

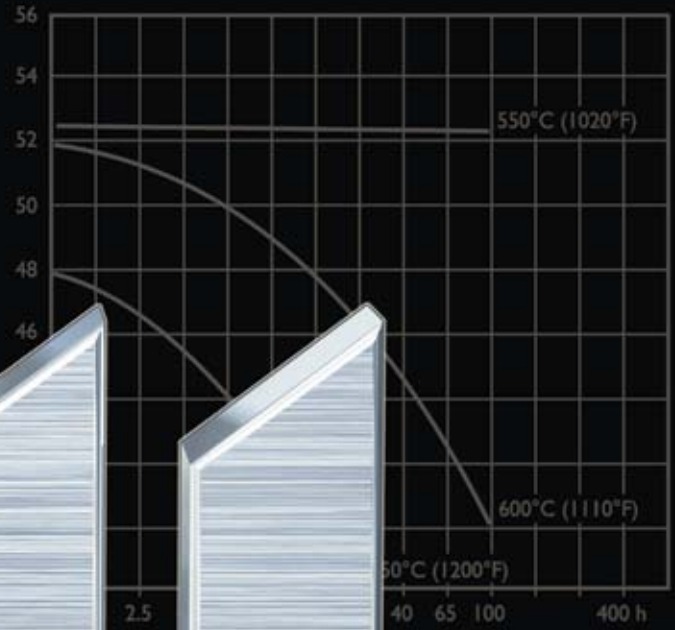
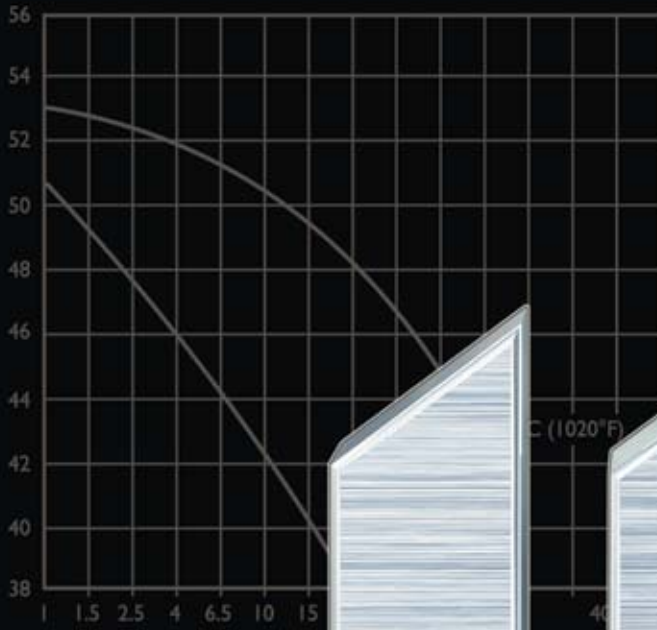
Wärmebehandlung von Werkzeugstählen

COLD WORK

PLASTIC MOULDING

HOT WORK

HIGH PERFORMANCE STEEL



Typical analysis %	C 2,05
Standard specification	AISI D6, ()
Delivery condition	Soft annealed
Colour code	Red

Typical analysis %	Mn 0,8	Cr 4,5	W 0,2
Standard specification	D3 (W.Nr. 1.2796)		
Delivery condition	to approx. 200 HB		
Colour code			

Temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)	400°C (750°F)
Density kg/m ³ lbs/m ³	7 770 0,281	7 700 0,277	7 650 0,275
Modulus of elasticity N/mm ² psi	194 000 28,1 × 10 ⁶	188 000 27,3 × 10 ⁶	178 000 25,8 × 10 ⁶
Coefficient of thermal expansion per °C from 20°C per °F from 68°F	to 100°C 11,7 × 10 ⁻⁶ to 212°F 6,5 × 10 ⁻⁶	to 200°C 12 × 10 ⁻⁶ to 400°F 6,7 × 10 ⁻⁶	to 400°C 13,0 × 10 ⁻⁶ to 750°F 7,3 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/m °C Btu in (ft ² h°F)	-	27 187	32 221
Specific heat K/kg °C Btu/lbs °F	455 0,109	525 0,126	608 0,145

Temperature	200°C (390°F)	400°C (750°F)
Density kg/m ³ lbs/m ³	7 700 0,277	7 650 0,275
Modulus of elasticity N/mm ² psi	194 000 28,1 × 10 ⁶	189 000 27,4 × 10 ⁶
Coefficient of thermal expansion per °C from 20°C per °F from 68°F	to 100°C 12,3 × 10 ⁻⁶ to 212°F 6,1 × 10 ⁻⁶	to 200°C 14 × 10 ⁻⁶ to 400°F 6,7 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity W/m °C Btu in (ft ² h°F)	20,5 142	21,5 149
Specific heat K/kg °C Btu/lbs °F	460 0,110	- -

Inhalt

Einleitung	3
Härten und Anlassen	3
Maß- und Formänderungen	7
Oberflächenbehandlungsverfahren	9
Prüfung von mechanischen Eigenschaftens	11
Hinweise für den Konstrukteur	12

Die Angaben in dieser Broschüre basieren auf unserem gegenwärtigen Wissensstand und vermitteln nur allgemeine Informationen über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten. Sie können nicht als Garantie ausgelegt werden weder für die spezifischen Eigenschaften der beschriebenen Produkte noch für die Eignung für die als Beispiel genannten Anwendungsmöglichkeiten.

Der Inhalt dieser Broschüre befaßt sich mit der Wärmebehandlung von Werkzeugstählen und deren Verhalten während der Wärmebehandlung.

Einleitung

Uddeholm hat sich auf die Herstellung von hochlegierten Werkzeugstählen spezialisiert, die in erster Linie für Kunststoffformen, Schneid- und Umformwerkzeuge, Druckgießformen, Strangpreßwerkzeuge, Schmiedegesenke und Messer für die Holzverarbeitung gedacht sind.

Schnellarbeitsstähle, herkömmlich und pulvermetallurgisch hergestellte Werkzeugstähle gehören ebenfalls zum Programm.

Werkzeugstähle werden normalerweise in weichgeglühtem Zustand geliefert. Das Gefüge in diesem Zustand ist günstiger für die spanabhebende Bearbeitung und geeigneter für den Härtevorgang.

Das Gefüge im weichgeglühten Zustand besteht aus einer weichen (ferritischen) Grundmatrix, in der Karbide eingebettet sind. Bei den Kohlenstoffstählen handelt es sich um Eisenkarbid und bei den legierten Stählen um Chrom (Cr)-, Wolfram (W)-, Molybdän (Mo)- oder Vanadin (V)-Karbide – je nach der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Karbide sind Verbindungen der genannten Legierungselemente mit Kohlenstoff und zeichnen sich durch eine sehr hohe Härte aus. Ein höherer Karbidgehalt bedeutet höheren Verschleißwiderstand.

Es ist wichtig, dass die Karbide in legierten Stählen möglichst gleichmäßig verteilt sind.

Auch andere Legierungselemente wie z.B. Kobalt (Co) und Nickel (Ni)

werden für Werkzeugstähle verwendet. Sie bilden allerdings keine Karbide.

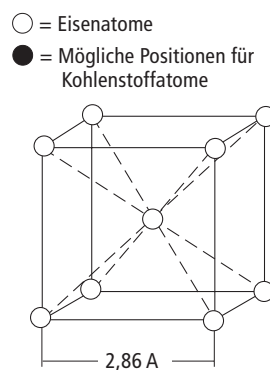
Kobalt wird normalerweise zur Verbesserung der Warmhärte eingesetzt, während Nickel oder auch Mangan die Härteerhöhung erhöhen.

Härten und Anlassen

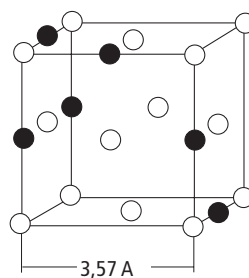
Wenn ein Werkzeug gehärtet wird, beeinflussen viele Faktoren das Endergebnis.

EINIGE THEORETISCHE GRUNDLAGEN

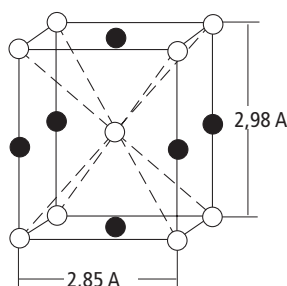
In weichgeglühtem Werkzeugstahl sind die Legierungselemente zum größten Teil zusammen mit dem Kohlenstoff als Karbide gebunden.



Elementarzelle des Ferrits
Kubisch raumzentriert



Elementarzelle des Austenits
Kubisch flächenzentriert



Elementarzelle des Martensits

Die Legierungselemente Kobalt und Nickel, die keine Karbide bilden, sind in der Grundmatrix gelöst.

Die Grundidee beim Härten eines Werkzeugstahls ist eine ausreichende Auflösung der Karbide in die Grundmatrix, so dass der Legierungsgehalt der Matrix soweit gesteigert wird, dass der Härtevorgang eingeleitet werden kann – dabei darf der Stahl nicht grobkörnig und spröde werden. Nur ein Teil der Karbide wird aufgelöst, und die freiwerdenden Legierungselemente und der Kohlenstoff befinden sich nachher in der Matrix.

Wenn der Stahl auf Härtetemperatur (Austenitisierungstemperatur) gebracht wird, werden die Karbide zum Teil gelöst, und gleichzeitig verändert sich die Matrix. Es findet eine Umwandlung von Ferrit in Austenit statt. Die Eisenatome in dem Atomgitter verändern ihre Lage und schaffen Platz für Kohlenstoffatome und Atome der Legierungselemente. Der Kohlenstoff und die Legierungselemente von den zum Teil aufgelösten Karbiden sind in der Matrix gelöst.

Wenn der Stahl jetzt schnell genug abgekühlt wird, haben die Kohlenstoffatome keine Zeit, sich an Stellen abzulagern, die eine Rückumwandlung von Austenit in Ferrit ermöglichen würden. Stattdessen sind sie an Stellen fixiert, wo eigentlich zu wenig Platz vorhanden ist. Die daraus resultierende tetragonale Gitterverzerrung führt zu erheblichen Mikrospannungen (Gitterspannungen). Diese Spannungen sind die Ursache für die hohe Härte des so entstandenen Gefüges, das Martensit genannt wird.

Beim Härten eines Stahls wird die Matrix nicht vollständig in Martensit umgewandelt. Ein Teil des Austenits bleibt immer zurück und wird als Restaustenit bezeichnet. Die Menge des Restaustenits nimmt zu mit steigendem Legierungsgehalt, erhöhter Härtetemperatur und verlängerter Haltedauer.

Nach dem Abkühlen weist der Stahl ein aus Martensit, Restaustenit und Karbiden bestehendes Gefüge auf.

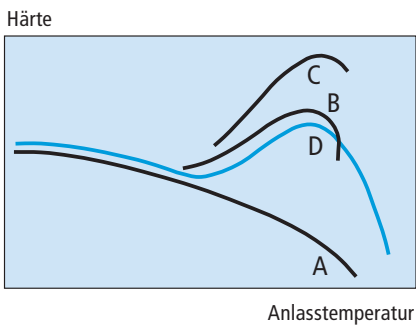
Die hohen inneren Spannungen in diesem Gefüge können leicht zu Rissen führen. Dies läßt sich jedoch vermeiden, indem der Stahl nochmals auf eine gewisse Temperatur erwärmt wird.



Spannungen werden dann abgebaut, und der Restaustenit wird umgewandelt. Wieviel Restaustenit umgewandelt wird, hängt von der Höhe der Temperatur ab.

Dieses Erwärmen nach dem Abkühlen wird als Anlassen bezeichnet. Ein Anlassen muss immer unmittelbar nach dem Abkühlvorgang erfolgen.

Ein Anlassen bei niedriger Temperatur beeinflusst nur den Martensit, der nach dem Abkühlvorgang gebildet wurde, während ein Anlassen bei höheren Temperaturen auch einen Restaustenitzerfall bewirkt.



- A = Anlassen von Martensit
- B = Karbidausscheidungen
- C = Umwandlung von Restaustenit in Martensit
- D = Anlassdiagramm für Schnellarbeitsstahl und hochlegierten Werkzeugstahl
- A+B+C = D

Das Diagramm zeigt den Einfluss der verschiedenen Anlassvorgänge auf die Form der Anlasskurve.

Nach einem Anlassen bei hoher Temperatur besteht das Gefüge aus angelassenem Martensit, neugebildetem Martensit, etwas Restaustenit und Karbiden. Die ausgeschiedenen Sekundärkarbide und der neugebildete Martensit führen zu einer Härtesteigerung beim Anlassen bei hohen Temperaturen. Diese Härtesteigerung erscheint als Sekundärmaximum in der Anlasskurve von Schnellarbeitsstählen und hochlegierten Werkzeugstählen.

Werkzeugstähle müssen immer zweimal angelassen werden. Der zweite Anlassvorgang wirkt auf den Martensit, der durch den Restaustenitzerfall nach dem ersten Anlassvorgang gebildet wurde. Für Schnellarbeitsstähle mit einem hohen Kohlenstoffgehalt ist ein dreifaches Anlassen zu empfehlen.

DURCHFÜHRUNG VON HÄRTEN UND ANLASSEN IN DER PRAXIS

Verzug beim Härten muss schon bei der Grobzerspannung eines Werkzeugs berücksichtigt werden. Bei der Grobzerspannung wird der Stahl örtlich erhitzt und plastisch verformt, wodurch innere Spannungen entstehen. Bei einem einfachen symmetrischen Werkzeug üben diese Spannungen keinen wesentlichen Einfluss aus. Anders ist es bei einer unsymmetrischen Bearbeitung, z.B. bei einer Formenhälfte eines Druckgußwerkzeuges. Der unsymmetrische Spannungszustand kann sehr störend wirken. In diesem Fall ist immer vor der eigentlichen Wärmebehandlung ein Spannungsarmglühen zu empfehlen.

Spannungsarmglühen

Das Spannungsarmglühen wird nach der Grobzerspannung durchgeführt. Das Werkzeug wird auf 550–650°C durchgewärmt und eine bestimmte Zeit auf dieser Temperatur gehalten. Danach wird das Werkzeug langsam auf ca. 500°C im Ofen und anschließend an der Luft abgekühlt.

Beim Spannungsarmglühen geschieht folgendes: Die Streckgrenze des Stahls bei der erhöhten Temperatur hat einen so nied-

rigen Wert, dass sie durch die Bearbeitungsspannungen überschritten wird. Die daraus resultierende plastische Verformung des Stahls führt zu einem Abbau dieser Spannungen und zu einem mehr oder weniger ausgeprägten Verzug.

Dieser Verzug wird anschließend durch eine Feinbearbeitung beseitigt. Während des Erwärmens auf Härtetemperatur werden die Spannungen, die durch die Feinbearbeitung entstanden sind, gelöst. Sie führen auch zu einem Verzug, der jedoch wesentlich geringer ist als der, der nach einer Grobzerspannung auftreten würde, d.h., die Formkorrektur eines gehärteten Werkzeugs nach einem Spannungsarmglühen ist wesentlich wirtschaftlicher.

Die richtige Reihenfolge ist also: *Grobbearbeitung – Spannungsarmglühen – Feinbearbeitung.*

Erwärmen auf Härtetemperatur

Die Grundregel für das Erwärmen auf Härtetemperatur ist, dass die Erwärmung langsam stattfinden soll. Dabei erhält man den geringsten Verzug.

In Vakuumöfen und Öfen mit Schutzgasatmosphäre wird die Temperatur langsam gesteigert. Beim Härten in Salzbadern wird vorgewärmt. In Muffelöfen ergibt sich automatisch ein langsames Erwärmen, da die Werkstücke durch Verpacken (z.B. in ausgebranntem Koksgrieß) geschützt werden.

Es ist wichtig, dass die Werkzeuge vor Oxidation und Entkohlung geschützt werden. Den besten Schutz bietet ein Vakuumofen, da die Anteile an reaktiven Gasen so weit herabgesetzt werden, dass die Werkzeuge ihre blanke Oberfläche beibehalten.

Schutzgasöfen und Salzbadern gewähren auch einen guten Schutz. Wenn Kammeröfen benutzt werden, kann das Werkzeug durch Verpacken in Koksgrieß oder Gußeisenspäne geschützt werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass solche Materialien bei Stählen mit einem niedrigen Kohlenstoffgehalt, wie z.B. Warmarbeitsstählen, zu einer Aufkohlung führen können.

Das Verpacken in einer rostfreien Härtefolie bietet beim Härten in einem Muffelofen ebenfalls guten Schutz.



Einmal angelassen



Zweimal angelassen

Rigor, gehärtet und angelassen (1000fache Vergrößerung)

Eine Entkohlung während des Härtens führt zu einer niedrigen Oberflächenhärte und Reißgefahr während des Abkühlvorganges.

Eine Aufkohlung während des Härtens ergibt eine härtere Oberflächenschicht, die sich negativ auswirken kann.

Haltedauer

Die Haltedauer ist die Zeitspanne des Haltens auf Härtetemperatur, beginnend mit dem Erreichen der Solltemperatur im Kern bis zur Einleitung des Abkühlvorganges. Es ist nicht möglich, in Kürze detaillierte Empfehlungen aufzustellen, die für alle verschiedenen Härteöfen genau zutreffen.

Faktoren, wie z.B. Ofentyp, Ofenleistung, Temperaturpegel, Verhältnis Chargengewicht zu Ofengröße usw. müssen in jedem einzelnen Fall berücksichtigt werden.



Vakuumofen



Salzbad



Kammerofen mit geregelter Atmosphäre

Eine Empfehlung hat jedoch allgemeine Gültigkeit:

Wenn der Stahl die Härtetemperatur bis zum Kern hin erreicht hat, soll das Werkzeug für 30 Minuten auf dieser Temperatur gehalten werden.

Ausnahme: Werkzeuge mit kleineren Wandstärken, z.B. aus Schnellarbeitsstahl, die bei hoher Temperatur im Salzbad gehärtet werden. Die Verweildauer (d.h., die Dauer von der Überführung aus dem Vorwärmofen in das Härtebad bis zur Entnahme zum Abkühlen) beträgt oft nur wenige Minuten.

Abkühlen

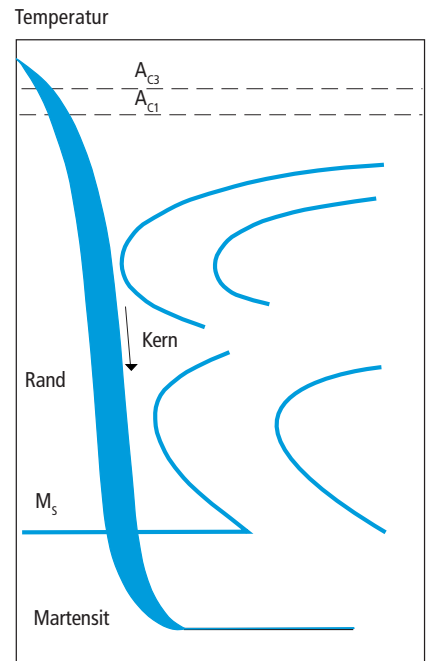
Die Entscheidung zwischen einer langsamen oder schnellen Abkühlung ist normalerweise ein Kompromiß; um das beste Gefüge und damit die beste Werkzeugleistung zu erzielen, sollte die Abkühlung so schnell wie möglich erfolgen; eine langsame Abkühlung führt dagegen zum geringsten Verzug.

Ein langsames Abkühlen führt zu einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen dem Rand und dem Kern eines Werkstücks, und Querschnitte mit unterschiedlichen Stärken werden gleichmäßiger abgekühlt. Dies ist beim Abkühlen im Martensitbereich unterhalb der M_s -Temperatur von großer Bedeutung. Martensitbildung führt zu einer Volumenvergrößerung und dadurch zu Spannungen im Werkstück. Aus diesem Grund soll die Abkühlung unterbrochen werden – normalerweise bei $50-70^\circ\text{C}$ – bevor Raumtemperatur erreicht wird.

Wenn jedoch die Abkühlung zu langsam erfolgt, besteht die Gefahr, dass bei dickeren Querschnitten ein unerwünschtes Gefüge entsteht und dadurch die Werkzeugleistung herabgesetzt wird.

Für *unlegierte Stähle* wird Wasser als Abschreckmittel verwendet. Ein Zusatz von 8–10% Kochsalz oder Soda erhöht die Abschreckwirkung. Beim Abschrecken mit Wasser sind oft Härterisse und Verzug die Folge.

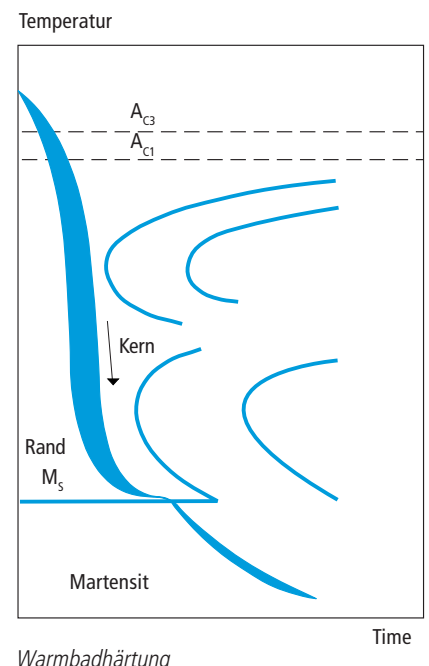
Für *niedriglegierte Stähle* wird Öl als Abschreckmedium verwendet. Es sollen nur die für diesen Zweck bestimmten handelsüblichen Öle eingesetzt werden. Das Öl muss saubergehalten und nach einer gewissen Zeit ausgewechselt



Abkühlvorgang, dargestellt in einem ZTU-Schaubild für isothermische Temperaturführung

werden. Abschrecköle sollen eine Temperatur von $60-70^\circ\text{C}$ haben, um die beste Abschreckwirkung zu erzielen. Bei niedrigeren Temperaturen haben sie eine höhere Viskosität, d.h., sie sind zähflüssiger.

Eine Abschreckung in Öl ist sicherer als eine in Wasser. Es besteht jedoch auch mit Öl immer noch die Gefahr von Härterissen und Verzug. Härterisse und



Warmbadhärtung

Verzug lassen sich durch ein Warmbadhärten vermindern. Beim Warmbadhärten wird in zwei Stufen abgekühlt. In der ersten Stufe wird in einer Salzschnmelze auf eine Temperatur knapp über der M_s -Temperatur abgekühlt. Das Werkstück wird ausreichend lange bis zum Temperatenausgleich, jedoch ohne Austenitumwandlung, gehalten. Nach diesem Temperatenausgleich wird das Werkstück an der Luft abgekühlt. Die Martensitbildung findet beim Abkühlen von der Temperatur des Warmbades auf Raumtemperatur statt.

Beim Warmbadhärten von Ölhärten ist zu berücksichtigen, dass die Umwandlung im Stahl relativ schnell abläuft, so dass der Stahl nicht zu lange im Warmbad gehalten werden soll. Andernfalls wird ein mehr oder weniger ausgeprägtes Zwischenstufengefüge (Bainit) erzielt und damit die Gefahr von Härte- und Zähigkeitsverlusten verursacht.

Hochlegierte Werkzeugstähle können in Öl, in einem Warmbad oder an der Luft gehärtet werden. Jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile.

Ölhärtung erzeugt eine gute Oberfläche und hohe Härte. Aber die Gefahr von übermäßigem Verzug und Härterissen ist hoch. Bei großen Querschnitten ist ein Abschrecken in Öl jedoch oft die einzige Möglichkeit, maximale Härte zu erzielen.

Warmbadhärten im Salzbad erzielt eine gute Oberfläche und hohe Härte, und die Gefahr von übermäßigem Verzug und Härterissen ist verringert.

Bei gewissen Stahlsorten hat das Warmbad normalerweise eine Temperatur von ca. 500°C. Diese Temperatur bewirkt einen relativ milden thermischen Schock, aber gleichzeitig ist die Abkühlrate ausreichend, um Gefügewandlungen zu verhindern.

Beim Abkühlen von der Warmbadtemperatur an Luft ist genügend Zeit für die Martensitumwandlung vorhanden. Verhältnismäßig große Querschnitte können auf diese Weise gehärtet werden. Die Härtebarkeit des Stahls bestimmt dabei den größten härtbaren Querschnitt.

Luftabkühlung führt zum geringsten Verzug. Bei größeren Querschnitten ist jedoch ein Härteabfall nicht zu vermeiden.

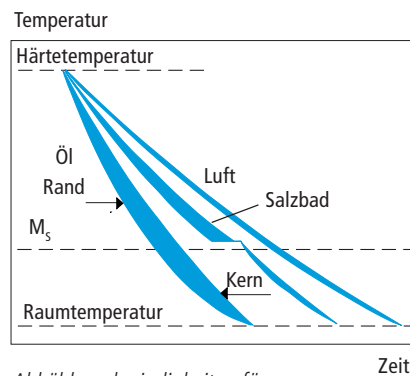
Ein Nachteil bei einer Lufthärtung ist die schlechtere Oberfläche. Eine langsame Abkühlung von der hohen Härtetemperatur an der Luft führt zu einer Oxidation der Werkstückoberfläche.

Die Wahl des Abkühlmediums muss von Fall zu Fall entschieden werden. Aber als eine allgemeine Empfehlung gilt:

Ein *Warmbad* ist in den meisten Fällen die sicherste Methode.

Luft wird benutzt, wenn in erster Linie eine optimale Maßstabilität verlangt wird.

Öl soll möglichst vermieden werden und nur benutzt werden, um bei großen Querschnitten zuviel Härteverlust zu vermeiden.



Abkühlgeschwindigkeiten für verschiedene Medien.

Außer diesen drei bekannten Methoden werden heutzutage auch andere mit modernen Ofentypen angewendet, z.B. das gesteuerte Abkühlen in einer Schutzgasatmosphäre. Die Abkühlgeschwindigkeit ist ungefähr die gleiche wie die an Luft, aber das Problem der Oberflächenoxidation entfällt. Mit den modernen Vakuumöfen ist es möglich, die Abkühlung mit Gasüberdruck zu beschleunigen. Die Oberflächen sind nach dem Vakuumhärten völlig blank.

Mit dieser Abkühltechnik, genau wie beim Abkühlen an Luft, besteht das Risiko einer zu langsamen Abkühlung – vor allem bei zu geringem Gasüberdruck – und die Oberflächenhärte des Werkstücks kann niedriger ausfallen als erwartet; die Härte im Kernbereich von großen Querschnitten kann noch niedriger ausfallen.

Eine zu langsame Abkühlung mit Schutzgas kann z.B. bei Schnellarbeits- und Warmarbeitsstahl dazu führen, dass der Kernbereich so langsam abgekühlt wird, dass Karbidausscheidungen stattfinden; Härte- und Zähigkeitsverluste im Kernbereich sind die Folge.

Anlassen

Das Abkühlen sollte bei einer Temperatur von 50–70°C unterbrochen werden, und der Anlassvorgang soll sofort erfolgen. Wenn dies nicht möglich ist, muss das Werkstück so lange warmgehalten werden, bis der Anlassvorgang erfolgen kann. Die Wahl der Anlass temperatur ist oft Erfahrungssache. Bestimmte Richtlinien, die

- Härte,
- Zähigkeit und
- Maßänderungen

berücksichtigen, können jedoch hilfreich sein.

Wenn eine maximale Härte erwünscht ist, soll bei ca. 200°C angelassen werden, aber nie unter 180°C. Schnellarbeitsstahl wird normalerweise bei einer Temperatur von ca. 20°C über der Temperatur des Sekundärmaximums angelassen.

Wenn eine niedrigere Härte gewünscht ist, kann eine höhere Anlass temperatur benutzt werden. Niedrigere Härte bedeutet nicht automatisch höhere Zähigkeit, wie aus unseren Druckschriften „Kenndaten von Werkzeugstählen“ zu ersehen ist. Ein Anlassen in Temperaturbereichen, die zu einer Herabsetzung der Zähigkeit führen, soll vermieden werden. Wenn die Maßhaltigkeit gleichzeitig berücksichtigt werden muss, ist die Wahl der Anlass temperatur oft ein Kompromiß. Die Zähigkeit sollte jedoch nach Möglichkeit den Vorrang haben.

Wie oft soll angelassen werden?

Für Werkzeugstähle wird ein zweimaliges Anlassen empfohlen. Für Schnellarbeitsstähle mit einem Kohlenstoffgehalt von etwa 1% oder mehr wird sogar ein dreimaliges Anlassen empfohlen.

Wenn die Grundregel – Unterbrechung des Abkühlvorganges bei 50–70°C – befolgt wird, wird eine gewisse Menge Austenit nicht umgewandelt. Wenn nur einmal angelassen wird, wird dieser Restaustenit in Martensit umgewandelt. Dieser liegt im nichtangelassenen Zustand vor. Ein weiteres Anlassen ist nötig, um diesen Martensit anzulassen, so dass der Stahl eine optimale Zähigkeit für die sich ergebende Härte erhält. Aus diesem Grund wird immer ein zweimaliges Anlassen empfohlen.

Die gleichen Überlegungen gelten, wenn es sich um Restaustenit in Schnellarbeitsstahl handelt. Hier kommt jedoch noch hinzu, dass der Restaustenit hochlegiert und umwandlungsträge ist. Während des Anlassens finden Diffusionsvorgänge im Restaustenit statt. Sekundärkarbide werden ausgeschieden. Der Restaustenit verliert an Legierungsgehalt und läßt sich während der Abkühlung nach dem Anlassen leichter in Martensit umwandeln. Daher trägt ein mehrfaches Anlassen dazu bei, den Anteil des Restaustenits durch erneute Umwandlung in Martensit weiter zu verringern.

Haltedauer beim Anlassen

Die folgende Empfehlung steht über allen komplizierten Formeln und Faustregeln:

Die Haltedauer für jede Anlassstufe beträgt mindestens zwei Stunden.



Anlassofen mit Luftumwälzung.

Maß- und Formänderungen

VERZUG BEIM HÄRTEN UND ANLASSEN VON WERKZEUGSTÄHLEN

Beim Härten und Anlassen von Werkzeugstählen tritt normalerweise ein gewisser Verzug auf und zwar umso stärker, je höher die Härtetemperatur ist.

Das ist eine bekannte Tatsache, und üblicherweise wird eine gewisse Bearbeitungszugabe vorgesehen, bevor das Werkzeug gehärtet wird. Dadurch ist es möglich, das Werkzeug nach dem Härten und Anlassen z.B. durch Schleifen auf die gewünschten Endmaße zu bringen.

WIE ENTSTEHT VERZUG?

Unter Verzug versteht man die Änderung der Maße und der Form eines Werkstücks durch Wärmebehandlung. Spannungen im Stahl sind die Ursache. Es gibt drei Arten von Spannungen:

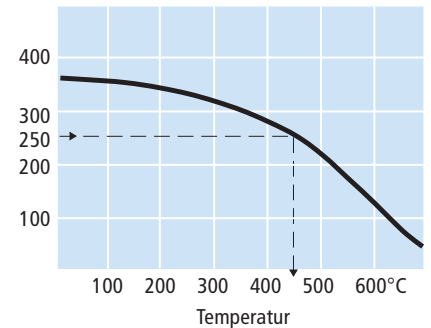
- Bearbeitungsspannungen,
- Wärmespannungen,
- Umwandlungsspannungen.

Bearbeitungsspannungen

Diese Spannungen werden durch die spanabhebende Bearbeitung wie z.B. Drehen, Fräsen und Schleifen erzeugt. In noch höherem Maße entstehen sie bei der spanlosen Formgebung wie z.B. beim Schneiden, Umformen und Ziehen.

Wenn Bearbeitungsspannungen in ein Werkstück eingebracht worden sind, werden sie beim Erwärmen des Werkstücks wieder beseitigt.

N/mm² Streckgrenze Rp0,2



Abhängigkeit der Streckgrenze von der Temperatur bei Orvar 2 Microdized, weichgeglüht.

Erwärmen vermindert die Festigkeit, wobei Spannungen durch eine örtliche plastische Verformung abgebaut werden können. Dies kann zu einem Verzug führen.

Um Verzug während des Härtens zu vermindern, kann ein Entspannen durchgeführt werden.

Nach der Grobzerspannung wird ein Spannungsarmglühen empfohlen. Dann kann vor dem Abkühlen durch eine Feinbearbeitung der aufgetretene Verzug beseitigt werden.

Wärmespannungen

Diese Spannungen entstehen beim Erwärmen eines Werkstücks. Sie sind höher, wenn das Erwärmen schnell oder ungleichmäßig erfolgt. Durch Erwärmen nimmt das Volumen des Werkstücks zu. Eine ungleichmäßige Erwärmung kann zu örtlichen Volumenvergrößerungen führen, die ihrerseits Spannungen und Formänderungen bewirken.

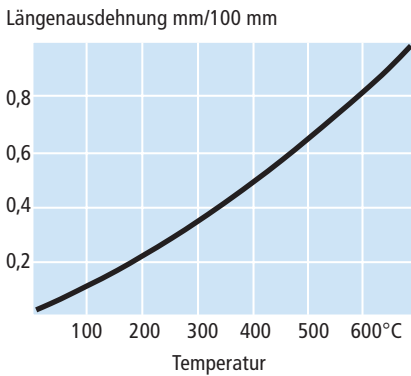
Bei großen oder komplizierten Werkstücken ist es ratsam, in Stufen vorzuwärmen, damit ein Temperaturengleich im Stahl stattfinden kann.

Es ist immer besser, ausreichend langsam zu erwärmen, so dass die Temperatur während des Erwärmens im gesamten Werkstück möglichst gleich ist.

Was hinsichtlich des Erwärmsens gesagt worden ist, gilt im Prinzip auch für das Abkühlen.

Bei der Abkühlung können sehr hohe Spannungen entstehen. Als allgemeine Regel gilt:

Je langsamer abgekühlt werden kann, desto geringer sind die Formänderungen, die durch Wärmespannungen entstehen.



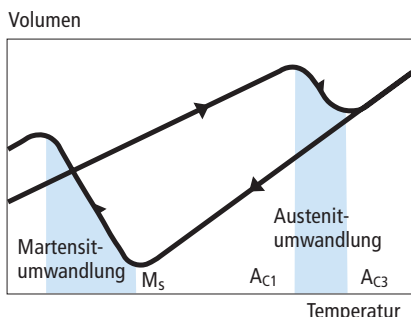
Abhängigkeit der Längenausdehnung von der Temperatur bei Orvar 2 Microdized, weichgeglüht.

Umwandlungsspannungen

Diese Spannungen entstehen durch Gefügeumwandlungen im Stahl, da die drei vorkommenden Gefügearten Ferrit, Austenit und Martensit unterschiedliche Dichten/spezifische Volumina besitzen.

Die Umwandlung von Austenit in Martensit übt den größten Einfluß aus. Sie bewirkt eine Volumenvergrößerung.

Eine zu schnelle und ungleichmäßige Abkühlung bewirkt außerdem eine örtliche Martensitbildung und damit eine örtliche Volumenvergrößerung in einem Werkstück. Dies wiederum führt zu örtlichen Spannungen. Diese Spannungen können zum Verzug und manchmal zu Härterissen führen.



Volumenänderungen bei der Austenit-/Martensitumwandlung.

WIE KANN VERZUG MINIMIERT WERDEN?

Verzug kann minimiert werden durch:

- Eine einfache und symmetrische konstruktive Gestaltung,
- Abbau von Bearbeitungsspannungen durch Spannungsarmglühen nach der Grobbearbeitung,
- langsames Erwärmen auf Härte-temperatur,
- Verwendung einer geeigneten Stahlsorte,
- ein möglichst langsames Abkühlen des Werkstücks (aber nicht so langsam, dass ein unerwünschtes Gefüge entsteht),
- Anlassen bei einer geeigneten Temperatur.

Die folgenden Bearbeitungszugaben dienen als Richtwerte:

Stahlsorte	Bearbeitungszugabe bezogen auf Länge und Durchmesser
ARNE	0,25 %
RIGOR	0,20 %
SVERKER 21 und SVERKER 3	0,20 %
CARMO	0,20 %
SLEIPNER	0,25 %
CALDIE	0,25 %
VANADIS 4 Extra SuperClean	0,15 %
VANADIS 6 SuperClean	0,15 %
VANADIS 10 SuperClean	0,15 %
VANADIS 23 SuperClean	0,15 %
VANCRON 40	0,20 %
CALMAX	0,20 %
GRANE	0,15 %
STAVAX ESU	0,15 %
STAVAX SUPREME	0,20 %
ELMAX SuperClean	0,15 %
CORRAX	0,05–0,15 %
ORVAR 2 Microdized	0,20 %
ORVAR SUPREME	0,20 %
VIDAR SUPERIOR	0,20 %
QRO 90 SUPREME	0,30 %
HOTVAR	0,40 %
DIEVAR	0,30 %
ROLTEC SF	0,15 %
TOUGHTEC SF	0,15 %
WEARTEC SF	0,15 %

Anmerkung: Corrax ist ein ausscheidungshärtbarer Stahl. Während des Auslagerns schrumpft das Werkzeug abhängig von der Auslagertemperatur (siehe Corrax-Datenblatt). Deswegen muss ein Aufmaß berechnet werden. Es tritt keine Formänderung auf.

TIEFTEMPERATURBEHANDELN

Werkzeuge, von denen eine maximale Maßstabilität während der Anwendung verlangt wird, können folgendermaßen tiefemperaturbehandelt werden:

Unmittelbar nach dem Abschrecken sollte das Teil auf –70 bis –80°C tiefgekühlt werden, Haltedauer 1–3 Stunden, und anschließend angelassen werden.

Die Tieftemperaturbehandlung führt zu einem Abbau von Restaustenit. Dadurch steigert sich die Härte um 1–2 HRC im Vergleich zu nicht tiefgekühlten Werkzeugen, wenn niedrigtemperaturangelassen wird. Hochtemperaturangelassene Werkzeuge erhalten keine höhere Härte. Verglichen mit den Anlasskurven von nicht tiefgekühlten Werkzeugen, sollte eine um 25–50°C tiefere Anlasstemperatur gewählt werden, um die gewünschte Härte zu erzielen.

Werkzeuge, die ausreichend hochtemperaturangelassen sind, haben auch ohne Tieftemperaturbehandlung einen niedrigen Restaustenitgehalt und damit in vielen Fällen eine zufriedenstellende Maßstabilität. Wird jedoch eine höhere Maßstabilität im Einsatz gefordert, ist es manchmal trotzdem notwendig, Werkzeuge tiefzukühlen, die anschließend hochtemperaturangelassen werden.

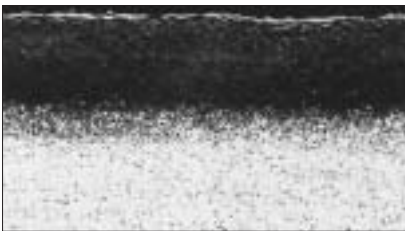
Für höchste Ansprüche an Maßstabilität wird eine Tieftemperaturbehandlung mit Flüssigstickstoff nach dem Abschrecken und nach jedem Anlassvorgang empfohlen.

Oberflächenbehandlungsverfahren

NITRIEREN

Durch Nitrieren wird die Oberflächenhärte des Stahls gesteigert, seine Verschleißigenschaften werden verbessert, und die Neigung zu Kaltaufschweißungen wird vermindert. Nitrieren erfolgt in einer stickstoffhaltigen Gasatmosphäre oder in einem Salzbad, das Stickstoff abgibt. Dabei wird die Randschicht eines Werkstücks mit Stickstoff angereichert, und es bilden sich harte, verschleißbeständige Nitride. Diese Randschicht besitzt eine gute Verschleißfestigkeit und gute Reibungseigenschaften.

Ein Gasnitrieren findet bei ca. 510°C statt, ein Salzbadnitrieren bei ca. 570°C. Daher werden nur anlaßbeständige Stähle nitriert, um einen Härteabfall im Kern des Werkstücks zu verhindern.



Nitrierte Randschicht, 100fache Vergrößerung. Orvar 2 Microdized.

Anwendungsbeispiele

- Manchmal werden Kunststoffformen aus vergüteten Werkzeugstählen nitriert, um Eindrücke in den Trennflächen zu vermeiden. Es ist jedoch zu beach-

ten, dass eine nitrierte Oberfläche nicht mit spanabhebenden Werkzeugen bearbeitet werden kann und sich nur schwer schleifen läßt. Außerdem bringt sie Probleme bei Reparaturschweißungen. Ein Nitriervorgang kann auch eine ähnliche Wirkung haben wie ein Spannungsarmglühen. Bei grobzerspannten Werkstücken kann es zu einem Verzug kommen, da die eingebrachten Spannungen während des Nitrierens gelöst werden. In diesem Fall werden ein Spannungsarmglühen nach der Grobbearbeitung und eine Feinbearbeitung vor dem Nitrieren empfohlen.

- Die Lebensdauer eines Schmiedegesenkens kann durch Nitrieren verlängert werden. Hier ist jedoch die erhöhte Gefahr einer Ribbildung in scharfen Radien usw. zu beachten.
- Eine Nitrierbehandlung von Orvar 2 Microdized – Strangpreßwerkzeugen kann vorteilhaft sein, besonders beim Strangpressen von Aluminiumlegierungen. Ausnahmen sind Werkzeuge für das Strangpressen von Profilen mit scharfen Radien und Werkzeuge mit sehr dünnen Stegen.

NITROKARBURIEREN

Ein weitverbreitetes Verfahren ist das Nitrieren in einem besonders zusammengesetzten und belüfteten Nitrierbad. Das Bad enthält Alkalicyanid und Alkalicyanat. Die Temperatur beträgt normalerweise 570°C. Ein Nitrokarburieren kann auch in einer geeigneten Gasatmosphäre bei 570°C durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind vergleichbar.

IONNITRIEREN

Ionnitrieren ist ein verhältnismäßig neues Nitrierverfahren. Dieses Verfahren kann folgendermaßen kurz umrissen werden:

Das zu nitrierende Werkstück wird in eine mit Gas gefüllte Kammer eingebracht. Das Gas besteht überwiegend aus Stickstoff. Das Werkstück bildet die Katode und der Kammermantel die Anode eines Stromkreises. Wenn der Stromkreis geschlossen wird, wird das Gas ionisiert, und das Werkstück wird mit Ionen beschossen. Das Gas dient gleichzeitig als Heiz- und Nitriermedium. Das Ionnitrierverfahren hat einige Vorteile:

Die Prozeßtemperatur ist niedrig, und die Nitrierschicht ist hart und zäh. Die Nitriertiefe ist vergleichbar mit der, die beim Gasnitrieren erreicht wird, wird aber nach einer kürzeren Nitrierdauer erreicht.

EINSATZHÄRTEN

Beim Einsatzhärten wird die Randschicht eines Werkstücks mit Kohlenstoff angereichert. Das Werkstück wird in einem Aufkohlungsmittel (Gas, Salz oder Pulver) erhitzt. Kohlenstoff diffundiert in die Oberfläche des Werkstücks hinein.

Nach dem Härten wird eine harte und verschleißfeste Oberflächenschicht erzielt. Einsatzhärten wird bei Baustählen angewendet, wird jedoch im allgemeinen nicht für legierte Werkzeugstähle empfohlen.

HARTVERCHROMEN

Hartverchromen kann sowohl die Verschleißbeständigkeit als auch die Korrosionsbeständigkeit verbessern. Die Hartchromschicht wird elektrolytisch eingebracht. Die Dicke der Schicht beträgt normalerweise zwischen 0,001 und 0,1 mm. Es kann schwierig sein, eine gleichmäßige Schicht aufzubringen, besonders bei komplizierten Teilen. Hier wird die Schicht an Ecken und Kanten oft dicker als an großen, flachen Oberflächen. Bei einer Beschädigung der Chromschicht kann es leicht zu Korrosionsangriffen auf den Grundwerkstoff kommen.



Ionnitrier-Anlage.

Außer zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes und der Korrosionsbeständigkeit führt ein Hartverchromen auch zu einer Erhöhung der Gleiteigenschaften.

Hartverchromte Teile sollten nach der Behandlung für vier Stunden bei 180°C geglüht werden, um eine Wasserstoffversprödung zu vermeiden.

PVD UND CVD

Zwei weitere Beschichtungsverfahren – PVD und CVD – werden immer häufiger nicht nur für Kaltarbeitswerkzeuge, sondern auch für Kunststoffformen und Warmarbeitswerkzeuge angewendet. Normalerweise bestehen diese Schichten aus Titanitrid und/oder Titankarbid. Diese Schichten sind sehr hart und verschleißbeständig und besitzen gute Gleiteigenschaften.

- **PVD-Beschichtung:**

PVD (Physical Vapour Deposition) ist ein physikalisches Beschichtungsverfahren und ermöglicht die Herstellung verschleißfester Schichten bei relativ niedrigen Temperaturen. Sie werden im Bereich 200–500°C aufgebracht.

- **CVD-Beschichtung:**

CVD (Chemical Vapour Deposition) ist ein chemisches Ausscheidungsverfahren, das bei Temperaturen von ca. 1000°C durchgeführt wird.

Gewisse Anforderungen werden an den zu beschichtenden Werkzeugstahl gestellt. Sie werden bestimmt durch die Beschichtungsmethode und einzuhaltende Toleranzen.

Eine PVD-Beschichtung wird angewendet, wenn sehr hohe Anforderungen an Toleranzen gestellt werden. Der zu beschichtende Werkzeugstahl muss eine sehr hohe Anlassbeständigkeit aufweisen, und die Schicht muss nach dem Härten und Anlassen aufgebracht werden.

Bei der CVD-Beschichtung muss das Werkzeug nach der Beschichtung gehärtet und angelassen werden. Der zu beschichtende Werkzeugstahl muss eine Härtetemperatur von ca. 1000°C haben. Bei einer CVD-Beschichtung besteht die Gefahr von Maßänderungen. Aus diesem Grund wird diese Methode nicht für Werkzeuge mit sehr hohen Maßtoleranzen empfohlen.

Die Stähle, die sich am besten für die genannten Verfahren eignen, sind Vanadis 4 Extra, Vanadis 6, Vanadis 10, Vanadis 23 und Caldie. Über die Oberflächenbeschichtung von Werkzeugen und Formen sollte von Fall zu Fall beraten werden, da sowohl die Anwendung wie auch die Beschichtungsverfahren und Toleranzanforderungen eine Rolle spielen.



Beschichtete Werkzeuge

Prüfung von mechanischen Eigenschaften

Wenn ein Stahl gehärtet und angelassen wird, werden seine Eigenschaften beeinflusst. Im folgenden wird daher beschrieben, wie einige Eigenschaften durch mechanische Prüfungen bestimmt werden können.

HÄRTEPRÜFUNG

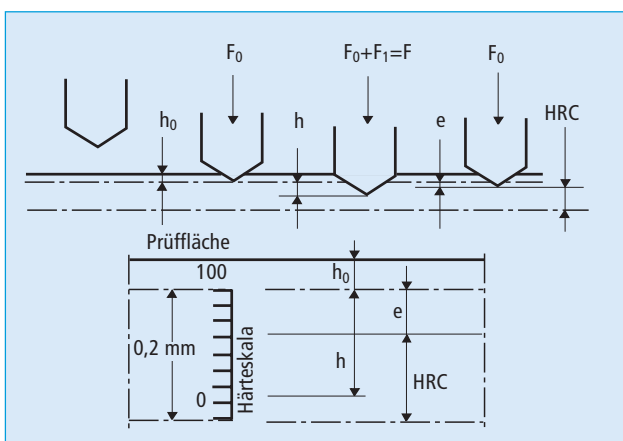
Die Härteprüfung ist die gebräuchlichste Methode, das Ergebnis einer Härtung zu prüfen. Die Härte ist normalerweise die Eigenschaft, die vorgeschrieben wird, wenn ein Werkzeug Wärmebehandelt werden soll.

Es ist einfach, die Härte zu prüfen; der Werkstoff wird so gut wie nicht zerstört, und das Prüfgerät ist relativ preiswert. Die am häufigsten verwendeten Prüfverfahren sind Rockwell C (HRC), Vickers (HV) und Brinell (HBW).

Die alte Bezeichnung „feilenhart“ sollte nicht außer acht gelassen werden. Die Prüfung mit einer guten Feile kann auch heute noch einen Hinweis darauf geben, ob eine ausreichend hohe Härte (z.B. über 60 HRC) vorhanden ist.

Rockwell (HRC)

Bei der Härteprüfung nach dem Rockwell-C-Verfahren wird ein Diamantkegel zuerst mit einer Prüfvorkraft (F_0) von 98 N und anschließend zusätzlich mit der Prüfkraft (F_1) von 1373 N in das Werkstück eingedrückt, so dass eine Kraft (F_0+F_1) von 1471 N vorliegt. Nach dem Entlasten auf die Prüfvorkraft (F_0)



Prinzip der Rockwell-Prüfung (HRC).

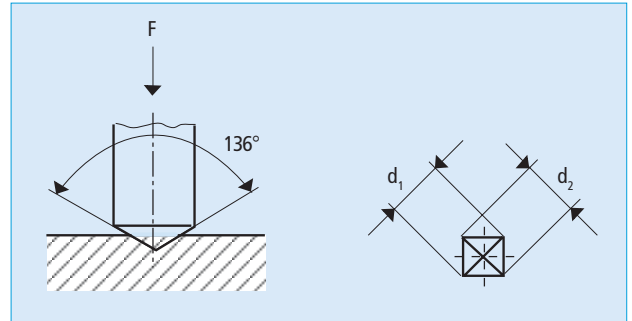
geht die elastische Verformung zurück und es wird die bleibende Eindringtiefe (e) gemessen, die von der Prüfkraft (F_1) stammt. Die bleibende Eindringtiefe (e) wird in einen Härtewert umgerechnet.

Vickers (HV)

Bei der Härteprüfung nach Vickers wird eine vierseitige, gleichmäßige Diamantpyramide mit einem Winkel von 136° in der Spitze zwischen den Flächen mit einer Prüfkraft F in das Werkstück eingedrückt. Nach dem Entlasten wird der Mittelwert der beiden Eindrucksdiagonalen d_1 und d_2 bestimmt, aus dem der Härtewert errechnet werden kann bzw. mit dem der Härtewert aus einer Tabelle abgelesen werden kann.

Beim Angeben der Vickershärte wird der Härtewert (ohne Einheit) vor das Kurzzeichen HV gestellt. Dem Kurzzeichen folgt der Zahlenwert der Prüflast in der alten Einheit Kilopond (kp) und falls notwendig die Belastungsdauer.

Beispiel: HV 30/20 = Vickershärte, ermittelt mit 294 N (30kp) Prüfkraft. Belastungsdauer = 20 Sekunden.

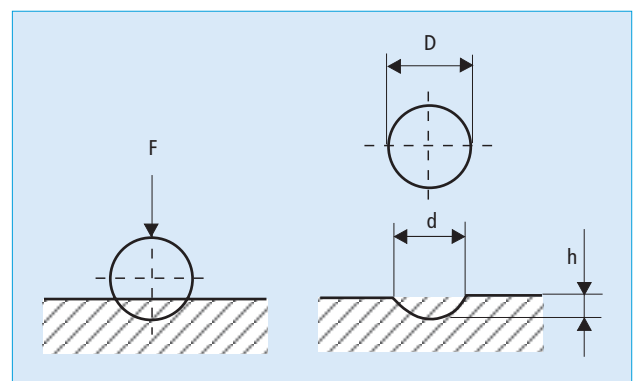


Prinzip der Vickers-Prüfung (HV).

Brinell (HBW)

Bei der Härteprüfung nach Brinell wird eine Kugel mit einer Prüfkraft F in das Werkstück eingedrückt. Nach dem Entlasten wird der Durchmesser des Eindrucks an 2 Stellen (d_1 und d_2), die senkrecht zueinander stehen, gemessen und der Mittelwert gebildet. Daraus kann der Härtewert errechnet werden bzw. aus einer Tabelle abgelesen werden.

Beim Angeben der Brinellhärte wird der Härtewert (ohne Einheit) vor das Kurzzeichen HBW gestellt. Dem Kurzzeichen folgt der Kugeldurchmesser in mm, der Zahlenwert der Prüflast in der alten Einheit Kilopond (kp) und falls notwendig die Belastungsdauer.



Prinzip der Brinell-Prüfung (HBW).

Beispiel: HBW 5/750/15 = Brinellhärte, ermittelt mit einer Wolfram Kugel von 5 mm \varnothing und einer Prüfkraft von 7360 N (750 kp). Belastungsdauer = 15 Sekunden.

ZUGFESTIGKEIT

Die Zugfestigkeit wird mit genormten Zugproben ermittelt. Die Zugproben werden mit den beidseitigen Einspannknöpfen in die Zugprüfmaschine eingespannt und dann stetig gereckt, bis die Probe reißt. Auf einem Schreiber entsteht ein Kraft-Verlängerungs-Diagramm.

Die in der Regel erfaßten Größen sind die Streckgrenze $R_{p0,2}$ und die Bruchgrenze R_m . Sie werden aus dem Schreiberdiagramm ermittelt. An der Zugprobe werden die Bruchdehnung A_5 und die Brucheinschnürung Z gemessen. Allgemein kann gesagt werden, dass die Härte von der Streckgrenze und der Bruchgrenze abhängig ist, während Bruchdehnung und Brucheinschnürung die Zähigkeit erkennen lassen. Hohe Streck- und Bruchgrenzen sind normalerweise mit niedrigen Bruchdehnungen und Brucheinschnürungen gekoppelt.

Zugfestigkeitsprüfungen werden meistens an Baustählen durchgeführt, aber seltener an Werkzeugstählen. Bei Härten über 55 HRC ist ein Zugversuch nur schwer durchzuführen. Zugversuche können bei zäheren Werkzeugstählen von Interesse sein, besonders dann, wenn sie als hochfeste Baustähle verwendet werden. Zu dieser Gruppe zählen z.B. Impax Supreme und Orvar 2 Microdized.

KERBSCHLAGBIEGEVERSUCH

Eine gewisse Energiemenge wird benötigt, um einen Bruch in einem Werkstoff hervorzurufen. Diese Energiemenge kann als Maß für die Zähigkeit des Werkstoffs dienen; ein höherer Energieverbrauch bedeutet hohe Zähigkeit und umgekehrt. Der Kerbschlagbiegeversuch stellt die gebräuchlichste und einfachste Methode zur Ermittlung der Zähigkeit dar. Eine eingekerbte Probe wird auf einem Pendelschlagwerk mit einem Pendelhammer durchgeschlagen. Das Pendel wird in eine Hochlage gehoben. Nach der Auslösung schwingt das Pendel herunter und trifft im tiefsten Punkt seiner Kreisbahn die Schlagprobe. Durch den Bruch dieser Probe wird ein Teil der im Pendel vorhandenen Bewegungsenergie (kinetische Energie) in die Brucharbeit umgesetzt. Der Rest veranlaßt das Pendel durchzuschwingen und eine gewisse Höhe zu erreichen. Die zum Trennen der Probe verbrauchte Energie kann daraus berechnet werden.

Es gibt verschiedene Probenarten für den Kerbschlagbiegeversuch, so werden z.B. für den Charpy U-Test Proben mit u-förmigen Kerben benutzt, für den Charpy V-Test solche mit v-förmigen Kerben.

Werkzeugstähle haben infolge ihrer hohen Festigkeit eine ziemlich niedrige Zähigkeit. Werkstoffe mit niedriger Zähigkeit sind besonders kerbempfindlich. Aus diesem Grund werden für Schlagversuche an Werkzeugstählen glatte, ungekerbte Proben benutzt. Das Prüfergebnis wird gewöhnlich in Joule (J) oder kpm angegeben, aber auch in J/cm^2 oder kpm/cm^2 , besonders beim Charpy U-Test.

Es gibt andere Kerbschlagbiegeprüfungen, z.B. von Mesnager, von DVM und – besonders in englischsprachigen Ländern – von Izod.



Hinweise für den Konstrukteur

AUSWAHL DES STAHL

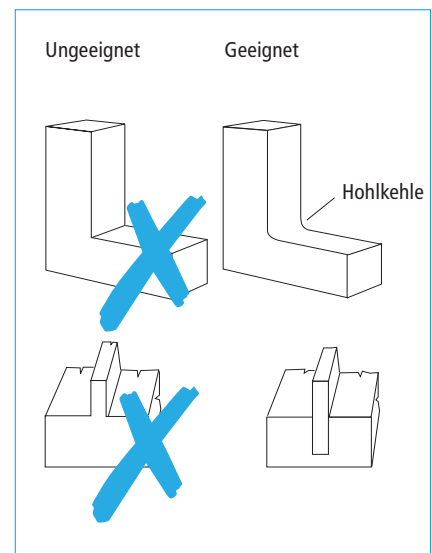
Für komplexe Werkzeuge sollte lufthärtbarer Stahl genommen werden.

KONSTRUKTION

Vermeiden Sie:

- scharfe Ecken bzw. kleine Radien,
- Kerben,
- große Querschnittsänderungen.

Es entstehen leichter Härterisse, vor allem, wenn das Material zu weit abgekühlt oder nicht rechtzeitig angelassen wurde.



WÄRMEBEHANDLUNG

Wählen Sie die für Ihre Anwendung geeignete Härte. Vermeiden Sie Temperaturen, die die Zähigkeit nach dem Anlassen herabsenken können. Da immer mit Verzug gerechnet werden muss, sollte ein entsprechendes Aufmaß einkalkuliert werden. Ein Vorschlag wäre, das Spannungsarmglühen in der Zeichnung vorzuschreiben.