anschließende Abschrecken sind die gleichen wie beim Badcarbonitrieren.

3.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Stähle sind Härten, Vergüten, Patentieren und Glühen.

Härten führt durch die schnelle Abkühlung zu einem besonders verschleißfesten aber spröden Martensitgefüge. Beim Patentieren wird isotherm ein gut verformbarer, feinstreifiger Perlit erzeugt. Durch Vergüten, d.h. Härten mit anschließendem Anlassen, nimmt man gehärtetem Stahl seine Sprödigkeit, ohne die Festigkeit übermäßig zu beeinträchtigen. Das Glühen hat im allgemeinen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Stählen zum Ziel, weil es – je nach Verfahren – Spannungen im Gefüge abbaut oder dieses in eine günstige Form umwandelt. Sehr oft ist eine Kombination der Wärmebehandlungsverfahren die günstigste Art, Stähle auf ihre Eigenschaften einzustellen.

Prinzipiell unterscheiden sich die einzelnen Verfahren nur in der Temperaturführung, das heißt in Aufwärm- und Abkühlgeschwindigkeit, in der Höhe der erzeugten Temperaturen (die im wesentlichen vom Kohlenstoffgehalt abhängig sind) und im Vorhandensein und in der Dauer von isothermischen Haltezeiten.