

1 WÄRMEBEHANDLUNG

Nachdem wir nun die Grundlagen kennengelernt haben, auf denen die Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe beruht, wollen wir uns dieser selbst zuwenden.

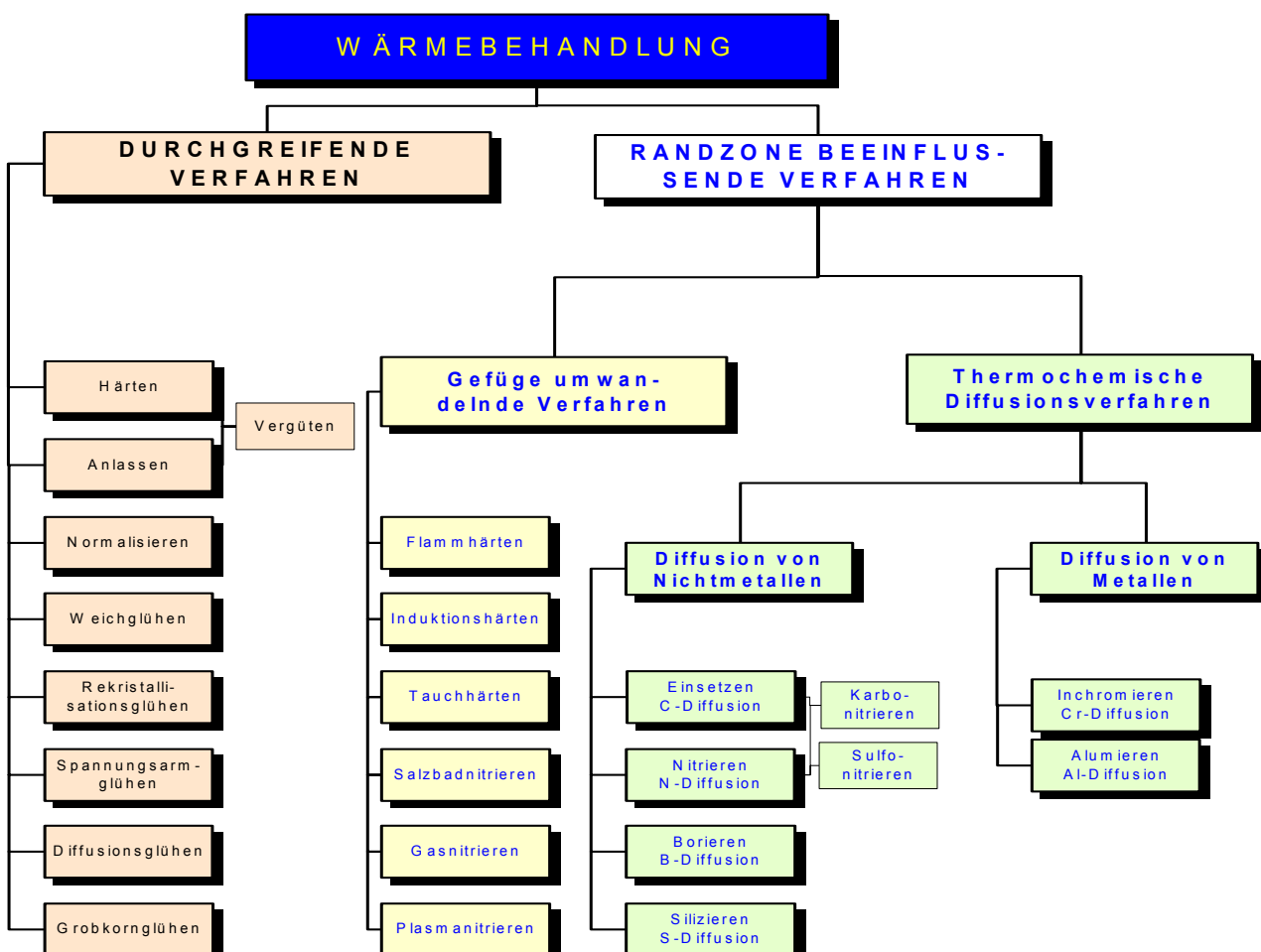
Es gibt zahlreiche Verfahren der Wärmebehandlung. Wir beschäftigen uns lediglich mit den heute in der Praxis wichtigsten und am meisten angewendeten Verfahren.

Nach DIN 17014 ist der Begriff "Wärmebehandlung" folgendermassen definiert:

Verfahren oder Verbindung mehrerer Verfahren zur Behandlung eines Werkstückes, wobei das Werkstück Änderungen der Temperatur oder des Temperaturablaufs unterworfen wird, um bestimmte Werkstoffeigenschaften zu erzielen. Dabei können umgebende Mittel Änderungen, z.B. des Kohlenstoff- oder Stickstoffgehaltes, herbeiführen. Eine Warmverformung oder mit Erwärmung verbundene Verfahren des Oberflächenschutzes fallen nicht unter Wärmebehandlung.

Bild 18 zeigt eine schematische Aufgliederung der in der Praxis mehr oder weniger häufig angewendeten Wärmebehandlungsverfahren. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen durchgreifend wirkenden und randzonenbeeinflussenden Verfahren, sowie zwischen den gefügeumwandelnden Verfahren ohne Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Stahles und den thermochemischen Diffusionsverfahren.

Aufgliederung der Wärmebehandlungsverfahren



1.1 DURCHGREIFEND WIRKENDE VERFAHREN

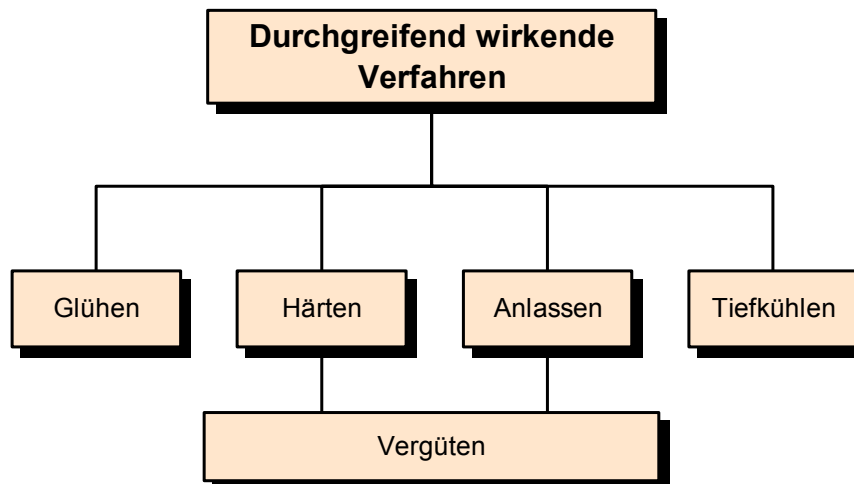


Bild 19: Aufgliederung durchgreifend wirkender Verfahren

In den folgenden Kapiteln werden sämtliche Verfahren näher beschrieben. Als Hilfe dient Bild 20.

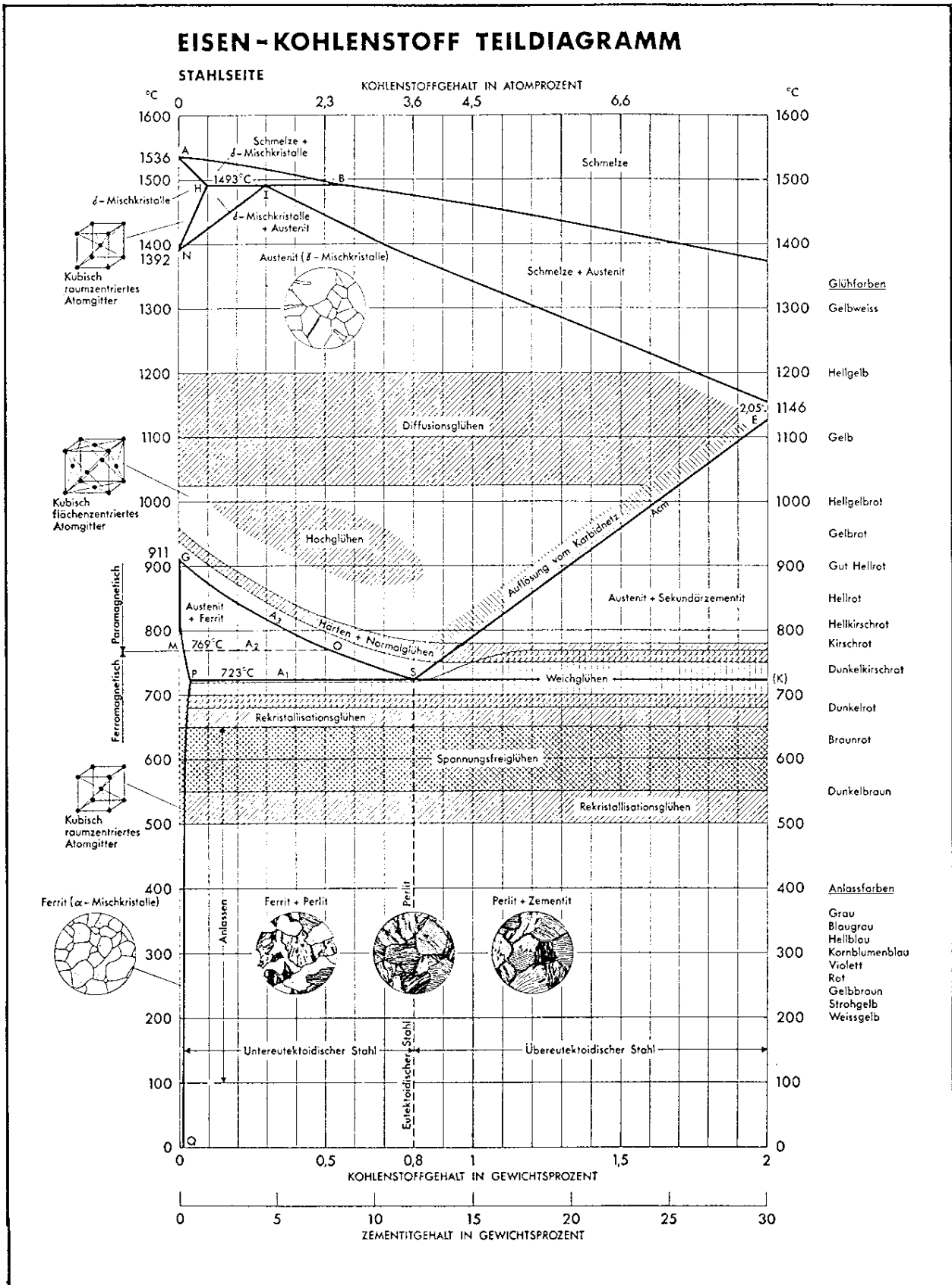
1.1.1 Glühen

Unter Glühen versteht man allgemein das Erwärmen eines Werkstückes auf eine bestimmte Temperatur, Halten auf dieser Temperatur und anschliessend, in der Regel langsames Abkühlen. Alle Glühverfahren führen, sofern sie unter Luftatmosphäre durchgeführt werden, zum Verzundern oder Entkohlen der Werkstücke. Dies macht sich vor allem bei vorbearbeiteten Teilen oder bei Teilen die nachfolgend gehärtet werden störend bemerkbar. Man vermeidet die Entkohlung oder Verzunderung, indem man die Berührung des Stahles mit Sauerstoff vermeidet. Dies geschieht in der Regel durch die Erzeugung einer speziellen, sauerstofffreien Gesamtatmosphäre im Ofen oder aber unter Vakuum. Man spricht dann von einer sogenannten **Schutzgas-** oder **Vakuumlüfung**.

Grundsätzlich werden folgende Arten des Glühens unterschieden:

- Weichglühen
- Spannungsarmglühen
- Normalisierendes oder Normalglühen
- Rekristallisationsglühen
- Grobkornglühen

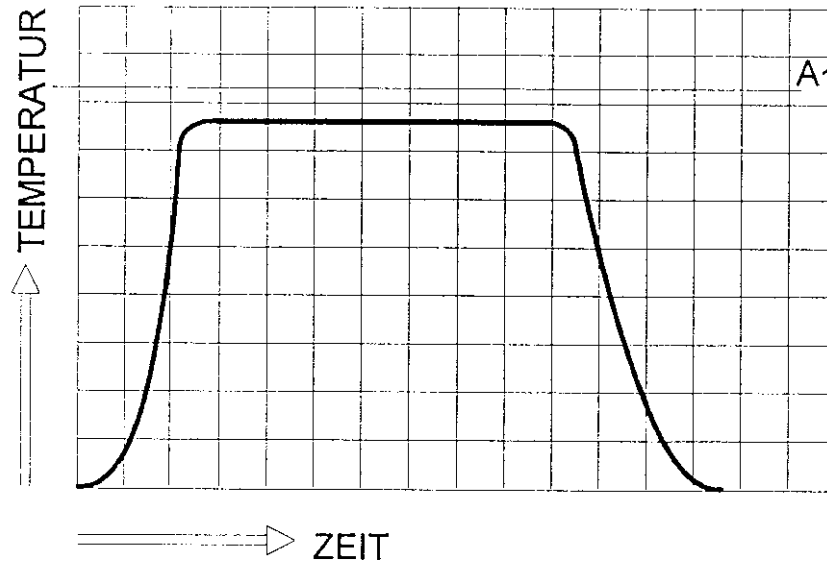
Bild 20: Temperaturbereiche verschiedener Verfahren (eingezeichnet in das metastabile System Fe3C, dargestellt bis 2% C)



Weichglühen

Mehrständiges Glühen bei Temperaturen im Bereich unterhalb oder oberhalb von A_{c1} - oder Pendeln um A_{c1} - mit anschließendem, langsamen Abkühlen zum Erzielen eines für den jeweiligen Verwendungszweck hinreichend weichen und möglichst spannungsarmen Zustandes. Temperatur-Zeit-Verlauf siehe Bild 21.

Bild 21: Temperatur-Zeit-Verlauf beim Weichglühen



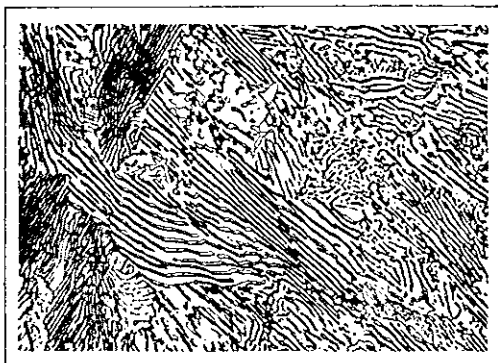
Bei diesem Glühen wird keine Rücksicht darauf genommen, wie das Gefüge vor dem Weichglühen ist, bzw. wie es nach dem Glühen sein soll. Im Vordergrund steht nur die Veränderung der Zugfestigkeit, bzw. der Härte (z.B. Beseitigung von Aufhärtungen wie sie beim Ausbrennen eines Stahles mit C-Gehalt über 0,3% entstehen).

Bei dieser Behandlung werden die Karbide (z.B. die Fe_3C -Platten beim lamellaren Perlit) zu kleinen Kugeln eingeformt (kugeliger Zementit) (Bild 22). Man spricht dann von körnigem Perlit oder sphäroidisiertem Zementit.

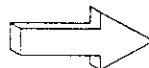
Bild 22: Weichglühen

Perlit-Gefüge mit Streifen zementit

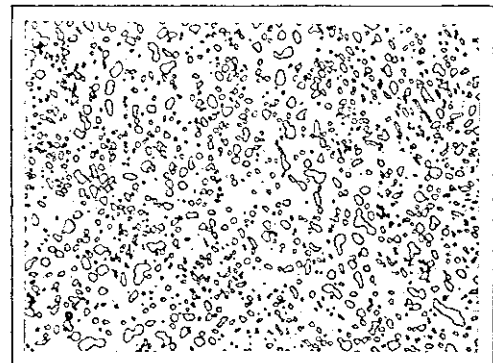
Ferrit-Grundgefüge mit körnigem Zementit



Glühen bei 680 bis 750 °C



während mehrerer Stunden



Nach der Wärmebehandlung lässt sich das Gefüge gut kaltumformen und zerspanen, wobei letzteres allerdings bei niedriggekohlten Stählen nicht gilt, da z.B. untereutektoiden Stähle (C-Gehalt < 0,5%) im weichgeglühten Zustand bei der Zerspanung schmieren.

Besonders zu beachten:

- Verbesserung der Bearbeitbarkeit bei Stählen $\leq 0,8\%$ C-Anteil (680° - 720° C)
- Keine Verbesserung der Bearbeitbarkeit bei Stählen $>0,8\%$ C-Anteil.
- Weichglühen ist nicht geeignet vor einer Induktionshärtung.
- Wenn bei einem erstmaligen Härten die geforderte Härte nicht erreicht wurde und die betroffenen Teile einer nochmaligen Härtung unterzogen werden müssen, dann ist vor der nochmaligen Härtung unbedingt ein Weichglühen erforderlich um Härterisse zu vermeiden.
- Nach dem Ausbrennen von induktionshärtbaren Stählen müssen die Teile weichgeglüht werden um die nachfolgende spanabnehmende Bearbeitbarkeit zu verbessern.

Spannungsarmglühen

Beim Spannungsarmglühen verfolgt man den Zweck, im Werkstück innere Spannungen abzubauen.

Definition nach DIN 17014:

Glühen bei einer Temperatur unterhalb A_{c1} , meist unter 650°C, mit anschließendem, langsamen Abkühlen (möglichst Ofenabkühlung) zum Abbau innerer Spannungen, ohne wesentliche Änderung der vorliegenden Eigenschaften (Bild 20).

Spannungen entstehen bei jeder Kaltverformung (Biegen, Richten u.a.), Bearbeitungsspannungen beim Drehen, Fräsen, Bohren, insbesondere bei den Schruppoperationen. Bei der Weiterverarbeitung und bei nachfolgenden Wärmebehandlungen lösen sich solche Spannungen und führen zu Verzug.

Durch Spannungsarmglühen vor der Fertigbearbeitung eines Werkstückes hat man Gelegenheit, den Verzug nachträglich durch Feinbearbeiten zu egalisieren.

Wichtig ist die Tatsache, dass durch diese Glühoperation die Gefügeeigenschaften nur unwesentlich beeinflusst werden.

Besonders zu beachten:

- Durch Spannungsarmglühen finden keine wesentliche Veränderungen der Gefügeeigenschaften statt.
- Rostfreie Stähle mit Niob- und Tantal-Anteilen dürfen nicht spannungsarm geblüht werden!
- Teile die für eine nachfolgende Wärmebehandlung (z.B. Härten, Nitrieren, etc...) vorgesehen sind, müssen spannungsarm geblüht werden.
- Spannungsarmglühen nach Vergüten erfordert, dass die Glühtemperatur etwa 30 K unter der Anlasstemperatur bleiben muss.
- Die Glühtemperatur muss stets über der Betriebstemperatur für die betreffenden Bauteile liegen.
- Bei Gusseisen ist besonders sorgfältig zu verfahren (rissempfindlich, Gefahr des „Wachsens“ durch Zementit zerfall bei zu hohen Temperaturen).

Normalglühen (Glühtemperatur bei $\leq 0,8\%$ C um Ac3, über $0,8\%$ C um Ac1)

Normalgeglüht oder normalisiert wird bei einer Temperatur knapp oberhalb des oberen Umwandlungspunktes Ac3 (bei übereutektoiden Stählen oberhalb des unteren Umwandlungspunktes Ac1), mit nachfolgendem Abkühlen an ruhender Atmosphäre (Bild 20). Mit Normalglühen können Gefügeungleichmässigkeiten beseitigt werden. Dieses Glühen dient auch oft einer Kornverfeinerung.

Von grösster Wichtigkeit ist z.B. das Normalglühen bei Stahlgussstücken oder bei Schweisskonstruktionen (Kornverfeinerung). Grosse Gefügeungleichmässigkeiten entstehen insbesondere dann, wenn Werkstücke partiell auf Schmiedetemperatur erwärmt und verformt werden, wie zum Beispiel beim Anstauchen, Verwinden, Zuspitzen usw. Durch nachträgliches Normalglühen kann am ganzen Werkstück wieder ein gleichmässiges Gefüge erreicht werden.

Besonders zu beachten:

- Durch Normalglühen wird eine Kornverfeinerung und damit auch eine Erhöhung der Zähigkeitseigenschaften erzielt.
- Normalglühen löst auch Spannungen, aber bei unsachgemässer Abkühlung können auch zusätzliche Spannungen eingebaut werden.
- Beim Normalglühen muss das Werkstück ab 600°C schnell auf Härtetemperatur erwärmt werden.
- Normalglühen ist nur zu empfehlen bei Teilen ohne nachfolgende Wärmebehandlung.

Grobkornglühen $950^\circ - 1000^\circ\text{C}$ (Hochglühen)

Während beim Normalglühen im allgemeinen ein feineres Korn angestrebt wird, verfolgt man beim Grobkornglühen genau das Gegenteil.

Das Grobkornglühen (auch Hochglühen genannt) ist ein Normalglühen bei überhöhter Temperatur (über Ac3), z.B. $950 - 1000^\circ\text{C}$, mit zweckentsprechender Abkühlung zur Erreichung eines gröberen Kornes, meist zur Verbesserung der Zerspanbarkeit bei kohlenstoffarmen Stählen (neigen sonst zum Schmieren).

Nach der zerspanenden Bearbeitung wird im allgemeinen wieder eine Kornverfeinerung durch Normalglühen herbeigeführt (Bild 20).

Besonders zu beachten:

- Grobes Korn mindert die Festigkeit.
- Deshalb anschliessend Normalglühung erforderlich (wenn die Teile anschliessend nicht vergütet oder einsatzgehärtet werden und dadurch feines Korn erhalten).

Rekristallisationsglühen (500° - 700° C)

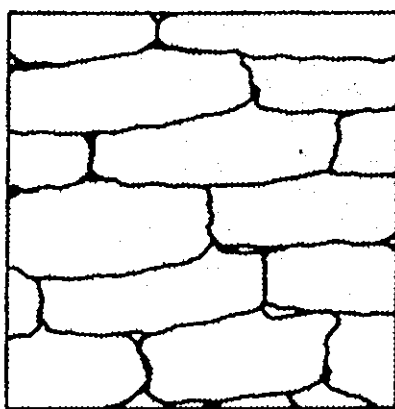
Unter Rekristallisationsglühen versteht man ein Glühen bei einer Temperatur im Rekristallisationsbereich (Bild 20) nach einer Kaltverformung.

Durch Kaltverformung wie Ziehen, Pressen, Stauchen wird das Gefüge von Metallen in der Verformungsrichtung gestreckt, die Festigkeit steigt an, die Verformbarkeit nimmt jedoch ab (Kaltverfestigung).

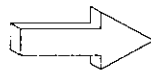
Nach einem bestimmten Verformungsgrad (werkstoffabhängig), muss ein Rekristallisationsglühen durchgeführt werden, um den ursprünglichen Gefügezustand wieder zu erhalten (Bild 23).

durch Verformung verzerrtes Gefüge

neu gebildetes Gefüge



Glühen bei
500 bis 700°C



während mehrerer
Stunden

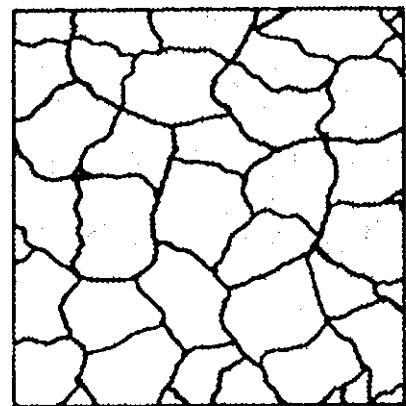


Bild 23: Rekristallisationsglühen

Die Rekristallisationstemperatur liegt bei Stahl zwischen 500 und 700°C.

Die von der Kaltverformung vorliegende Verfestigung wird abgebaut, wobei gleichzeitig durch Keimbildung eine Neuorientierung des Kristallgitters stattfindet.

Die Rekristallisation beginnt erst bei erhöhter Temperatur. Die sich neu bildenden Kristalle wachsen solange, bis sie durch die benachbarten, ebenfalls wachsenden Kristalle behindert werden. Wenn also durch einen kleinen Verformungsgrad, ca. 5 bis 20%, nur eine kleine Anzahl von Keimen vorliegt, entsteht ein grobes Korn. Grobes Korn vermindert die Dehnung und die Bruchfestigkeit und wird deshalb vermieden.

Das Rekristallisationsglühen wird hauptsächlich beim Kaltwalzen, bzw. Kaltziehen von Blechen, Bändern und Drähten zwischen den einzelnen Verformungsstufen angewendet.

Besonders zu beachten:

- Bei geringen Umformungsgrad (5 – 20%) bildet sich sehr grobes Korn (kritischer Umformgrad). Man muss dieses Intervall vermeiden oder anschliessend normalglühen.
- Wenn man zu lange glüht, entsteht ebenfalls Grobkorn (sekundäre Rekristallisation)
- Bei einem grossen Verformungsgrad entsteht ein Feinkorngefüge.

1.1.2 Härten (Wärmebehandlung im Ungleichgewicht)

Das Härten ist nach DIN 17014 folgendermassen definiert:

Abkühlen von einer Temperatur oberhalb der Umwandlungspunkte A3 bzw. A1 mit solcher Geschwindigkeit, dass oberflächlich oder durchgreifend eine erhebliche Härtesteigerung, in der Regel durch Martensitbildung, eintritt. Das Erwärmen muss auf eine Temperatur über die Umwandlungspunkte Ac1 oder Ac3 und das Abkühlen von einer Temperatur oberhalb der Umwandlungspunkte Ar3 oder Ar1 vorgenommen werden.

Das Härten besteht aus einem Erwärmen, entsprechend langem Halten der Werkstücke auf der Härtetemperatur und anschliessendem Abschrecken (Bild 24). Durch das Härten erlangt der Stahl ein martensitisches Gefüge. Die erreichbare Härte ist in erster Linie vom Kohlenstoffgehalt abhängig und in zweiter Linie von der Abmessung des Werkstückes (Bild 25). Um die höchste Härte bei einem Stahl zu erreichen, sind demnach ca. 0,8% Kohlenstoffgehalt notwendig.

Das Erwärmen auf Härtetemperatur muss gleichmässig und durchgreifend erfolgen. In der Regel wird das vorgewärmte Werkstück in den Härteofen gelegt, der sich bereits auf Härtetemperatur befindet.

Der zum Härten erforderliche Kohlenstoff ist vor dem Härten in Karbiden gebunden, die durch das Halten auf der Härtetemperatur gelöst werden müssen. Die Löslichkeit der Karbide ist je nach ihrer Zusammensetzung verschieden, wobei z. B. Wolfram- und Vanadiumkarbide zu den schwer löslichen zählen.

Die Härtetemperatur aller Stähle muss mindestens 30°C über dem Umwandlungspunkt liegen. Der Haltezeit auf Härtetemperatur muss grosse Aufmerksamkeit gewidmet werden. Zu lange Haltezeiten bewirken grössere Massänderungen und Kornvergrößerungen. Zu kurze Haltezeiten dagegen genügen nicht, um alle Karbide in Lösung zu bringen, was nach dem Abschrecken niedrigere Härte zur Folge hat.

Man kennt in der heutigen Praxis verschiedene Verfahrenstechniken. Das Härten erfolgt in elektrisch- oder gasbeheizten Ofenanlagen. Eine weitere Möglichkeit sind Salzbäder.

Die chemische Zusammensetzung des Stahles darf durch das Härten nicht verändert werden. Man sagt, der Stahl muss neutral gehärtet werden. Dies wird durch die Anwendung von Schutzgasen bzw. durch Evakuieren des Ofenraumes (Vakuumanlagen) gewährleistet. Es ist wichtig, dass das Kohlenstoffpotential der Schutzgase bzw. Salzbäder dem Kohlenstoffpotential des zu härtenden Werkstückes angepasst wird, so dass keine Kohlenstoffübertragung, weder vom Werkstück an die Umgebung noch umgekehrt, stattfindet.

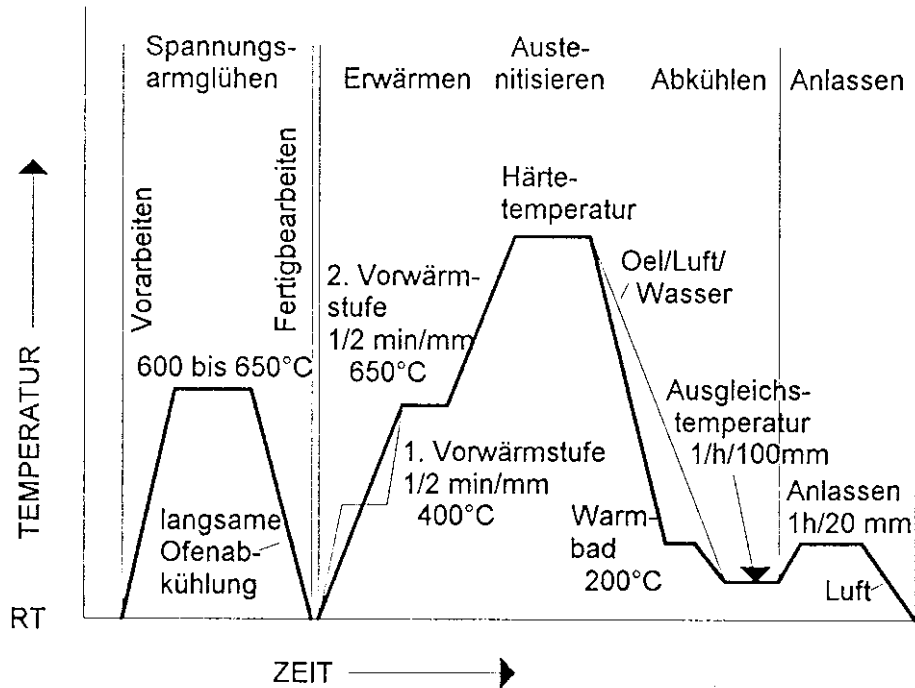
Nach dem richtigen Erwärmen und ausreichenden Halten auf Härtetemperatur werden Werkstücke abgeschreckt. Das Abschrecken erfolgt in Wasser, Öl oder Luft bzw. Gasen (N₂, Ar beim Vakuumhärten), wobei je nach Stahlsorte das bestgeeignete Abschreckmittel gewählt werden muss.

Die Abschreckintensität steigt bei den verschiedenen Abschreckmitteln in folgender Reihenfolge:



Eine weitere Möglichkeit ist Abschrecken im Warmbad. Bei dieser Art werden die Werkstücke in einem Salzbad abgeschreckt, dessen Temperatur knapp über dem Martensitpunkt liegt. Auf dieser Temperatur wird das Werkstück so lange gehalten, bis es dessen Temperatur angenommen hat. Anschliessend kann an der Luft weiter abgekühlt werden, wobei erst jetzt die Martensitbildung erfolgt.

Bild 24: Temperaturverlauf beim Härten



Folgende Stufen werden bei einem Härtevorgang durchlaufen:

1. Erwärmen auf Härtetemperatur
2. Halten auf Härtetemperatur (Austenitisieren)
3. Abkühlen (Öl, Luft oder Wasser)
4. Anlassen auf entsprechende Härte

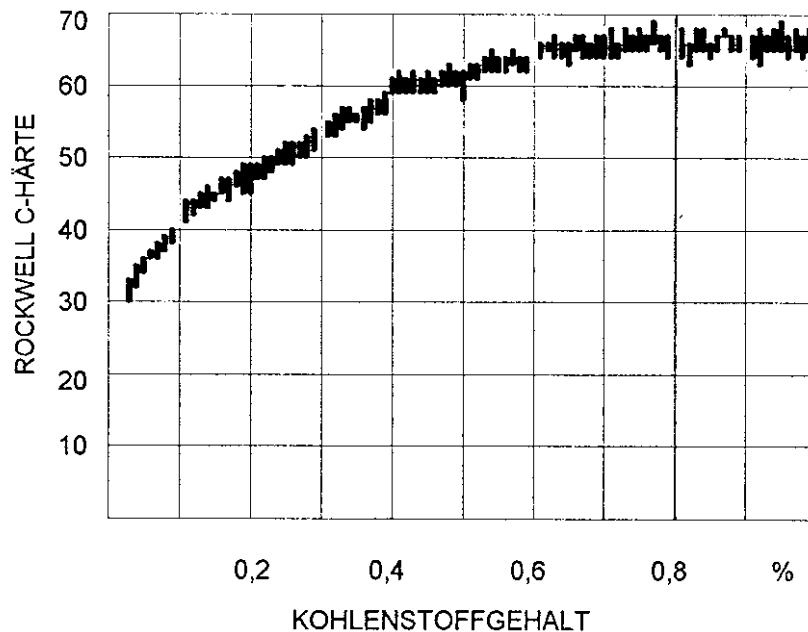
Entsprechend des vorliegenden Stahles können für den Abkühlvorgang folgende Abschreckmedien zur Anwendung gelangen:

Stahlgruppe	Abschreckmedium
Unlegierte Stähle (z.B.: Ck 15)	Wasser
Niedrig legierte und legierte Stähle (z.B.: 16 MnCr 5)	Öl
Hochlegierte Stähle	Luft

Besonders zu beachten:

- Um eine ausreichende Karbidmenge aufzulösen ist meist eine hohe Härtetemperatur gefordert.
- Desto schneller die Abkühlung, desto grösser der Verzug!

Bild 25: Abhängigkeit der Härte vom Kohlenstoffgehalt



Hinsichtlich der Abhängigkeit der Härte vom Kohlenstoffgehalt können noch folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- Ein Kohlenstoffanteil von ca. 0,8 % reicht in der Regel völlig aus – es wird die gleiche Härte erzielt wie bei einem Stahl mit ca. 1,5% Kohlenstoffanteil.
- Ab einem Kohlenstoffgehalt von 0,65 % nimmt die Härte durch zunehmenden Restaustenitanteil wieder ab.

Beim Abschrecken bildet sich eine Aussenschicht von Martensit, während sich in der Mitte des Werkstückes (Kern) das Gefüge noch im Zustand des Austenits befindet. Die Umwandlung des Kern-Austenits erfolgt später und wird von einer Volumenvergrößerung begleitet. Dies führt zu beträchtlichen Spannungen in der martensitischen Randschicht. Verzug und Riskeime sind die Folge.

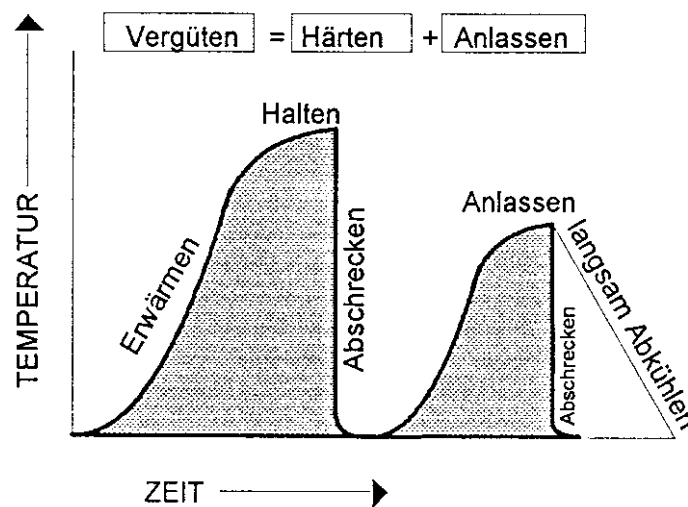
Beim Warmbadhärten beginnt die Umwandlung beim Abkühlen erst, wenn das ganze Werkstück bereits die Temperatur des Martensitpunktes angenommen hat. Die Umwandlung vollzieht sich fast gleichzeitig am Rand und im Kern. Die Umwandlungsgeschwindigkeit in dieser Temperaturzone ist verhältnismässig gering. Die Spannungen werden fast völlig ausgeschaltet, was sich durch geringen Verzug auswirkt. Beim Härten ist es durchaus möglich, dass nicht aller Austenit beim Abkühlen in Martensit umgewandelt wird. Dieser Anteil heisst Restaustenit. Er ist unerwünscht, da er weich ist und die erforderliche Härte des Gefüges nicht erreicht wird. Ferner ist Restaustenit instabil und hat die Tendenz, sich später in Martensit umzuwandeln. Die Masshaltigkeit eines Werkstückes ist dadurch in Frage gestellt. Martensit hat bis zu 1 % grösseres Volumen als Austenit. Eine Volumenzunahme durch die Umwandlung Restaustenit in Martensit bedeutet den Aufbau von Druckspannungen. Das Härten von Werkzeugstählen erfordert ganz besondere Sorgfalt. Dies betrifft insbesondere das Härten von Kaltarbeits-, Warmarbeits- und Schnellarbeitsstählen bzw. Werkzeugstählen. Solche Stähle werden in heutiger Zeit meistens in Vakuumanlagen gehärtet. Der wesentliche Unterschied zwischen Vakuumhärten und anderen Härteverfahren liegt in der Evakuierung der Heizkammer während des Aufheizens und Haltens auf Härtetemperatur. Anschliessend wird die zu härtende Charge mit neutralem Gas (meistens Stickstoff) abgeschreckt. Die Evakuierung jeglicher aktiven Gase erzeugt auf einfache Weise

absolut neutrale Bedingungen und verhindert das Auftreten von Oberflächenreaktionen wie Oxydation, Entkohlung, Aufkohlung und Aufstickung. Der Stahl wird neutral gehärtet. Hauptvorteile des Vakuumhärtens sind: eine saubere Oberfläche, kleine Massänderungen und geringer Verzug. Das Härten von Werkzeugstählen ist heute ohne Vakuumanlagen undenkbar .

1.1.3 Vergüten

Unter Vergüten versteht man Härten mit nachfolgendem Anlassen bei meist höheren Temperaturen (Bild 26). Man erzielt dadurch eine hohe Zähigkeit bei bestimmter Zugfestigkeit. Eine Vergütung bewirkt die Erhöhung der Zugfestigkeit, der Streckgrenze, der Einschnürung und der Kerbschlagzähigkeit gegenüber dem normal geglühten Zustand.

Bild 26: Temperaturverlauf beim Vergüten



Viele Stähle werden von den Stahlwerken in Form von Walz- oder Schmiedestücken in vergütetem Zustand geliefert. In der Regel liegen die Zugfestigkeitswerte je nach Querschnitt bei etwa 700 bis 1000 N/mm². Eine spanende Verarbeitung ist noch ohne grössere Schwierigkeiten möglich. Ein Nachteil der Werksvergütung liegt darin, dass nicht immer optimale Gefügegenmässigkeit zu erzielen ist, da in der Regel verhältnismässig grosse Chargen in entsprechenden Ofenanlagen und Abschreckbädern gleichzeitig behandelt werden. Bei der Stückvergütung kann das Härtegut besser voneinander distanziert werden (lockere Chargierung). Damit ist eine gleichmässige Erwärmung und Abschreckung möglich. Die Kosten bei der Stückvergütung liegen wesentlich höher als beim werksvergüteten Stahl.

1.1.4 Anlassen

Nach DIN 17014:

Erwärmen nach vorausgegangenem Härten, Kaltverformen oder Schweißen auf eine Temperatur zwischen Raumtemperatur und unterem Umwandlungspunkt Ac1 (Bild 20) und Halten bei dieser Temperatur, mit nachfolgendem, zweckentsprechendem Abkühlen.

Nach dem Härten liegt ein stark verspanntes Gitter vor. Diese Tatsache bringt die Härte des Stahles. Wird Martensit nun erwärmt, erreichen die in Zwangslösung gehaltenen Kohlenstoffatome wieder eine gewisse Beweglichkeit. Ein Teil kann sich ausscheiden und beginnt feinverteilte Karbide zu bilden. Ab etwa 100°C bildet sich zuerst Fe₂C, das sogenannte ε-Karbid. Die

Verspannung des Gitters wird etwas geringer, die Härte nimmt ab.

Über 250°C geht das ϵ -Karbonid langsam in Fe₃C-Zementit über und mit steigender Temperatur koagulieren die Fe₃C-Ausscheidungen. Die Härte sinkt, die Zähigkeit steigt an. Zudem verändert sich bei unlegierten und niedriglegierten Stählen ab etwa 230°C der Restaustenit, welcher bei Wiederabkühlung zu Martensit umgewandelt wird.

Bei hochlegierten Stählen (Kalt-, Warm- und Schnellarbeitsstahl) zerfällt der Restaustenit erst oberhalb 500°C. Bei solchen Stählen kann durch Anlassen bei geeigneter Temperatur eine Härtesteigerung erreicht werden.

Normalerweise bringt das Anlassen ein Absinken der Härte und eine Steigerung der Zähigkeit. Es sind aber zwei Temperaturbereiche bekannt, bei denen auch die Zähigkeit abfällt. Die Blauversprödung im Bereich von ca. 250 bis 300°C und bei chrom-, nickel- und manganlegierten Stählen, mit einer Anlassversprödung zwischen 450 und 550°C. Durch Zugabe von Molybdän und Absenken des Phosphorgehaltes unter 0,01% kann die Anlasssprödigkeit gemildert oder sogar unterdrückt werden.

Bei Anlassvorgängen spielt nicht nur die Temperatur eine wichtige Rolle, sondern auch die Zeit. Es muss eine minimale Haltedauer eingehalten werden. In den meisten Anlassdiagrammen ist deshalb immer die Anlassdauer als Parameter aufgeführt.

Durch Anlassen bewirkte Eigenschafts-Änderungen:

- Änderung der Härte und Festigkeit
- Zunahme des Formänderungsvermögens
- Abnahme der Eigenspannungen
- Abnahme der Rissgefahr
- Abnahme der Restaustenitmenge
- Änderung der Masse und evtl. der Form

Besonders zu beachten:

- Um eine Blausprödigkeit zu vermeiden sollte lieber eine höhere Härte verlangt werden damit die Anlasstemperatur unter 200° C zu liegen kommt!
- Tritt beim Anlassen eine Volumenabnahme auf, so war das Gefüge Restaustenitfrei.
- Tritt beim Anlassen eine Volumenzunahme auf, so war das Gefüge Restaustenithaltig.

1.1.5 Tiefkühlen

Beim Abkühlen von der Härtetemperatur beginnt die Austenit/Martensitumwandlung beim sogenannten Martensitpunkt Ms. Die Martensitumwandlung ist im wesentlichen kein isothermischer Vorgang, d.h. sie schreitet praktisch nur mit sinkender Temperatur fort. Bei den meisten Stählen ist die Martensitbildung bei Raumtemperatur noch nicht beendet, es sind also noch gewisse Mengen Restaustenit vorhanden. Wenn nun dieser Restaustenit auch noch zur Umwandlung gebracht werden soll, muss die Temperatur gesenkt werden.

Eine möglichst 100%ige Austenitzersetzung kann aus verschiedenen Gründen von Bedeutung sein. Bei Präzisionsteilen, Messinstrumenten und Lehren ist es wichtig, dass im Laufe der Zeit keine Massveränderungen eintreten. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn das Gefüge vollständig stabilisiert ist. Bei gewissen Stahlsorten, insbesondere bei hoch Cr-legierten Stählen spielt sich die Austenit-Martensit-Umwandlung sehr träge ab, so dass bei Raumtemperatur noch

beträchtliche Mengen Restaustenit vorliegen. In diesen Fällen kann eine weitere Umwandlung, bzw. eine Gefügestabilisierung nur durch eine Tieftemperaturbehandlung erreicht werden.

Um erfolgreich zu sein, muss das Tiefkühlen unmittelbar nach dem Abschrecken erfolgen, weil sich sonst der Austenit stabilisiert. Eine Behandlung bei -85°C würde ausreichen. Es ist jedoch üblich, Kühlmittel, wie flüssiger Stickstoff oder flüssige Luft, bei Minustemperaturen von ca. 180°C zu verwenden. Es ist nicht nötig, das Werkstück auf dieser Temperatur zu halten, weil sich die Umwandlung während des Abkühlens vollzieht.

Die besten Erfolge erzielt man bei Stahl mit 12% Cr. Unlegierte und niedriglegierte Werkzeugstähle ergeben nur unwesentliche Verbesserungen. Ebenso ist bei richtig gehärteten und zweimal angelassenen Schnellstählen nur eine bescheidene Härte- und Leistungssteigerung möglich. Eine Erhöhung der Härte und Verschleissfestigkeit kann dagegen bei legierten Einsatzstählen, die stark zu Restaustenit in der Einsatzschicht neigen, festgestellt werden.

Durch Tiefkühlen wird oft auch die Neigung zur Bildung von Schleifrisen wesentlich herabgesetzt. Um die Massveränderung im Zusammenhang mit dem Restaustenit besser zu verstehen, sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Umwandlung von Austenit in Martensit von einer Volumenvergrößerung begleitet wird.

Besonders zu beachten:

- Um Schleifrisse zu vermeiden, muss spätestens 6 Std. nach dem Härten ein Tiefkühlen durchgeführt werden!
- Tiefkühlen hält auf lange Zeit die Masshaltigkeit der Teile.
- Bei genaueren Teilen ist ein Tiefkühlen immer zu empfehlen.

1.2 DIE RANDZONE BEEINFLUSSENDE VERFAHREN

Die optimale Gebrauchsfähigkeit technischer Erzeugnisse wird beim derzeitigen Stand der Technik nicht mehr allein durch den gewählten Werkstoff in der richtigen Dimension, sondern erst durch eine entsprechende Wärmebehandlung der Bauteile gewährleistet.

Die unterschiedlichen, oft wechselseitig wirkenden Beanspruchungsarten, die die Lebensdauer eines Werkstückes beeinflussen, stehen in engem Zusammenhang mit den durch die Wärmebehandlung beeinflussbaren Eigenschaften von Stahl.

Liegt die Beanspruchung eines Bauteils in Form einer Dauerbiegung als Verschleiss der Oberfläche oder auch in Form von Korrosion vor, so wird vor allem von der Randschicht ein entsprechendes Widerstandsverhalten erwartet.

Um die Eigenschaften der Randschicht zu beeinflussen, bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten (Beschichtungen ausgenommen) an:

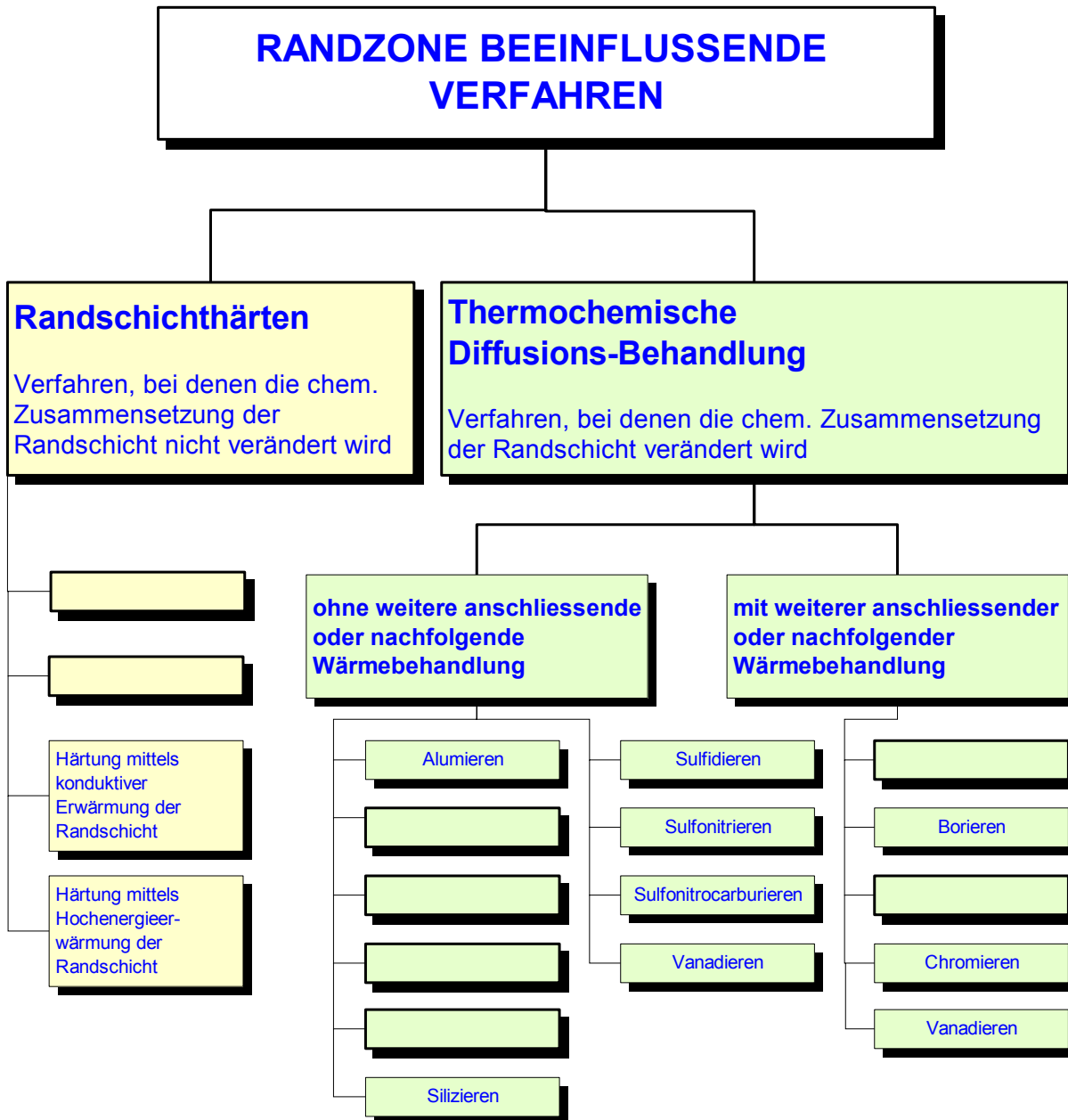
1. Veränderung der Eigenschaften der Randschicht ohne Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung.
2. Veränderung der Eigenschaften der Randschicht durch Änderung der chemischen Zusammensetzung.

Möglichkeit 1 führt, wenn man von einer Durchhärtung von Bauteilen absieht, zu einer Aufhärtung der Randschicht, z.B. durch Flamm- oder Induktionshärten.

Möglichkeit 2 kann mit einer Reihe von Verfahren durchgeführt werden, die unter dem Begriff thermochemische Diffusionsbehandlung zusammengefasst werden.

Bild 27 zeigt eine schematische Aufgliederung aller Verfahren, die die Randzone beeinflussen. Wir beschäftigen uns lediglich mit den im Schema fett eingerahmten.

Bild 27: Aufgliederung der Randzone beeinflussenden Verfahren



1.2.1 Einsatzhärten

Allgemeines

Die Gebrauchseigenschaften eines einsatzgehärteten Werkstückes werden bestimmt durch die Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit des niedrig gekohlten, zähen Kerns und durch die Oberflächenhärte und Einhärtungstiefe (Eht) der aufgekohlten, sehr harten Randzone. Neben der hohen Verschleissfestigkeit wird durch die Bildung eines stützenden Eigenspannungssystems in der Oberfläche auch eine wesentliche Steigerung der Dauerfestigkeit erreicht.

Die Einhärtungstiefe muss je nach Werkstückform, Funktion und Bearbeitung von Fall zu Fall festgelegt werden.

Einhärtungstiefe (Eht)

Die Einhärtungstiefe ist der senkrechte Abstand, gemessen in mm von der Oberfläche bis zu dem Punkt in der Randschicht, an dem die Vickershärte 550 HV1 vorhanden ist.

Auf den Zeichnungen sind vorzugsweise nur die nachfolgenden Eht-Werte zu verwenden. Sie gelten an fertigen Werkstücken. Im Fertigungsplan ist bei der Angabe der Aufkohlungsschichtdicke die Bearbeitungszugabe zu berücksichtigen.

Werkstoffdicke in mm		Einhärtungstiefe (Eht) in mm		
		Richtwerte für		Max. zulässiger Bereich ¹⁾
Über	Bis	Normale Beanspruchung	Hohe und/oder Verschleissbeanspruchung	
0,40	0,60			0,05...0,08 ²⁾
0,60	1,00			0,07...0,12 ²⁾
1,00	1,60	0,10...0,20	0,10...0,20	0,10...0,20
1,60	2,50			0,15...0,30
2,50	4,00	0,15...0,30	0,30...0,50	0,30...0,50
4,00	8,00			0,50...0,80
8,00	16,00	0,30...0,50	0,80...1,20	0,80...1,20
16,00	32,00			1,20...1,80
32,00	65,00	0,50...0,80	1,60...2,40	1,60...2,40
65,00				2,00...3,00

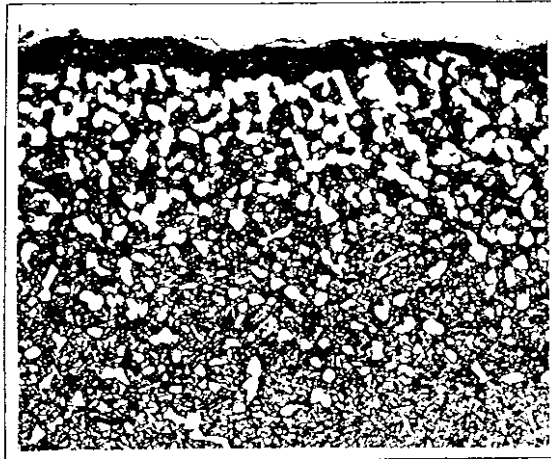
1) Um ein Durchhärten der Werkstücke zu vermeiden, dürfen bis zu einer Werkstoffdicke von 8 mm die max. zulässigen Einhärtungstiefen nicht überschritten werden.

2) Für diese Einhärtungstiefen ist das Aufkohlen nach den üblichen Verfahren nicht geeignet. Anwendbar ist z.B. das Karbonitrieren.

Unter dem thermochemischen Diffusionsverfahren nimmt das Einsatzhärten eine wichtige Stellung ein. Vor dem eigentlichen Härten wird die Oberfläche des Werkstückes mit Kohlenstoff angereichert. Dies geschieht, indem das Behandlungsgut in kohlenstoffabgebenden Mitteln auf Austenitisierungstemperatur erwärmt und dort mehr oder weniger lang gehalten wird. Es handelt sich bei diesem Aufkohlungsvorgang um eine Kohlenstoffdiffusion. Damit ist leicht einzusehen, dass die Aufkohlungstiefe eine Funktion der Temperatur und der Zeit ist. Als Aufkohlungsmittel kommen Pulver oder Granulate, Salzschnmelzen und Gase in Frage.

Das Einwandern des Kohlenstoffes wird so gesteuert, dass die Randschicht in der Regel eutektoide Zusammensetzung aufweist ($C=0,8\%$). Wird überkohlt ($C>0,8\%$), scheidet an den Korngrenzen Fe_3C aus. Wir erhalten Korngrenzenzementit (Bild 28), was eine starke Versprödung zur Folge hat. Nach dem Aufkohlen werden die Werkstücke gehärtet. Dies kann durch direkte Abschreckung aus der Aufkohlungstemperatur erfolgen (Direkthärten). Je nach Anforderungen an die Werkstückeigenschaften sind jedoch auch andere Verfahren möglich.

Bild 28: Korngrenzenzementit



Beim Aufkohlen wird das Kerngefüge in seiner chemischen Zusammensetzung nicht verändert. Bei längeren Haltezeiten auf Aufkohlungstemperatur tritt eine Kornvergrößerung ein. Beim Direkthärten wird im allgemeinen vor dem Abschrecken auf die Randhärtemperatur abgesenkt (Bild 29). Damit wird ein überhitztes Härten des C-reicheren Randgefüges vermieden.

Beim sogenannten Einfachhärten wird nach dem Aufkohlen langsam auf Raumtemperatur abgekühlt. Notfalls können noch Zwischenbearbeitungen durchgeführt werden, z. B. partielles Bearbeiten der Einsatzschicht. Danach wird wieder austenitisiert, entweder auf Kernhärtemperatur oder auf Randhärtemperatur und anschliessend abgeschreckt.

Beim Kernhärten ist der Rand überhitzt gehärtet, der Martensit ist grobnadelig und es muss mit einem grösseren Restaustenitgehalt gerechnet werden. Das Randhärten ergibt ein optimales Randgefüge. Im Kerngefüge ist jedoch neben Martensit noch Restferrit vorhanden.

Eine weitere Möglichkeit bietet das Doppelhärten. Hier schliesst man nach dem Kernhärten (meistens ein Direkthärten) ein zweites Härten mit Randtemperatur an. Das Randgefüge ist hier optimal. Das Kerngefüge erfährt eine Rückverfeinerung, enthält aber noch etwas Restferrit.

Beim Stufenhärten wird nach dem Aufkohlen im Warmbad (bei ca. $650^{\circ}C$) isotherm in der Perlitstufe abgekühlt (Bild 29). Anschliessend erfolgt ein Härten von Randhärtemperatur. Dieses Verfahren ergibt eine sehr feinkörnige Gefügestruktur. Anschliessend an alle Härteverfahren wird zwischen 150 und $200^{\circ}C$ angelassen.

Einsatzgehärtete Werkstücke besitzen eine harte Randschicht und einen wesentlich weicheren, zähen Kern. Die Oberflächenhärte liegt in der Regel bei 60 bis 64 HRc. Die Einsatzhärtungstiefe (Eht) kann durch Wahl der Aufkohlungstiefe in relativ grossen Grenzen variiert werden. Die

Kernhärte resultiert aus der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffes und den Härtebedingungen.

Nebst der Erhöhung der Verschleissfestigkeit wird durch das Einsatzhärten auch die Dauerschwingfestigkeit verbessert.

Gasaufkohlen:

In heutiger Zeit ist Gasaufkohlen stark vertreten. Es gibt verschiedene Verfahren zur Erzeugung der geeigneten Ofenatmosphäre. Einerseits verwendet man ein Trägergas, welchem Kohlungsgase wie z.B. Methan, Propan oder ähnliche beigefügt werden. Andererseits ist auch ein Gasaufkohlen ohne Trägergas möglich. Bei den sogenannten Eintropfverfahren werden organische Flüssigkeiten und deren Gemische direkt in den chargierten und auf Aufkohlungstemperatur beheizten Ofenraum eingetropf. Diese Flüssigkeiten verdampfen und werden in der Ofenhitze gespalten. Beim Spaltvorgang entstehen diffusionsfähige Kohlungsprodukte. Es stehen heute moderne Anlagen mit Steuer- und Regelgeräten zur Verfügung, welche erlauben, gezielte Ofenatmosphären zu garantieren, damit einwandfreie Einsatzschichten resultieren. Mit dem Gasaufkohlen ist eine saubere, umweltfreundliche Arbeitsweise gegeben.

Salzbadaufkohlen:

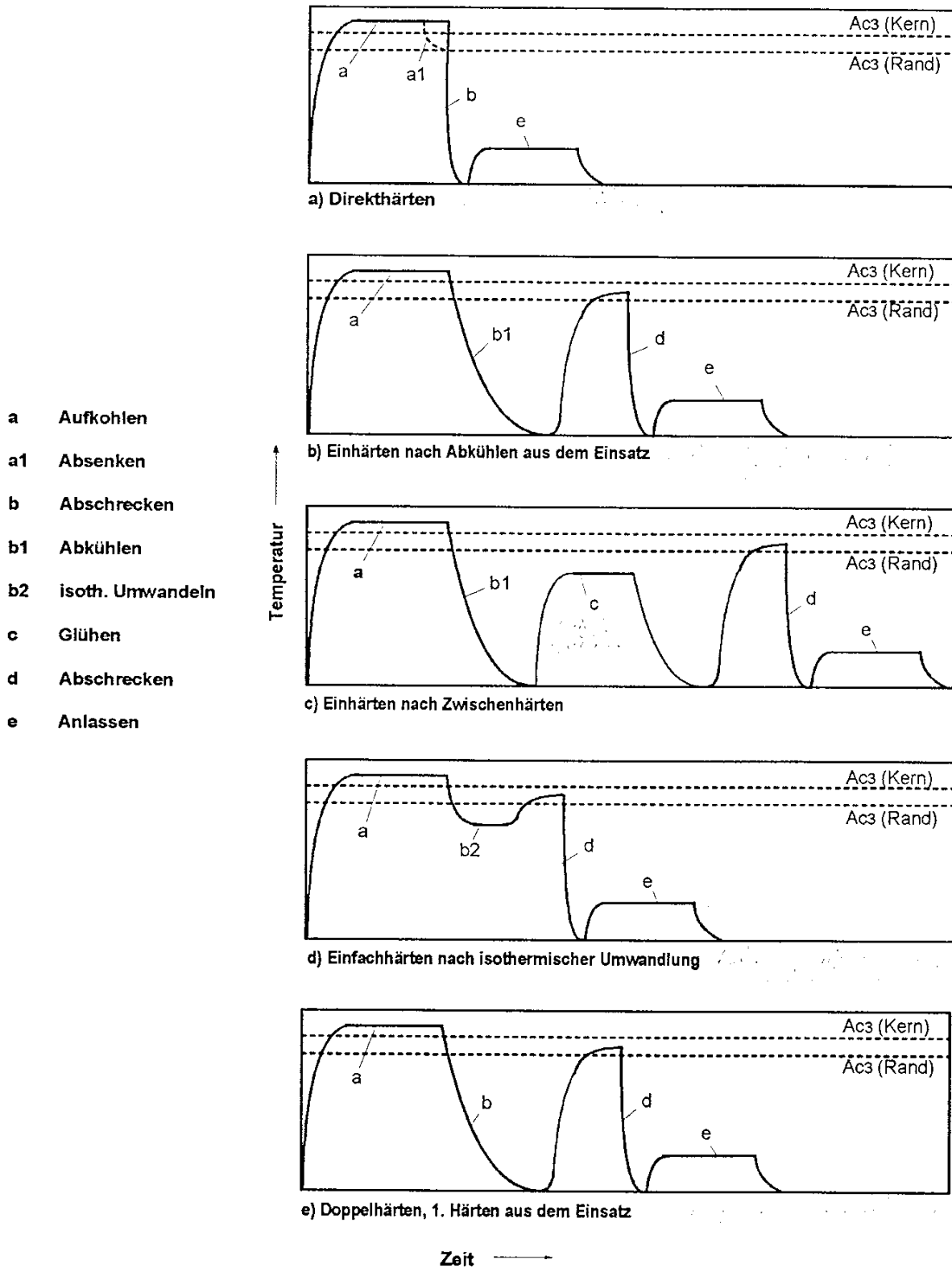
Beim Salzbadaufkohlen werden die Werkstücke in Salzschnmelzen getaucht. Als Kohlenstoffträger dienen Cyanide. Diese Salze sind giftig und enthalten auch Stickstoff.

Die Vorteile des Salzbadaufkohlens liegen hauptsächlich in der wesentlich kürzeren Aufkohlungszeit gegenüber anderen Verfahrenstechniken. Die Erwärmungsdauer ist sehr kurz. Die beste Wirtschaftlichkeit ist bei Werkstücken mit kleineren Abmessungen und Aufkohlungstiefen bis 1 mm gegeben. Ein wesentlicher Nachteil ist die Giftigkeit der Salze und die damit verbundene Umweltbelastung. Deshalb wird Salzbadaufkohlen in der neuesten Zeit durch Gasaufkohlen ersetzt.

Aufkohlen im Pulver oder Granulat:

Hier werden die Werkstücke in hitzebeständigen Blechbehältern in spezielle Kohlungspulver oder Granulate eingebettet. Die dicht gepackten Kisten sollen möglichst luftdicht verschlossen in den Ofen gebracht werden. Die Aufkohlungstemperaturen liegen zwischen 880 und 950°C. Das stündliche Wachstum der Einsatzschicht liegt im Mittel bei ca. 0,1 bis 0,15 mm. Um gleichmässige und nicht überkohlte Randschichten zu erreichen, muss die Erwärmung im Temperaturbereich zwischen 750 und 850°C möglichst schnell erfolgen. Die Kisten sollten deshalb nicht zu gross gewählt werden und die Ofen müssen genügend Leistung haben.

Bild 29: Verfahrensabläufe für das Härten aufgekühlter Teile



Besonders zu beachten:

- Bei sehr hohen Punktpressungen und sehr hohen Eigenschwingungsverhalten ist Einsatzhärten einem Gasnitrieren vorzuziehen.
- Erhöhte Kantenrissgefahr beim Einsatzhärten gegenüber Gasnitrieren.

Siehe auch „Besonders zu beachten“ unter dem Kapitel „Gasnitrieren“!

1.2.2 Das Karbonitrieren

Wie der Name sagt, stellt dieses Verfahren eine Kombination der Gasaufkohlungsmethode mit einem abgeänderten Nitrierverfahren dar. Das Karbonitrieren ist eine besondere Art des Einsatzhärtens. Es wird meist bei geringen bis mittleren Einhärtungstiefen angewandt. Nebst Kohlenstoff wird gleichzeitig Stickstoff in die Randschicht eindiffundiert. Stickstoff wirkt bei diesem Verfahren meist als Legierungselement in den Randbereichen. Durch die Verbesserung der Randhärbarkeit können z.B. billigere Stähle verwendet werden. Es ist daher möglich, mit unlegiertem Stahl beim Ölhärten die volle Härte zu erzielen.

Die beste Steuerung des Verfahrens ist in den Gasaufkohlungsanlagen möglich. Der Gaszusammensetzung, wie sie beim Gasaufkohlen üblich ist, wird noch ca. 5% Ammoniak (NH₃) beigemischt.

Im Prinzip ist das Karbonitrieren eher mit dem Aufkohlen als mit dem Nitrieren vergleichbar, weil die Behandlungstemperatur im Bereich des Aufkohlens liegt. Nach dem Karbonitrieren ist auch in der Regel ein Abschrecken erforderlich. Zum Karbonitrieren werden meistens Temperaturen zwischen 700 und 900°C angewendet. Der überwiegende Teil der Karbonitrierarbeiten wird im Temperaturbereich von 780 bis 850°C durchgeführt. Im allgemeinen liegt der Bereich der erzeugten Karbonitriertiefen zwischen 0,06 und 0,6 mm Tiefe, wobei die Behandlungsdauer, wie beim Gasaufkohlen, auch temperaturabhängig ist. Dank der niedrigen Temperatur der Austenit-Ferrit-Umwandlung können die Werkstücke zum Härten bei tieferen Temperaturen abgeschreckt werden, was einen kleineren Härteverzug verursacht.

Bei den Werkstoffen, die karbonitriert werden, handelt es sich meistens um unlegierte oder niedrig legierte Stähle. Ebenso lassen sich Automaten- und Tiefziehstähle auf diese Weise gut behandeln. Infolge des höheren Mangangehaltes besteht jedoch bei diesen Stählen die Gefahr der Bildung von Restaustenit.

Der Reibverschleisswiderstand und die Notlaufeigenschaften der stickstoffreichen Randschicht ist besser und die Anlassbeständigkeit grösser. Es ist üblich karbonitrierte Teile nach dem Abschrecken anzulassen. Je höher der Stickstoffgehalt der Einsatzschicht ist, um so höher kann die Anlasstemperatur gewählt werden.

Das Zwischenglühen

Das Zwischenglühen wird angewendet, wenn an den aufgekohlten Werkstücken eine spanabhebende Bearbeitung ausgeführt werden muss. Durch das relativ schnelle Abkühlen aus der Einsatztemperatur erreichen die Werkstücke eine Härte, welche für die Zerspanung zu hoch ist.

Die Werkstücke müssen also gegläht werden. Dieses Zwischenglühen ist mit einem Weichglühen vergleichbar, mit dem Unterschied, dass die Glühtemperatur etwas tiefer als AC1 gewählt wird (ca. 650°C). Nach einer Haltezeit von 2 bis 3 Stunden erfolgt eine Abkühlung im Ofen bis 400°C. Cr-Ni-Stähle lassen sich bei einer Festigkeit von ca. 800 bis 900 N/mm² am besten zerspanen.

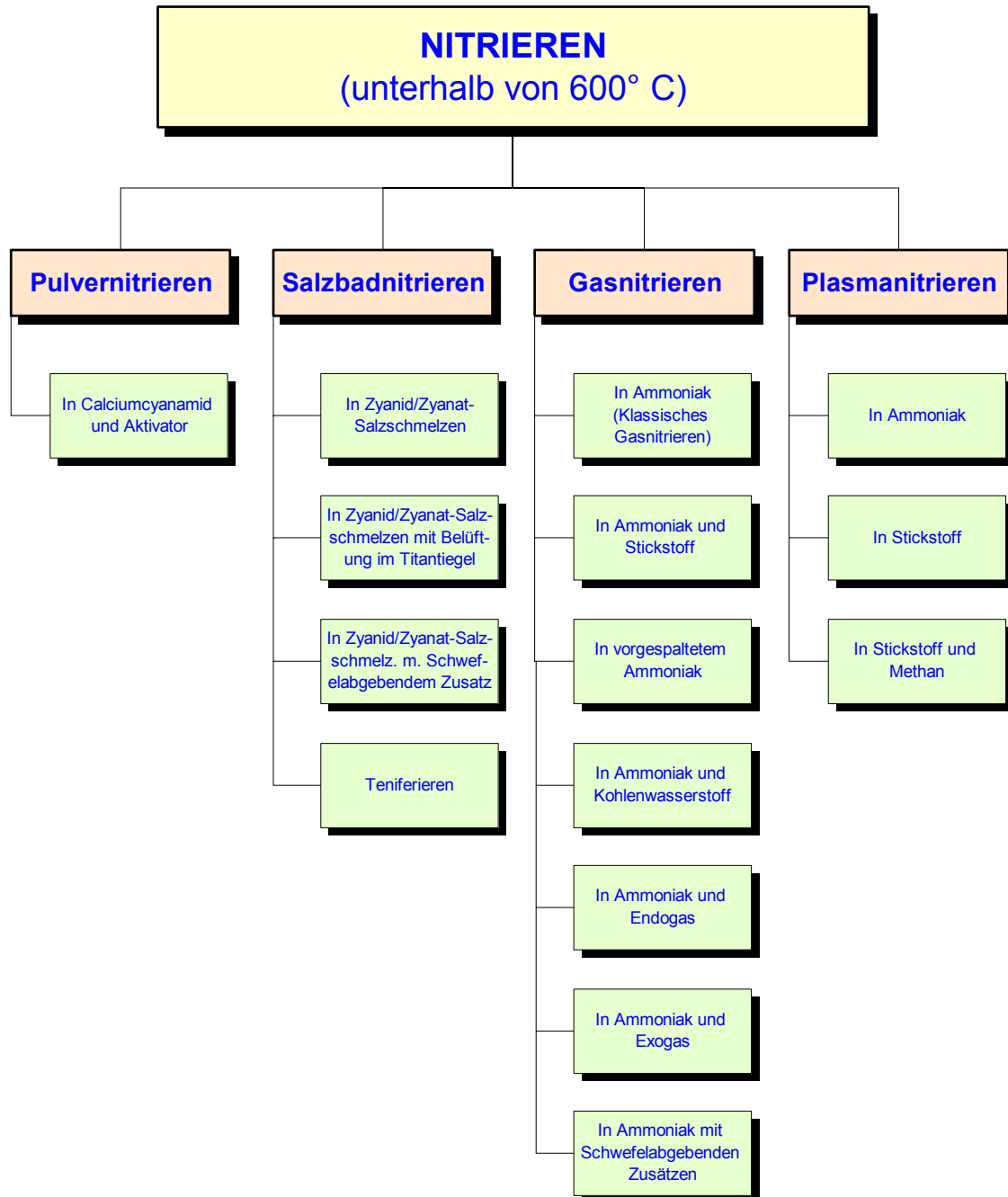
Würden die aufgekohlten Werkstücke bei Ac1 weichgeglüht, dann ergäbe sich eine Festigkeit von ca. 600N/mm², was für die mechanische Bearbeitung ungünstig ist. Bei der Glüh Temperatur von nur 650°C wird die gewünschte Festigkeit von ca. 800 N/mm² erreicht.

Beim Zwischenglühen wird neben dem Abbau von Spannungen auch eine Gefügeverfeinerung erreicht.

1.2.3 Das Nitrieren

Eine weitere Möglichkeit einer thermochemischen Diffusionsbehandlung ist die Eindiffusion von Stickstoff durch Nitrieren. Beim Nitrieren von Eisenwerkstoffen wird atomarer Stickstoff aus festen, flüssigen oder gasförmigen Medien bei Temperaturen von 480 bis 590°C abgespalten und diffundiert, je nach Aufnahmefähigkeit der Oberfläche und Stickstoffangebot. Es sei hier noch erwähnt, dass altgewohnte Bezeichnungen wie "Nitrierhärten" und "Weichnitrieren" nicht mehr gebraucht werden sollten, da sie nicht eindeutig sind. In der praktischen Verfahrensdurchführung unterscheidet man grundsätzlich zwischen dem Gas-, Plasma- und Salzbadnitrieren. Vereinzelt wird auch noch Pulvernitrieren durchgeführt. Als Abwandlungen sind noch Sulfonitrieren und Nicotrieren entstanden (Bild 30).

Bild 30: Übersicht über die Nitrierverfahren



Beim Einsatzhärten wird die Randzone mit Kohlenstoff angereichert, so dass sie beim nachfolgenden Härten durch Martensitbildung ihre Eigenschaft verändert. An Stelle von Kohlenstoff diffundiert beim Nitrieren Stickstoff in die Oberfläche der Werkstücke ein. Stickstoff bildet mit Eisen bzw. mit den Legierungselementen verschleissfeste und zum Teil auch harte Verbindungen, die als Nitride bezeichnet werden. Die Werkstücke werden zur Bildung der Nitrierschicht in einem stickstoffabgebenden Medium bei ca. 500°C wärmebehandelt. Da beim Nitrieren keine thermische Umwandlung im Gefüge eintritt, können Werkstücke vergütet und fertig bearbeitet dieser Behandlung unterzogen werden.

Der in der Randzone eindiffundierte Stickstoff bildet eine Nitrierschicht, welche aus zwei voneinander grundsätzlich verschiedenen Zonen besteht (Bild 31). Die äussere Zone, die sogenannte Verbindungsschicht, besteht zur Hauptsache aus Eisennitriden. Diese Schicht erscheint im geätzten Schliff als weisse, strukturlose Zone und wird deshalb auch oft als "weisse

Schicht" bezeichnet. Die Dicke der Verbindungsschicht ist abhängig vom Werkstoff und der Behandlungsart. Sie beträgt in der Regel bis zu 0,03 mm.

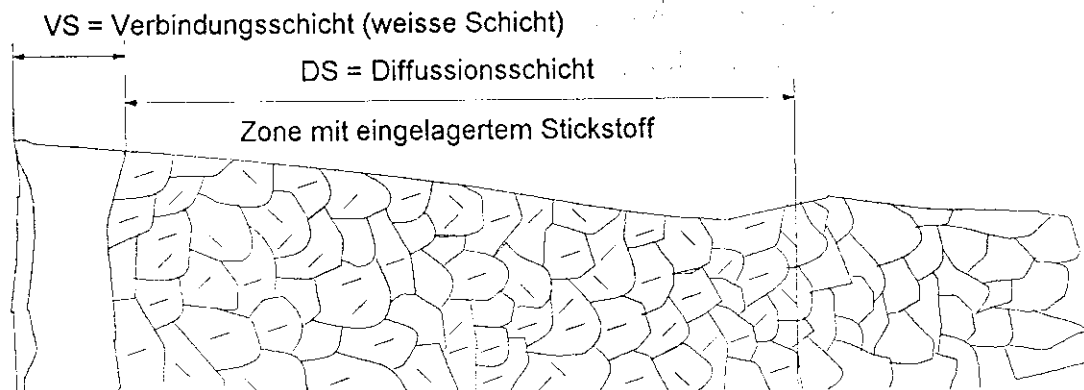


Bild 31: Nitrierschicht

Den nachfolgenden Teil der Nitrierschicht nennt man Diffusionszone. Sie kann bis zu 0,7 mm dick sein. Bei rascher Abkühlung nach dem Nitrieren ist der Stickstoff in der Matrix (Grundgefüge) gelöst. Wird langsam abgekühlt, wird Stickstoff als Eisennitrid ausgeschieden. Er kann sich auch an vorhandene Karbide anlagern (Karbonitride) und besonders bei legierten Stählen Sondernitride ausscheiden.

Die Verbindungsschicht ist sehr hart, aber entsprechend spröde und schlagempfindlich. Die Härte der Diffusionszone ist um so grösser, je mehr nitridbildende Legierungselemente wie Cr, Al, Mo und V im Stahl vorhanden sind. Mit zunehmender Tiefe fällt die Härte relativ steil ab.

Durch das Nitrieren wird besonders in der Randzone der Verbindungsschicht die Verschleissfestigkeit auf sehr hohe Werte gebracht. Durch die besondere Struktur dieser Schicht werden nebst der hohen Härte auch die Gleiteigenschaften verbessert und die Anfressgefahr verringert. Bei hohen spezifischen Flächenbelastungen ist Vorsicht geboten, da die Nitrierschichten eingedrückt werden können und sich dadurch ablösen. Bei normalen Stählen wird durch das Nitrieren die Korrosionsbeständigkeit erhöht. Nur bei den hochchromhaltigen, korrosionsbeständigen Stählen wird die Beständigkeit etwas abgeschwächt, da der Matrix durch die Bildung von Chromnitriden Chrom entzogen wird. Ein äusserst wichtiger Vorteil des Nitrierens ist die Verbesserung der Dauerschwingfestigkeit. Nitrierte Stähle sind bis ca. 500°C anlassbeständig.

Das Nitriergut soll vor der Fertigbearbeitung spannungsarmgeglüht werden. Normalerweise gelangen die Werkstücke mit Fertigmass zum Nitrieren. Der Verzug ist in der Regel sehr gering.

Die Oberflächen müssen vor dem Nitrieren sauber, rost- und zunderfrei sein. Durch Abdecken mit geeigneten Isoliermitteln können beim Gasnitrieren bestimmte Partien weich gelassen werden.

Besonders zu beachten:

- Ein Nitrieren von aufgekohltem Vergütungsstahl ist nicht möglich!
- Ein Nitrieren von metrischen Gewinde wird nicht empfohlen weil die Flankenspitzen dadurch sehr spröde und somit schlagempfindlich werden!
- Die Härte wird durch die Wahl des Werkstoffes vorgegeben.

Gasnitrieren

Beim Gasnitrieren wird bei Temperaturen um 500°C atomarer Stickstoff abgespalten und in die Stahloberfläche eindiffundiert. Für die Erzeugung dieses atomaren Stickstoffs wird Ammoniak (NH₃) verwendet. Die Diffusion kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden:

- Angebot an atomarem Stickstoff
- Nitriertemperatur
- Chemische Zusammensetzung
- Gefügestand
- Oberflächenbeschaffenheit

Nitrierstähle sind nur vergütet zu verwenden. In diesem Zustand wird eine einwandfreie Ausbildung der Nitrierschicht garantiert. Der Kern erhält dadurch gute Festigkeits- und Zähigkeits-eigenschaften.

Der Werkstückoberfläche muss grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Es dürfen keine Randschichten vorliegen, die entkohlt, oxidiert oder rostig sind. Sie müssen völlig frei von Öl oder Fett sein. Die Oberflächenverfestigungen haben negativen Einfluss auf die Nitrierschichtausbildung. Durch das Nitrieren tritt wenig Verzug auf. Es ist aber ratsam, dass während der Fertigung ein Spannungsarmglühen durchgeführt wird, um Bearbeitungsspannungen vor dem Nitrieren abzubauen. Die Glüh Temperatur muss über der späteren Nitrier- und unter der Anlasstemperatur des vorgängigen Vergütens liegen.

Beim Nitrieren tritt durch die Aufnahme von Stickstoff eine leichte Volumenzunahme auf. Eine Nachbehandlung nitrierter Flächen ist nicht unbedingt notwendig. Es empfiehlt sich jedoch, ein Aufmass von mindestens 0,05 mm stehen zu lassen.

Die Härteprüfung wird mittels Vickersprüfung durchgeführt. Die Belastung sollte 100 N nicht übersteigen, weil sonst die Eindrücke in der dünnen Schicht zu gross sind. Die Abhängigkeit des Schichtwachstums von der Nitrierdauer ist in Bild 32 dargestellt. Beispiele für gasnitrierte Werkstoffe, erreichbare Härte und Verwendung sind in der Tabelle 1 dargestellt.

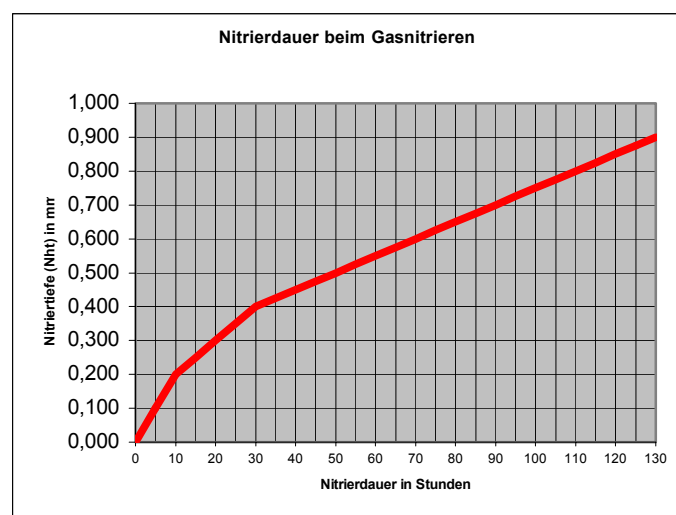


Bild 32: Nitrierdauer beim Gasnitrieren

Gasnitrierte Teile sind

- Schwingungsfester,
- Korrosionsbeständiger,
- Dauerbruchfester und
- Weniger anfällig gegen Passrostbildung

als einsatzgehärtete Teile.

Besonders zu beachten:

- Stähle mit über 12% Cr dürfen nicht gasnitriert werden, sondern sind gegebenenfalls einer Plasmanitrierung zu unterziehen!
- Gasnitrierte Flächen sind als Laufpartner besser geeignet als einsatzgehärtete Flächen. Der Grund dafür sind die Stickstoffatome im gasnitriertem Bereich.
- Gasnitrierte Teile weisen sehr gute Notlaufeigenschaften auf, was bei einsatzgehärteten Teilen nicht der Fall ist.
- Bei sehr hohen Punktpressungen und sehr hohen Eigenschwingungsverhalten ist ein Einsatzhärten vorzuziehen.

Tabelle 1: Beispiele für gasnitrierte Werkstoffe, mögliche Eigenschaftsveränderungen und Anwendungen.

Wst.-Gruppe	Werkstoff-Bezeichnung	Wst.-Nr.	Zugfestigk. im Kern (N/mm ²)	Oberfläch. härte (HV 3*)	Nht n. DIN 50190 Teil 3 (mm)	Verwendungs-Beispiele ***
Vergütungsstähle	Ck 45	1.1191	650 – 750	300 – 400	0,20 – 0,80	e2
	25 CrMo 4	1.7218	750 – 900	600 – 750	0,10 – 0,70	c, e1, f, g
	34 CrMo 4	1.7220	800 – 950	600 – 750	0,10 – 0,60	c, e1, f
	42 CrMo 4	1.7225	850 – 1000	600 – 750	0,10 – 0,60	c, e1, 2, 6, f
	50 CrMo 4	1.7228	850 – 1000	550 – 700	0,10 – 0,70	c, e6, f
	50 CrV 4	1.8159	850 – 1000	600 – 750	0,10 – 0,60	c, f
	34 CrNiMo 6	1.6582	900 – 1200	650 – 800	0,10 – 0,60	c, e5, f
	30 CrNiMo 8	1.6580	900 – 1200	650 – 800	0,10 – 0,60	c, e5, f
	32 CrMo 12	1.7361	900 – 1300	800 – 900	0,10 – 0,80	a, c, e1, 5, 7, f
	30 CrMoV 9	1.7707	900 – 1200	750 – 850	0,10 – 0,80	a, c, e1, 5, 7, f
	14 CrMoV 6 9	1.7735	900 – 1050	800 – 900	0,10 – 1,00	a, c, e1, 2, 5, 6, f
Nitrierstähle	31 CrMo 12	1.8515	900 – 1300	800 – 900	0,10 – 0,80	a, e1, 5, 7, 8
	31 CrMoV 9	1.8519	900 – 1200	750 – 850	0,10 – 0,80	a, e1, 5, 7, 8
	34 CrAl 6	1.8504	800 – 950	900 – 1100	0,10 – 1,00	a, e1, 3, 4, 7, 8
	34 CrAlMo 5	1.8507	850 – 1000	900 – 1100	0,10 – 1,00	a, e1, 3, 4, 7, 8
	34 CrAlNi 7	1.8550	900 – 1050	900 – 1100	0,10 – 1,00	a, e1, 2, 3, 4, 7, 8
Einsatzstähle	16 MnCr 5 V	1.7131	600 – 800	650 – 750	0,10 – 1,00	b, c, e1, 5, 7
	20 MnCr 5 V	1.7147	600 – 800	650 – 750	0,10 – 1,00	b, c, e1, 5, 8
Kaltarbeitsstähle	100 Cr 6	1.2067	1000 – 1400	500 – 600	0,10 – 0,40	
	X 210 Cr 12	1.2080	1000 – 1600	700 – 800	0,10 – 0,20	b
	40 CrMnMo 7	1.2311	1000 – 1300	700 – 800	0,10 – 0,50	b
	40 CrMnMoS 8 6	1.2312	1000 – 1300	700 – 800	0,10 – 0,50	b
	X 165 CrMoV 12	1.2601	1400 – 1800	900 – 1050	0,10 – 0,15	b, l
Warmarbeitsstähle	55 NiCrMoV 6	1.2713	1000 – 1400	550 – 700	0,10 – 0,50	d
	56 NiCrMoV 7	1.2714	1000 – 1400	550 – 700	0,10 – 0,50	d
	X 38 CrMoV 5 1	1.2343	1200 – 1800	960 – 1150	0,10 – 0,40	a, d, b
	X 40 CrMoV 5 1	1.2344	1200 – 1800	960 – 1150	0,10 – 0,40	a, d, b
Martensitaushärtbare Stähle	X 2 NiCoMoTi 18 12 4	1.6356	1000 – 1200	900 – 1050	0,01 – 0,15	a
	X 2 NiCoMo 18 9 5	1.6358	1700 – 2250	800 – 1000	0,05 – 0,15	a
	X 2 NiCoMo 18 8 5	1.6359	1950 – 2100	750 – 1000	0,05 – 0,15	a
Kugelgraphitguss	GGG 50		500	550 – 700 HV 0,05**	0,10 – 0,40	e4, 5
	GGG 60		600	550 – 700 HV 0,05**	0,10 – 0,40	e4, 5

* Gemessen auf der Oberfläche nach Anpolieren einer Fläche.

** Gemessen in der Verbindungsschicht nach Herstellen eines Querschliffes.

a Kunststoffmaschinen (Extruder / Bitruder)
b Formplatten für Kunststoffspritzgussmaschinen
c Getriebebau
e Maschinenbau: 1 Verschleissleisten, 2 Gewindespindeln, 3 Bohr- und Arbeitsspindeln, 4 Spindelhülsen, 5 Kurven, 6 Papier- und Prägewalzen, 7 Hydraulikteile, 8 Pumpenteile, 9 Kurbelwellen.
f Walzwerkmaschinenbau
g Formenbau (z.B. Steinformen)
h Prägewerkzeuge
i Spritzgusswerkzeuge

Plasmanitrieren

Beim Plasmanitrieren wird die Tatsache genutzt, dass in einem evakuierten Gefäß zwischen zwei Elektroden verschiedener Spannung eine Glimmentladung entsteht, bei der die positiven Ladungsträger auf die Kathode (-) und die negativen Ladungsträger auf die Anode (+) fliegen. Wenn man das Gefäß, den Rezipienten, als Anode und ein darin aufgehängtes Werkstück als Kathode schaltet und stickstoffhaltiges Gas zuführt, wird dieses ionisiert, wodurch die Elektronen zur Rezipientenwand und die positiven Stickstoffionen zum Werkstück hin beschleunigt werden (Bild 33).

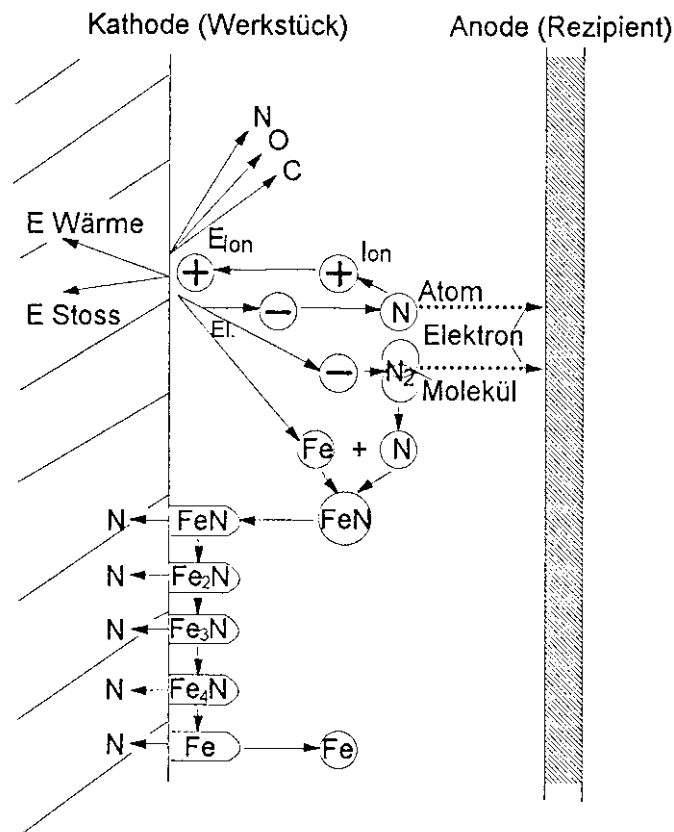


Bild 33: Grenzflächenreaktionen beim Plasmanitrieren

Die Ionen stäuben beim Aufprall im Werkstück Eisenatome ab, die sich im Plasma bei der Glimmentladung mit hoch reaktiven Stickstoffatomen zum stickstoffreichen Eisennitrid FeN verbinden. Als neutrale Partikel kondensieren diese Nitride nach den Gesetzen der Vakuumbildampfung auf der Werkstückoberfläche und zersetzen sich dort. Ein Teil des dabei frei werdenden Stickstoffs diffundiert in die Randschicht des Werkstücks ein. Das stickstoffverarmte Eisennitrid bzw. Eisenatom aber wird erneut abgestäubt.

Die Behandlungstemperatur kann im Bereich zwischen 350 und 630°C gehalten werden. Üblicherweise liegt sie bei 450 bis 600° C. Die Behandlungsdauer liegt normalerweise zwischen 1 und 40 Stunden. Die häufig verwendeten Werkstoffe zum Plasmanitrieren mit erreichbaren Oberflächenhärten und Nitriertiefen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Zum Plasmanitrieren häufig verwendete Werkstoffe

Wst.-Gruppe	DIN-Bezeichnung	Wst.-Nr.	Oberflächenhärte (HV 2 in kp/mm ²)	Ionitrierhärte (mm)	Verbindungszone (µm)
Gusseisen	GG 25		300 – 450	0,30	8 – 10
	GGG 42		300 – 500	0,30	6 – 10
	GGG 60		300 – 500	0,30	6 – 10
	GGG 70		300 – 500	0,30	6 – 10
Einsatzstähle	Ck 15	1.1141	250 – 300	0,30	8 – 12
	14 NiCr 14	1.5752	500 – 650	0,30	4 – 8
	16 MnCr 5	1.7131	500 – 650	0,30	4 – 8
	21 MnCr 5	1.2162	500 – 650	0,30	4 – 8
Vergütungsstähle	Ck 45	1.1191	300 – 450	0,30	8 – 12
	Ck 60	1.1221	300 – 450	0,30	8 – 12
	ETG 100		400 – 500	0,30	4 – 8
	40 CrMnMo 7	1.2311	650 – 800	0,30	6 – 8
	40 CrMnMoS 8 6	1.2312	650 – 800	0,30	6 – 8
	45 NiCr 6	1.2710	500 – 700	0,30	6 – 8
	34 CrNiMo 6	1.6582	600 – 800	0,30	3 - 6
	42 CrMo 4	1.7225	550 – 650	0,30	4 – 6
30 CrMoV 9	1.7707	600 – 800	0,30	3 – 6	
Federstähle	50 CrV 4	1.8159	450 – 600	0,30	4 – 8
	58 CrV 4	1.8161	450 – 600	0,30	4 – 8
Kugellagerstähle	100 Cr 6	1.3505	400 – 600	0,10	1 – 4
	100 MnCrW 4	1.2510	400 – 500	0,10	1 – 4
Nitrierstähle	34 CrAl 6	1.8504	900 – 1100	0,30	6 – 10
	34 CrAlMo 5	1.8507	900 – 1100	0,30	6 – 10
	41 CrAlMo 7	1.8509	900 – 1100	0,30	6 – 10
	31 CrMoV 9	1.8519	750 - 900	0,30	6 – 10
	34 CrAlNi 7	1.8550	900 – 1100	0,30	6 – 10
	32 CrMoV 12 10	1.7765	750 – 900	0,30	4 – 8
Kaltarbeitsstähle	X 165 CrMoV 12	1.2601	900 – 1200	0,10	Keine
	X 210 Cr 12	1.2080	900 – 1200	0,10	Keine
	X 100 CrMoV 5 1	1.2363	1000 – 1200	0,10	4 – 6
	X 210 CrW 12	1.2436	900 – 1200	0,10	keine
Warmarbeitsstähle	X 38 CrMoV 5 1	1.2343	800 – 1100	0,20	4 – 6
	X 40 CrMoV 5 1	1.2344	800 – 1100	0,20	4 – 6
	X 32 CrMoV 3 3	1.2365	700 – 1000	0,20	4 – 6
Schnellarbeitsstähle	S 10-4-3-10	1.3207	1200 – 1400	0,05 – 0,25	Keine
	S 6-5-2	1.3343	1200 – 1400	0,05 – 0,25	Keine
Martensitaushärtbare Stähle	X 2 NiCoMo 18 8 5	1.6359	800 – 1200	0,15	1 – 2
Hitzebeständige Stähle	X 15 CrNiSi 25 20	1.4841	800 – 1100	0,05	Keine
	X 12 CrNi 25 21	1.4845	800 – 1100	0,05	Keine
Rost- und Säurebeständige Stähle	X 20 Cr 13	1.4021	900 – 1000	0,10	Keine
	X 46 Cr 13	1.4034	1000 – 1200	0,05	Keine
	X 90 CrMoV 18	1.4112	900 – 1100	0,05	Keine
	X 35 CrMo 17	1.4122	1000 – 1300	0,05	Keine
	X 12 CrNi 18 8	1.4300	900 – 1200	0,05	Keine
	X 5 CrNi 18 10	1.4301	900 – 1200	0,05	Keine
	X 5 CrNiMo 17 12 2	1.4401	900 – 1200	0,05	Keine
	X 2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	900 – 1200	0,05	Keine

Salzbadnitrieren

Das Salzbadnitrieren wird in einer zyanid- und zyanathaltigen Salzschnmelze durchgeführt. Gleichzeitig wird durch Einleiten von Luft in die Salzschnmelze dafür gesorgt, dass ständig ein ausreichend hoher Anteil an Zyanat vorhanden ist. Verunreinigungen, insbesondere von Eisen, Nichteisenmetallen oder Schwefel, sind unerwünscht. Sie werden durch die Verwendung von mit Titan ausgekleideten oder aus Titan hergestellten Tiegeln ausgeschaltet.

Die Arbeitsweise mit belüfteten Nitrierbädern unter Verwendung von Titantiegeln ist unter der Bezeichnung "**Tenifer**" bekannt.

Tenifer leitet sich ab von

- Tenax = Zähl,
- Nitrogenium = Stickstoff und
- Ferrum = Eisen.

Tenifer ist die verbesserte und technisch ausgereifere Form des Salzbadnitrierens. Die Behandlung wird bei 570°C durchgeführt. Die Behandlungsdauer beträgt im allgemeinen 2 bis 3 Stunden. In Sonderfällen sind wesentlich kürzere, aber auch längere Tauchzeiten üblich.

Anfangs erfolgte die Behandlung in Salzschnmelzen mit 50 bis 52% Zyanid und 40 bis 45% Zyanat, bei denen durch Ausschöpfen und Nachfüllen von Frischsalz die durch den Gebrauch nachlassende Nitrierwirkung regeneriert werden musste (NS2, NS3-Verfahren).

Heute stehen statt dessen zyanidarme Schnmelzen zur Verfügung, die allein durch Zugabe eines Regenerators aufgefrischt werden können (**TF1-Verfahren**). Die Nitrierwirkung beim TF1-Verfahren ist stärker, so dass dickere Nitrierschichten in kürzerer Zeit erreicht werden können. Die zyanidarme Schnmelze erlaubt Behandlungstemperaturen bis 590°C.

Nach Ablauf der Behandlungsdauer wird an Luft oder in Stickstoff abgekühlt, oder in Heisswasser oder Öl abgeschreckt. Eine weitere Möglichkeit sind **Abschreckbäder (AB1)**, die auch eine oxidierende Wirkung haben. Dadurch wird die Korrosionsbeständigkeit der behandelten Werkstücke erhöht.

Beim **Tenifer-Verfahren** wird, wie bei den anderen Nitrierverfahren, eine Nitrierschicht gebildet, die aus der aussenliegenden Verbindungsschicht aus Eisennitrid und der darunterliegenden Diffusionsschicht besteht. Ausbildung, Struktur und Eigenschaften der Verbindungsschicht sind nahezu unabhängig vom Grundmaterial.

Die Nitrierschicht hat keine metallischen Eigenschaften und zeichnet sich, durch einen besonders guten Widerstand gegen

- Verschleiss,
- Fressneigung und
- Korrosion aus, ist
- warmrissbeständig und
- zerfällt erst bei der Bildungstemperatur.

Sie besteht aus Verbindungen von Eisen, Stickstoff, Kohlenstoff und etwas Sauerstoff. Neben den erwähnten Eigenschaften wird durch die Teniferbehandlung auch die Dauerfestigkeit verbessert.

Die Anwendungsmöglichkeiten des Tenifer-Verfahrens sind vielseitig. Es lassen sich alle eisenhaltigen Werkstoffe, also

- unlegierte,
- niedriglegierte und
- hochlegierte Stähle,
- verschiedene Gussarten wie auch
- austenitische Werkstoffe

behandeln.

Vorrangig verwendete Stahlsorten beim Teniferieren:

- Nitrierstähle
- Einsatzstähle
- Werkzeugstähle
- Schnellarbeitsstähle
- Rost- und Säurebeständige Stähle

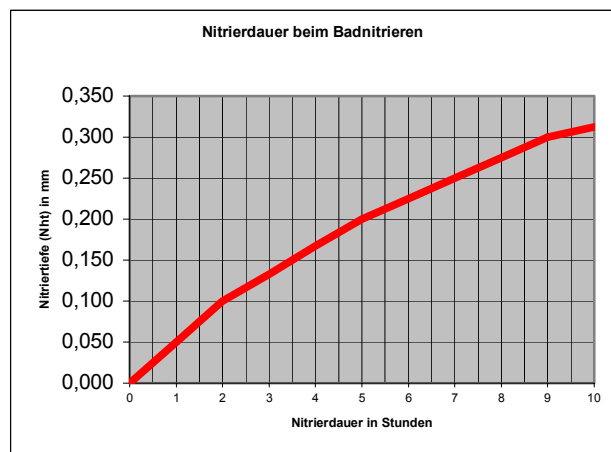


Bild 34: Einfluss der Nitrierdauer auf die Nitriertiefe beim Salzbadnitrieren

Das Nicotrieren

Das Nicotrieren und Teniferieren sind zwei vergleichbare Verfahren. Nur statt in Salzschnmelzen wird Nicotrieren in einer Gasatmosphäre durchgeführt, die aus 50% Endogas und 50% Ammoniak zusammengesetzt ist. Der entscheidende Vorgang beim Nicotrieren ist, dass nebst den Stickstoffatomen auch Kohlenstoffatome in die Stahloberfläche eindiffundieren. Wie beim Gasnitrieren verbinden sich die Stickstoffatome mit den entsprechenden Legierungselementen wie Aluminium, Chrom, Molybdän zu stabilen Nitriden und beeinflussen die Oberflächenhärte. Der Kohlenstoff aus kohlenstoffhaltiger Atmosphäre (Endogas) ist bei dieser Behandlungstemperatur unlöslich im Stahl. Die Ausscheidung von Karbiden an der Oberfläche beeinflusst die Verbindungsschicht erheblich. Diese Karbide machen sich zäh und verringern auch die Gefahr des Abplatzens.

Die Schutzgasatmosphäre, bestehend aus 50% Endogas und 50% Ammoniak, wird in den Ofen eingeführt und umgewälzt. Das Spaltungsverhältnis von 40 bis 50% hängt von der Gaszufuhr ab. Die Messung erfolgt über den Dissotiationsgrad.

Die Oberfläche der Werkstücke muss sauber und fettfrei sein. Zunder oder entkohlte Schichten müssen entfernt werden. Vorheriges Vergüten bewirkt optimale Ergebnisse. Die erzielten Schichten sind härter und gleichmässiger. Anlasstemperaturen für bestimmte Kernfestigkeiten sollten wenigstens bei 590°C liegen, damit keine späteren Massänderungen auftreten. Meistens werden die Werkstücke vor dem Nicotrieren spannungsarm geglüht und geschliffen. Stähle mit hohem Chromgehalt, besonders rostfreie Stähle, bilden rasch eine Chromoxid-Schicht an der Oberfläche. Die Diffusion wird durch diese Passivschicht verhindert. Diese Stähle sind deshalb nicht geeignet für das Nicotrieren.

Die Dicken der Verbindungs- und Diffusionsschicht sind hauptsächlich vom Werkstoff und der Behandlungsdauer abhängig. Die beim Nicotrieren erzeugte Verbindungsschicht, je nach Werkstoff bei einer Behandlungstemperatur von 570°C während 2 Stunden, beträgt 3 -25 µm. Die Beschaffenheit der darunterliegenden Diffusionsschicht ist meistens von untergeordneter Bedeutung. Die gesamte Nicotrierschichtdicke beträgt ca. 0,06 mm. Die Werkstücke können je nach Legierung in Wasser, Öl oder an Luft abgekühlt werden. Nicotrierte Werkstücke werden häufig im Ofen rasch abgekühlt. Das Abschrecken bewirkt eine bessere Dauerfestigkeit.

Nicotrierte Oberflächen weisen gute

- Verschleisseigenschaften
- Gleiteigenschaften und
- Korrosionsbeständigkeit

auf.

Besonders zu beachten:

- Beim Nicotrieren sind bessere Oberflächen erzielbar als beim Teniferieren.

1.2.4 Induktions- und Flammhärten

Induktions- und Flammhärten sind zwei Verfahren für die Randschichthärtung. Beide gehören in die Gruppe der gefügemwandelnenden Verfahren, ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes. Es können in der Regel nur Stähle mit ausreichend hohem Kohlenstoffgehalt erfolgreich behandelt werden (mehr als 0,3%C).

Beim Induktions- und Flammhärten werden die Werkstücke grösstenteils nur partiell gehärtet, d.h. es werden nur jene Bereiche behandelt, an welchen eine Härtesteigerung notwendig ist. Der grösste Vorteil dieser Verfahren ist, dass nicht mehr das ganze Werkstück erwärmt werden muss. Die ungehärteten Bereiche des Werkstücks lassen sich nach der Wärmebehandlung problemlos spanend bearbeiten. Dadurch ist es möglich, durch die richtige Wahl der Operationsfolge, ein Werkstück auf wirtschaftlichste Weise mit der nötigen Präzision zu fertigen. Das Verzugsverhalten ist in den weitaus meisten Fällen günstiger, als bei den durchgreifend wirkenden Verfahren. Zudem lassen sich randschichtgehärtete Teile besser und mit kleinerem Risiko richten.

Tabelle 3: Stähle für Flamm- und Induktionshärten

DIN-Bezeichnung	Wst.-Nr.	Härte-Verfahr.	Abschreckmittel		Werkstk.- \varnothing (in mm)	Rht (in mm)	Oberfl. Härte (HRC)
			bei 20°	bei 50°			
C 35	1.0501	I	W		10 – 30	0,50 – 1,50	45 - 52
		I	W		>30	1,50 – 4,00	
		F	W		>30	1,50 – 4,00	
C 45	1.0503	I	W		10 – 30	0,50 – 1,50	51 – 57
		I	W		>30	1,50 – 4,00	
		F	W		>30	1,50 – 4,00	
C 60	1.0601	I		W	20 – 30	0,50 – 1,50	57 – 62
		I		W	>30	1,50 – 4,00	
		F		W	>30	1,50 – 4,00	
40 Mn 4	1.5038	I		W	20 – 30	1,50 – 4,00	53 – 59
		I		W	30 – 60	4,00 – 12,00	
		F		W	30 – 60	4,00 – 12,00	
37 MnSi 5	1.5122	I	WL		20 – 30	1,50 – 4,00	50 – 60
		I	WL		>30	>4,00	
		F		W	>30	4,00 – 8,00	
42 MnV 7	1.5223	I	WL		30 – 60	4,00 – 8,00	54 – 60
		I		W	>60	>8,00	
		F		W	>60	6,00 – 12,00	
41 Cr 4	1.7035	I		W	20 – 30	1,50 – 4,00	51 – 57
		I		W	30 – 60	4,00 – 12,00	
		F		W	30 – 60	4,00 – 12,00	
34 CrMo 4	1.7220	I	WL		20 – 30	1,50 – 4,00	51 – 57
		I	WL		30 – 60	4,00 – 12,00	
		F		W	30 – 60	4,00 – 12,00	
42 CrMo 4	1.7225	I	WL		30 – 60	4,00 – 8,00	54 – 60
		I	WL		>60	>8,00	
		F		W	>60	6,00 – 12,00	
50 CrV 4	1.8159	I	WL		30 – 60	4,00 – 8,00	57 – 62
		I	WL		>60	>8,00	
		F		W	>60	6,00 – 12,00	

Legende: F = Flammhärten
 I = Induktionshärten
 L = Luft
 Rht = Randhärtetiefe
 W = Wasser

Vorteile des Induktionshärtens:

- Keine Kornvergrößerung
- Keine Oberflächenoxidation

Nachteile des Induktionshärtens:

- Hohe Anlagenkosten.
- Schlecht zugängliche Stellen können nur schwierig gehärtet werden.

Besonders zu beachten:

- Ein weichgeglühtes Gefüge ist NICHT optimal geeignet für eine Induktionshärtung!
- Gusseisen darf beim Induktionshärten nicht mehr als 3% C, 2% Si und 0,1% Ph enthalten!
- Gegenüber dem Einsatzhärten werden grössere Einhärtetiefen und weniger Verzug erzielt.

Eine weitere Tabelle mit geeigneten Werkstoffen für Induktionshärtung finden Sie auf der nächsten Seite.

DIN Kurzbezeichnung	DIN Werkstoff- Nummer	Analyse										erreichbare Härte in Rockwell HRC			
		C %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	50	55	60	65	
Vergütungsstähle															
C 35	1.0501	0.35	0.35	0.80	0.045	0.045									
35 S 20 ¹⁾	1.0762	0.35	0.40	0.90	0.060	0.250									
Ck 35	1.1181	0.35	0.35	0.80	0.035	0.035									
Cf 35	1.1183	0.35	0.35	0.80	0.025	0.035									
C 45	1.0503	0.45	0.35	0.80	0.045	0.045									
45 S 20 ¹⁾	1.0727	0.45	0.40	0.90	0.060	0.250									
Ck 45	1.1191	0.45	0.35	0.80	0.035	0.035									
Cf 45	1.1193	0.45	0.35	0.80	0.025	0.035									
Cf 53	1.1213	0.53	0.35	0.70	0.025	0.035									
60 S 20 ¹⁾	1.0728	0.60	0.40	0.90	0.060	0.250									
Ck 60	1.1221	0.60	0.35	0.90	0.035	0.035									
Cf 70	1.1249	0.70	0.35	0.35	0.025	0.035									
79 Ni 1	1.6971	0.79	0.30	0.55	0.025	0.025	0.15		0.15	0.05					
36 Mn 5	1.5067	0.36	0.35	1.50	0.035	0.035									
40 Mn 4	1.5038	0.40	0.50	1.10	0.035	0.035									
37 MnSi 5 ²⁾	1.5122	0.37	1.40	1.40	0.035	0.035									
38 MnSi 4 ²⁾	1.2120	0.38	0.90	1.20	0.035	0.035									
46 MnSi 4 ²⁾	1.5121	0.46	0.90	1.20	0.035	0.035									
53 MnSi 4 ²⁾	1.5141	0.53	1.00	1.20	0.035	0.035									
45 Cr 2	1.7005	0.45	0.40	0.80	0.025	0.035	0.50								
34 Cr 4	1.7033	0.34	0.40	0.90	0.035	0.035	1.05								
37 Cr 4	1.7034	0.37	0.40	0.90	0.035	0.035	1.05								
38 Cr 4	1.7043	0.38	0.40	0.90	0.025	0.035	1.05								
41 Cr 4	1.7035	0.41	0.40	0.80	0.035	0.035	1.05								
42 Cr 4	1.7045	0.42	0.40	0.80	0.025	0.035	1.05								
34 CrMo 4	1.7220	0.34	0.40	0.80	0.035	0.035	1.05	0.25							
41 CrMo 4	1.7223	0.41	0.40	0.80	0.025	0.035	1.05	0.25							
42 CrMo 4	1.7225	0.42	0.40	0.80	0.035	0.035	1.05	0.25							
49 CrMo 4	1.7238	0.49	0.40	0.80	0.025	0.035	1.05	0.25							
50 CrMo 4	1.7228	0.50	0.40	0.80	0.035	0.035	1.05	0.25							
50 CrV 4	1.8159	0.50	0.40	1.10	0.035	0.035	1.05			0.15					
58 CrV 4	1.8161	0.58	0.35	1.10	0.035	0.035	1.05			0.09					
30CrNiMo 8	1.6580	0.30	0.40	0.60	0.035	0.035	2.00	0.35	0.35						
34 CrNiMo 6	1.6582	0.34	0.40	0.70	0.035	0.035	1.55	0.25	0.25						
36 CrNiMo 4	1.6511	0.36	0.40	0.80	0.035	0.035	1.05	0.25	0.25						
Werkzeugstähle															
X 41 CrMo V 5.1	1.2344	0.41	1.00	0.40	0.015	0.010	5.00	1.30		0.50					
86 CrMo V 7	1.2327	0.86	0.35	0.45	0.030	0.030	1.75	0.30	0.10						
Nichtrostende Stähle															
X 20 Cr 13	1.2082	0.20	0.50	0.40	0.035	0.035	13.0								
X 40 Cr 13	1.2083	0.40	0.50	0.40	0.030	0.030	13.0								
X 90 CrMo V 18	1.4112	0.90	1.00	1.00	0.045	0.030	18.0	1.15							
X 90 CrCoMo V 17 ³⁾	1.4535	0.90	1.00	1.00	0.045	0.030	16.5	0.50	0.25	0.25					
X 105 CrMo 17	1.4125	1.05	1.00	1.00	0.045	0.030	17.0	0.60		0.10					
Kugellagerstahl															
100 Cr 6	1.3505	1.00	0.35	0.40	0.030	0.025	1.55								
Ventilstähle															
X 45 CrSi 9 3	1.4718	0.45	3.50	0.50	0.030	0.025	9.50								
X 80 CrNiSi 20	1.4747	0.80	2.75	1.00	0.030	0.030	20.0		1.50						
Gusswerkstoffe															
GG - 25	1.6025														
GTS - 45															
GTS - 65															
GGG - 60	1.7060														
GGG - 70	1.7070														
Bemerkungen: ¹⁾ Härteschwankungen möglich Härtetiefen: max. 2 mm ²⁾ Rissempfindlich bei stark polierten Teilen max. 4 mm ³⁾ + ca. 1.5 % Co max. 6 mm über 6 mm															

1.2.5 Das Borieren und Chromieren

Borieren und Chromieren zählen zu den Wärmebehandlungsverfahren, mit denen durch eine Thermochemische Behandlung die Zusammensetzung und damit der Gefügestand bzw. die Eigenschaften der Randschicht von Bauteilen und Werkzeugen aus Eisenwerkstoffen verändert werden können.

Die Änderung der Zusammensetzung erfolgt über Diffusion, durch welche die Randschicht mit Bor bzw. Chrom angereichert, d.h. anlegiert wird. Die Randschicht erhält dadurch eine höhere Härte, was besonders im Falle abrasiver Verschleissbeanspruchung den Widerstand gegen Abrieb deutlich erhöht.

Zur Übertragung der Elemente Bor bzw. Chrom auf die Randschicht von Eisenwerkstoffen ist es erforderlich, die zu behandelnden Werkstücke ausreichend lange der Wirkung einer bor- bzw. chromspendenden Umgebung bei Temperaturen oberhalb von 850°C auszusetzen. Als Spendermittel kommen grundsätzlich, ähnlich wie beim Aufkohlen oder Nitrieren, Gase, Salzschnmelzen oder Granulate in Betracht.

Da die Behandlungstemperatur im Bereich der Austenitisier- oder Härtetemperatur der meisten Stähle liegt, bietet es sich an, nach Abschluss der Diffusion durch Abkühlen mit ausreichend hoher Abkühlgeschwindigkeit, in denen von der Diffusion unbeeinflusst gebliebenen, austenitischen Werkstückbereichen, eine Härtung herbeizuführen. Dies hat sich in manchen Anwendungsfällen zur besseren Abstützung der Randschicht bewährt. In einigen Fällen werden dagegen die borierten oder chromierten Werkstücke separat gehärtet. Durch Borieren und Chromieren wird eine Härte von 1500 - 2000 HV erreicht. Neben dem Widerstand gegen Abrieb wird auch die Korrosionsbeständigkeit, insbesondere durch Chromieren, erhöht.

Boriertemperatur: 800°C - 1000°C
Chromiertemperatur: 700°C - 800°C

Schichtdicke beim Borieren: $\leq 0,30$ mm
Schichtdicke beim Chromieren: $\leq 0,15$ mm

Eigenschaften von Boridschichten:

- Sehr hohe Härte
- Günstige Verschleisseigenschaften
- Optimale Haftfestigkeit
- Geringe Kaltschweisneigung
- Mit Eisenwerkstoffen vergleichbarer Wärmeausdehnungskoeffizient
- Gute Temperaturbeständigkeit
- Billigere Stahlsorten können verwendet werden (niedrig- und unlegierte Stähle)

Borierfähige Werkstoffe:

- Eisenwerkstoffe
- Nichteisenmetalle
- Hartmetalle