

Versuch: Grundlagen des Versuchs Härten von Stahl (Sekundarstufe II)

Modul: Härten von Stahl



Bergsteiger und Freeclimber müssen sich auf langfristig anhaltende Qualität ihrer Seilhaken verlassen können. Durch Erwärmen und anschließendes Abschrecken ergibt sich ein harter, verschleißfester Stahl

Härten...

...für einen harten,
verschleißfesten
Stahl.

In diesem Härtevorgang wird das Material auf eine angepasste Temperatur erwärmt und nachfolgend in Wasser, in Öl, einem Warmbad oder an der Luft (Martensitbildung) abgeschreckt. Das Ergebnis ist bei geeignetem Grundwerkstoff ein harter, verschleißfester Stahl.

1. Versuchsziel und Aufgabenstellung

Stahlwerkstoffe können auch bei festgelegter chemischer Zusammensetzung in ihren Eigenschaften variieren. Aus diesem Grund sind sie flexibel einsetzbar, weil man diese Eigenschaften gezielt einstellen kann. Für diese „Wärmebehandlung“, wie auch für den Umgang mit Stählen bei hohen Temperaturen, soll ein Verständnis geschaffen werden.

Verschiedene Stahlsorten werden geglüht und in verschiedenen Medien abgekühlt. Veränderungen in der Stahlstruktur werden demonstriert und anhand von selbständig erfassten Härtewerten überprüft.

Die Ergebnisse der verschiedenen Stahlsorten sollen innerhalb des Protokolls ausgewertet und miteinander verglichen werden. Das Protokoll umfasst weiterhin einige Berechnungen, welche mathematische und physikalische Grundkenntnisse erfordern. Anhand gezielter Fragen im Auswertungsteil soll der Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung, Wärmebehandlung und den mechanischen Eigenschaften deutlich gemacht werden.

2. Hintergrund

Bauteile aus Stahl weisen nach ihrer Herstellung meist noch nicht die gewünschten Eigenschaften für den jeweiligen Verwendungszweck auf. Für Maschinenteile muss in vielen Fällen die Festigkeit weiter gesteigert werden. Bauteile, die noch verformt werden müssen, brauchen eine höhere Verformbarkeit oder auch Zähigkeit. Bohrer oder Fräser sind nach ihrer Herstellung zu weich und müssen härter gemacht werden. Um die Eigenschaften eines Bauteils oder Werkzeuges dem späteren Einsatz anzupassen, werden diese einer Wärmebehandlung unterzogen.

Eine Wärmebehandlung hat zum Ziel, die Struktur eines Werkstoffes durch einen bestimmten Temperatur-Zeit-Verlauf zu verändern, um die benötigten Werkstoffeigenschaften zu erreichen. Diese Struktur nennt man Gefüge.

Unter dem **Gefüge** versteht man das Zusammengefügtsein von Kristalliten (Körnern), Fremdphasen und Ausscheidungen in Metallen und Legierungen.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Arten und Ziele der Wärmebehandlung. Das Ziel des Härtens ist dabei eine Erhöhung der Härte und der Verschleißbeständigkeit eines Werkstückes.

Glühen	Härten	Vergüten
Ziel: Verbesserung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften durch z.B. bessere Verformbarkeit	Ziel: Erhöhung der Härte und Verschleißbeständigkeit	Ziel: Erhöhung der Festigkeit bei guter bzw. verbesserter Verformbarkeit
Beispiele: Grobkornglühen, Normalglühen, Weichglühen	Beispiele: durchgreifendes Härten, Laserstrahlhärten, Randschichthärten	Beispiele: Vergüten, Perlitisieren

Tabelle 1: Ziele und Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren

Damit man das Härten verstehen kann, muss man sich zunächst den Werkstoff Stahl genauer anschauen. Stahl ist im Wesentlichen eine Legierung mit mindestens 50% Eisen und weniger als 2% Kohlenstoff. Weitere wichtige Legierungselemente sind Chrom, Nickel, Silizium, Mangan Titan usw. Beim Härten kommt dem Kohlenstoff eine besondere Bedeutung zu, da dieser mit steigendem Gehalt die maximal mögliche Härte erhöht. So sind Stähle mit 0.1% Kohlenstoff praktisch nicht härtbar, während ansonsten gleiche Stähle mit 0.7% Kohlenstoff höchste Härten erzielen.

Kohlenstoff allein macht einen Stahl jedoch noch nicht hart. Wichtig ist weiterhin, wie wir den Stahl nach der Herstellung behandeln. Diese Wärmebehandlung hat unterschiedliche Abläufe im Stahl zur Folge, die wir näher betrachten müssen. Unter dem Mikroskop ist Stahl nicht mehr grau und einheitlich, sondern besitzt eine Struktur – das Gefüge.

Bei Raumtemperatur hat dieses Gefüge meist zwei Bestandteile: **Ferrit** und **Perlit**. Der Ferrit entspricht der Eisenstruktur bei Raumtemperatur. Der Perlit besteht aus Streifen von Ferrit und Zementit. Zementit ist die

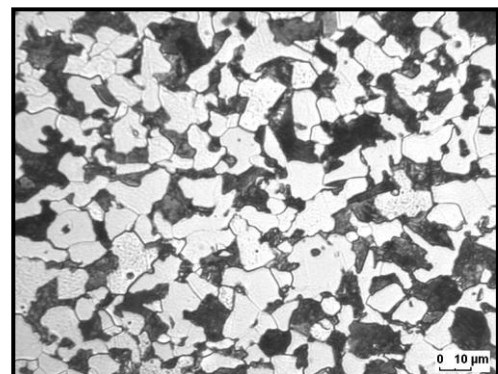


Abbildung 1: Ferrit (hell) Perlit (dunkel)



Abbildung 2: Austenit

Bezeichnung für den an Eisen gebundenen Kohlenstoff das Eisenkarbid mit der chemischen Formel Fe_3C .

Erwärmt man den Stahl auf etwa 950°C und betrachtet dessen Struktur wieder im Mikroskop, so stellt man eine Veränderung fest. Der Perlit ist verschwunden und wir finden nur noch eine gleichmäßige Eisenstruktur – den **Austenit**. Ferrit und Zementit sind bei so hohen Temperaturen nicht stabil und lösen sich beim Erwärmen auf. Diesen Vorgang bezeichnen wir als Austenitisierung. Der sich bildende Austenit bietet zwischen den Eisenatomen genug Platz für die Kohlenstoffatome. Dieser wird also im Eisengitter gelöst.

Kühlen wir den Stahl nun von 950°C langsam wieder auf Raumtemperatur ab, so verändert sich die Lage der Eisenatome zueinander erneut. Die Kohlenstoffatome finden nicht genug Platz, bewegen sich aus dem Eisengitter heraus und verbinden sich wieder mit dem Eisen zu Zementit. Beim Erreichen der Raumtemperatur liegt erneut das Ausgangsgefüge vor.

Wenn man den Stahl dagegen sehr schnell abkühlt, geschieht etwas anderes im Gefüge. Die Eisenatome nehmen zwar wieder ihre Struktur bei Raumtemperatur (Ferrit) ein, jedoch haben die Kohlenstoffatome durch die schnelle Abkühlung nicht genug Zeit, um sich aus dem Eisengitter herauszubewegen. Sie werden quasi eingequetscht, was eine starke Verspannung des Eisengitters bewirkt. Diese Verspannung macht den Stahl hart – ähnlich einer gespannten Bogensehne. Das entstehende Gefüge bezeichnen wir als **Martensit**. Da die Kohlenstoffatome bei Raumtemperatur nicht genügend Energie besitzen, um aus dem Eisengitter auszubrechen, bleibt diese Struktur erhalten, obwohl sie nicht dem Gleichgewicht oder natürlichem Zustand entspricht.

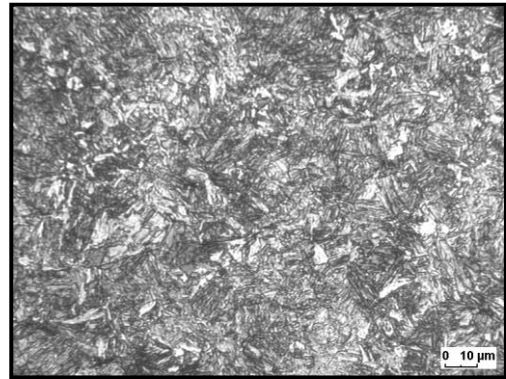
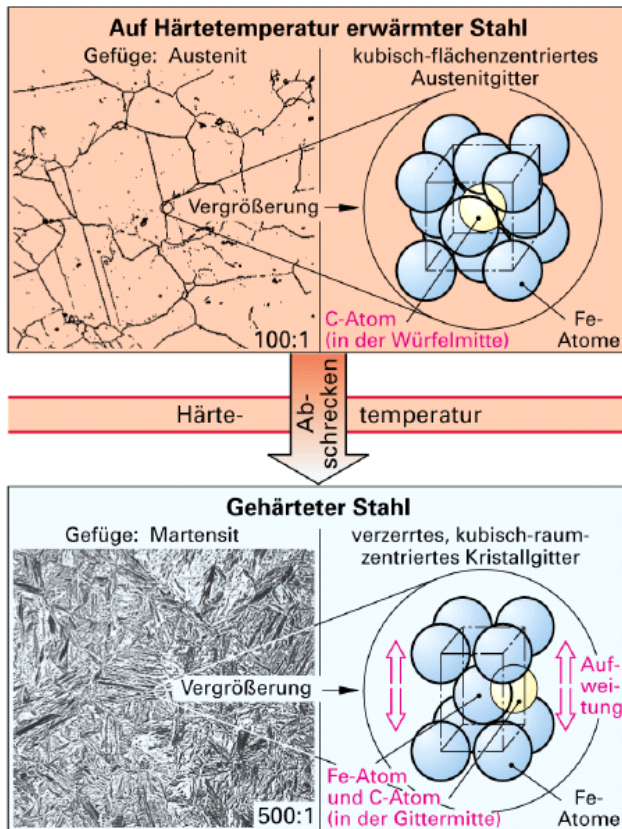


Abbildung 3: Martensit

Aus dem genannten Verlauf erkennt man, dass die wesentliche Voraussetzung für die Wärmebehandlung und damit auch das Härten von Stahl die Tatsache ist, dass er jeweils unterschiedliche Strukturen in unterschiedlichen Temperaturbereichen einnimmt. Diesen Strukturen kann man durch langsames Abkühlen Zeit zur Ausbildung geben (Gleichgewicht) oder sie durch schnelles Abkühlen in eine andere Form zwingen (Ungleichgewicht).



Austenit
 γ -Mischkristall
 kfz-Gitter
 weich und zäh

bei $v > v_k$
 diffusionslose Umwandlung

v_k - kritische Abkühlgeschwindigkeit

Martensit
 mit C übersättigter α -Mischkristall
 krz-Gitter (tetragonal verzerrt)
 hart und spröde

Abbildung 4: Martensitbildung

Der Ablauf einer Wärmebehandlung besteht aus drei Teilschritten: Erwärmen, Halten und Abkühlen. In Abbildung 5 ist der schematische Temperatur-Zeit-Verlauf für das Härten beispielhaft dargestellt. Zunächst wird der zu härtende Stahl langsam auf Härtetemperatur erwärmt. Dabei erwärmt sich die Oberfläche des Werkstückes natürlich schneller (Anwärmzeit), als dessen Kern (Durchwärmzeit). Die Haltedauer ist beim Härten sehr kurz. Meist kühlt man nach dem Erreichen der Durchwärmzeit sofort wieder ab. Nach dieser kurzen Haltedauer wird abgekühlt, was, wie oben angesprochen, beim Härten sehr schnell erfolgen muss.

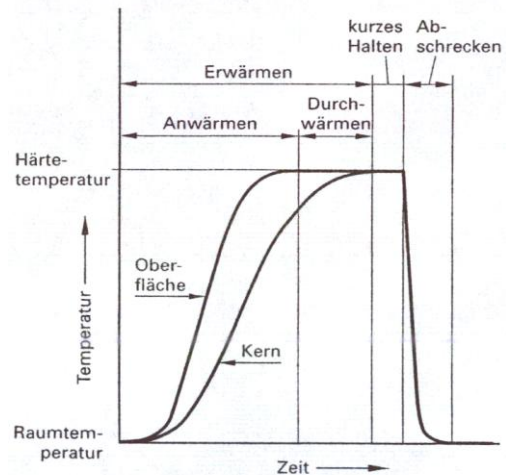


Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Verlauf beim Härten

Für das Abkühlen stehen verschiedenste Abkühlmedien zur Verfügung. Die Abkühlung kann z.B. an Luft, in Öl oder in Wasser erfolgen. Dabei ist mit Wasser die schnellste und mit Luft das langsamste Abkühlung möglich. Welches Abkühlmittel verwendet werden soll, hängt vom Ziel der Wärmebehandlung ab.

Wie wir bereits wissen, muss sich Martensit bilden, um eine Härtesteigerung zu erreichen. Damit dies geschieht, muss eine bestimmte Abkühlgeschwindigkeit erreicht werden, um die Bewegung der Kohlenstoffatome aus dem Eisengitter zu unterdrücken. Mit einem rein martensitischen Gefüge erreicht man die maximale Härte (obere kritische Abkühlgeschwindigkeit). Befinden sich noch Ferrit oder Perlit im Gefüge, ist die Härte entsprechend niedriger.

Um die obere kritische Abkühlgeschwindigkeit abschätzen zu können stehen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubilder (ZTU-Schaubilder) zur Verfügung (Abbildung 6). Diesem sind neben der Abkühlgeschwindigkeit folgende weitere Informationen zu entnehmen:

- chemische Zusammensetzung des Stahls
- Härtetemperatur
- Haltedauer
- die sich bildende Stahlstruktur bei bestimmten Abkühlgeschwindigkeiten
- die erreichbare Härte.

Auf der Abszisse ist die Zeit in Sekunden in logarithmischen Maßstab und auf der Ordinate die Temperatur in Grad Celsius bzw. in Kelvin dargestellt.

In Abbildung 6 entspricht die rote Kurve der oberen kritischen Abkühlgeschwindigkeit. Dabei durchläuft der Stahl nach der Abkühlung aus dem Austenitgebiet nur die Martensitphase. Es entsteht dabei ausschließlich **Martensit** und keine weiteren Phasen wie **Ferrit**, **Perlit** oder **Zwischenstufe** im Gefüge. Um also die maximale Härte zu erreichen, muss man die Abkühlung von der Härtetemperatur (880°C) auf die Temperatur für die Bildung von Martensit (400°C) innerhalb von fünf Sekunden erfolgen. Dies entspricht einer oberen kritischen Abkühlgeschwindigkeit von 80 K/s, was durch die Abkühlung in Wasser problemlos erreicht wird.

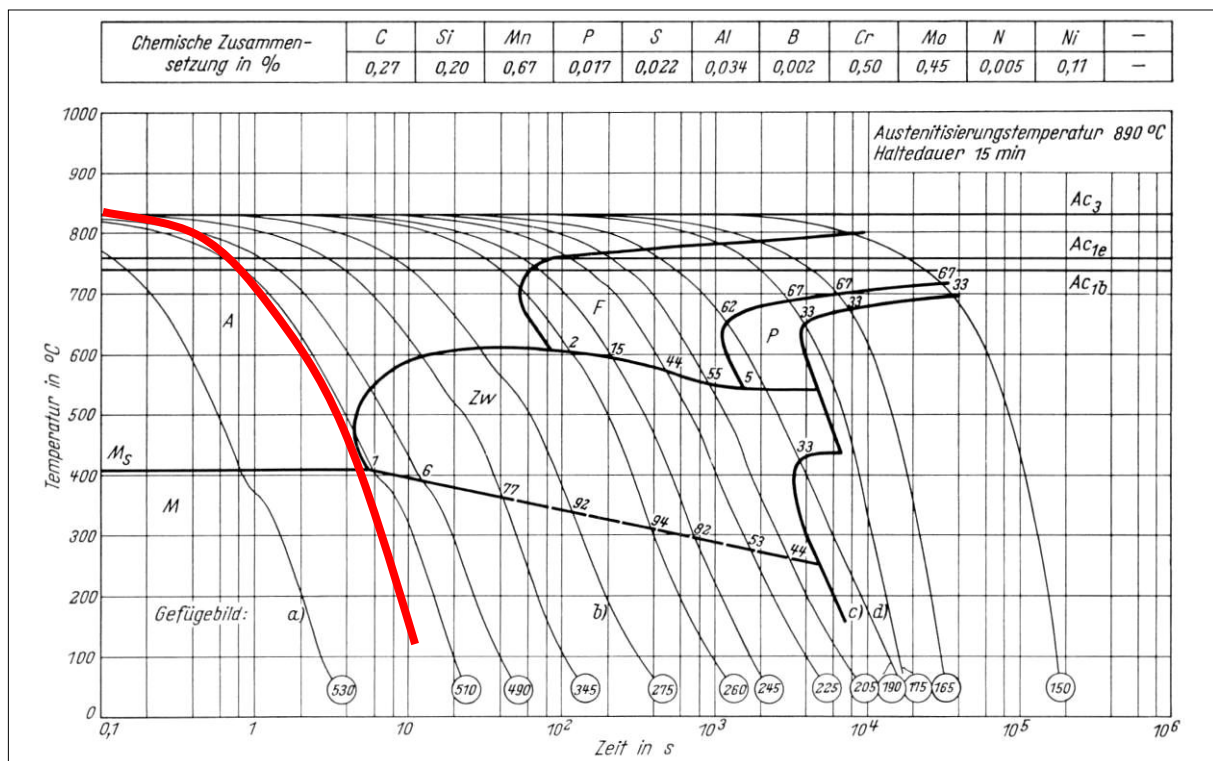


Abbildung 6: ZTU-Schaubild des Stahls 25CrMo4

Versuch: Grundlagen der Härteprüfung (Sekundarstufe II)

Modul: Härten von Stahl

Härte ist der Widerstand, den ein Körper aus einem bestimmten Werkstoff gegen das Eindringen eines Körpers aus einem anderen (härteren) Werkstoff entgegensetzt.

Mit der Härteprüfung kann die Qualität einer Wärmebehandlung einfach, schnell und ohne großen apparativen Aufwand beurteilt werden, denn es können:

- die mechanischen Eigenschaften sowohl einzelner Gefügebestandteile (z.B. Ferrit, Martensit), als auch dünner Schichten (z.B. Nitrierschichten, martensitisch gehärtete Randschicht) bestimmt werden,
- Härteverlaufskurven aufgenommen werden und damit beispielsweise geforderte Prüfgrößen wie Oberflächenhärte und Einhärtungstiefe ermittelt und beurteilt werden,
- mechanische Kenngrößen wie Zugfestigkeit und Streck- und Dehngrenze (z.B. nach einer Wärmebehandlung) abgeschätzt werden.

Große technische Bedeutung besitzen die Härteprüfverfahren, bei denen der Prüfkörper unter statischer (stoß frei und langsam) Belastung in den Prüfling eindringt. Der Prüfkörper wird dabei mit einer definierten Kraft in die Oberfläche des Prüflings eingedrückt und entweder die Größe des Eindrucks oder die Eindringtiefe gemessen.

In diesem Praktikum soll das Härteprüfverfahren nach Rockwell verwendet werden. Mit Hilfe der Härteprüfung nach Vickers wurden Proben nach der Wärmebehandlung bereits gemessen und die Werte liegen zum Vergleich für die Auswertung vor.

Beim **Härteprüfverfahren nach Vickers** wird als Eindringkörper eine vierseitige, regelmäßige Diamantpyramide mit 136° Spitzwinkel zwischen den gegenüberliegenden Flächen benutzt. Die Pyramide wird mit der Last F senkrecht in die Probe eingedrückt. Dann werden die Eindruckdiagonalen d auf $0,002\text{ mm}$ genau gemessen, ihr Mittelwert gebildet und die Vickershärte errechnet:

$$\text{Vickershärte} = \text{Konstante} \cdot \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Oberfläche des Eindrucks}}$$

$$\text{Vickershärte} = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (g_n = 9,80665)$$

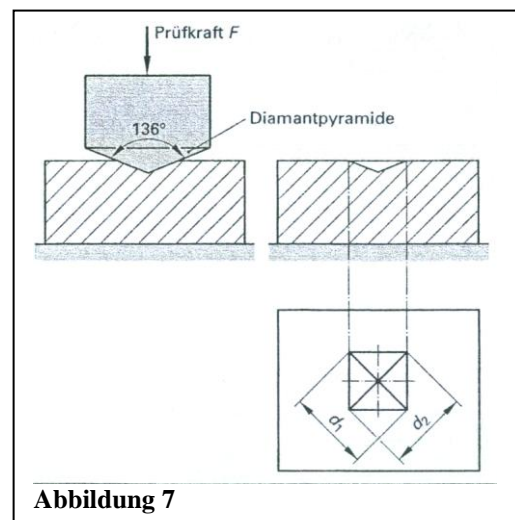


Abbildung 7

Tabellen gestatten ein einfaches Ablesen des Härtewertes mit Hilfe der gemessenen Eindruckdiagonalen d . Das Vickers-Verfahren eignet sich wegen der harten Diamantpyramide sowohl für sehr harte Werkstoffe (im Allgemeinen bis 940 HV) als auch für die Mikrohärtmessung ($F < 1\text{ N}$) einzelner Gefügebestandteile (z.B. $\text{HV } 0,05$ für Chrom- oder Titankarbide) und wegen der möglichen kleinen Prüfkraft für Messungen an dünnen Schichten und Folien.

Die Kurzbezeichnung der Härtemessung nach Vickers setzt sich zusammen aus:

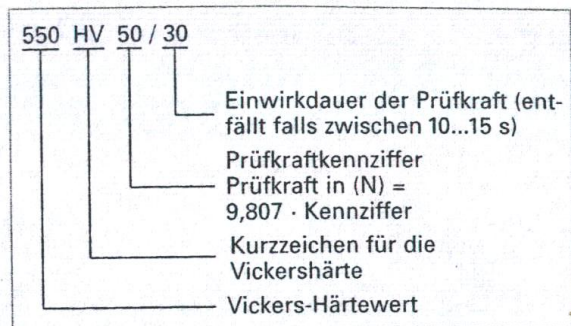


Abbildung 8

Beispiele:

640 HV 30: Vickershärtewert 640 wurde mit einer Prüfkraft von 294,2 N = 30 kp und einer Einwirkdauer von 10 bis 15 Sekunden bestimmt.

545 HV 1/20: Vickershärtewert 545 wurde mit einer Prüfkraft von 9,807 N = 1 kp und einer Einwirkdauer von 20 s bestimmt.

Für das **Härteprüfverfahren nach Rockwell** stehen als Eindringkörper eine Stahlkugel, eine Hartmetallkugel oder ein Diamantkegel zur Verfügung (Abbildung 9).

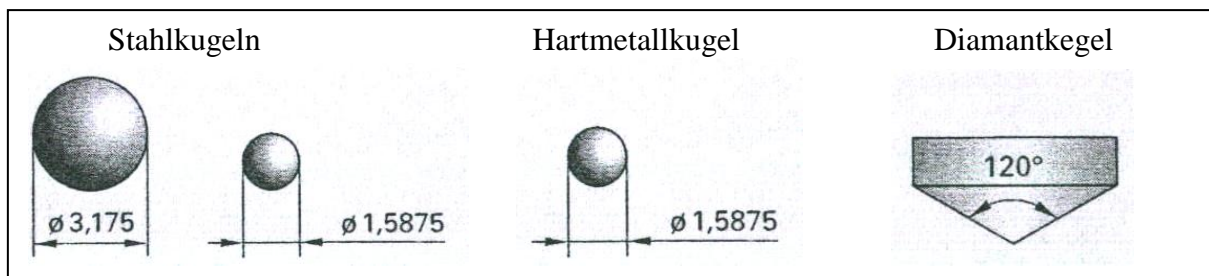


Abbildung 9: Mögliche Eindringkörper beim Härteprüfverfahren nach Rockwell

Die Stahlkugel wird für weiche bis mittelharte Werkstoffe eingesetzt, da sie sich bei höheren Prüfkraften abplattet und somit die Messung verfälscht. Die Hartmetallkugel wird in wenigen speziellen Fällen eingesetzt, wohingegen der Diamantkegel bei jedem metallischen Werkstoff Anwendung findet.

Um einen Härtewert errechnen zu können, wird die Eindringtiefe gemessen. Insgesamt ergeben sich folgende drei Arbeitsschritte, welche im Bild 4 prinzipiell dargestellt sind.

1. Der Eindringkörper wird mit einer bestimmten Prüfkraft F_0 in die Oberfläche des zu prüfenden Werkstoffes eingedrückt. Diese Vorlast soll unregelmäßige Einflüsse der Oberflächenschicht (Oxidschichten, Rauigkeit usw.) ausschließen. Durch diese Vorlast dringt der Prüfkörper zunächst um die Strecke t_0 in den zu prüfenden Werkstoff ein.
2. Danach wird die Prüfkraft F_1 aufgebracht. Dabei dringt der Prüfkörper um einen weiteren Betrag Δt ein. Die Prüfkraft F_1 ist 2 bis 8 Sekunden nach der Vorlast aufzubringen und etwa 4 Sekunden konstant zu halten.
3. Am Schluss wird wieder auf die Vorlast F_0 entlastet. Dabei bewegt sich der Eindringkörper um den elastischen Anteil der Verformung t_{el} nach oben zurück, so dass die bleibende Eindringtiefe t_{bl} ($t_{gesamt} - t_0$) gemessen werden kann.

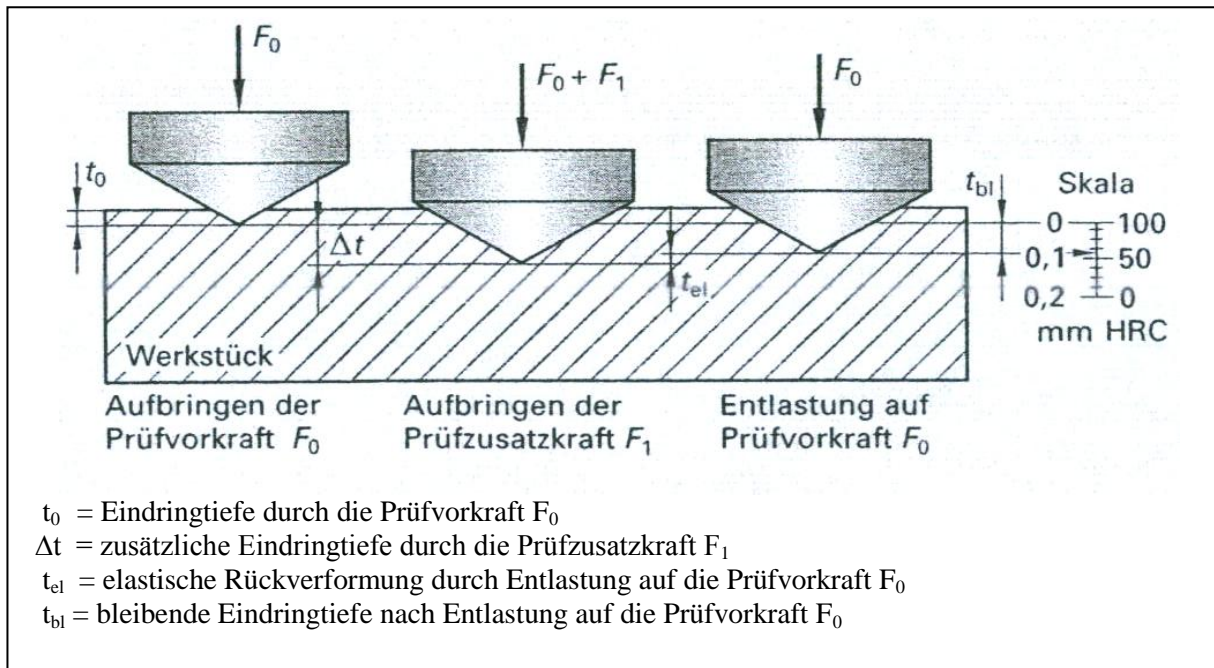


Abbildung 10: Prinzip der Härtemessung nach dem Rockwell-Verfahren

Je nach Prüfvorkraft, Prüfszusatzkraft und Art des Eindringkörpers unterscheidet man zwischen verschiedenen Rockwell-Prüfverfahren. Mit dem Rockwell-B-Verfahren (Eindringkörper Stahlkugel, engl. ball) und dem Rockwell-C-Verfahren (Eindringkörper Kegel, engl. cone) sollen hier nur zwei der geläufigsten Verfahren vorgestellt werden.

Härteskala	Symbol	Art des Eindringkörpers	Prüfvorkraft F_0	Prüfgesamtkraft $F_1 + F_0$
B	HRB	Stahlkugel, $\varnothing 1,5875$ mm	98,07 N	980,7 N (100 kp)
C	HRC	Diamantkegel, Spitzenwinkel 120°	98,07 N	1471 N (150 kp)

Der Rockwell-Härtewert kann entweder direkt am Prüfgerät abgelesen werden (siehe Abbildung 11),

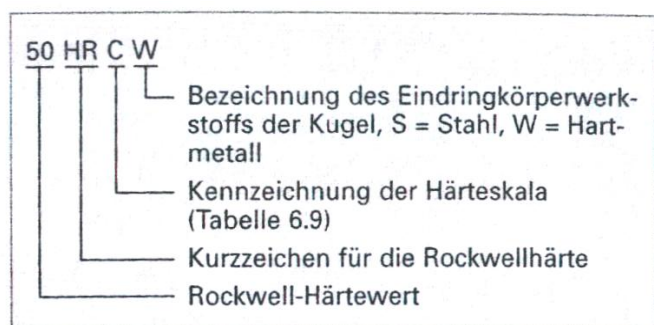


Abbildung 11

oder aus der gemessenen Eindringtiefe nach folgender Formel berechnet werden:

$$HR = Z - \frac{t_{bl}}{SK} \quad (1)$$

Symbol	Zahlenwert Z	Skalenteilung SK	
HRB	130	0,002 mm	Rockwellhärte = $130 - \frac{h}{0,002}$
HRC	100	0,002 mm	Rockwellhärte = $100 - \frac{h}{0,002}$

Darin bedeuten:

HR = Härtewert nach Rockwell

Z = Zahlenwert, der vom gewählten Rockwell-Verfahren abhängt

t_{bl} = bleibende Eindringtiefe in mm (entspricht in der Tabelle oben *h*)

SK = Skaleneinteilung in mm, die vom gewählten Rockwell-Verfahren abhängt

Im folgenden Beispiel wird die Härte nach Rockwell errechnet. Mittels des Rockwell-Verfahrens wurde die Härte HRC (Kegeldruckhärte) gemessen. Dabei wurde ein Zahlenwert von $Z = 100$ und eine Skaleneinteilung von $SK = 0,002$ mm abgelesen. Aus dem Abdruck des Prüfkörpers wurde eine bleibende Eindringtiefe von 0,12 mm bestimmt. Damit beträgt der Rockwell-Härtewert:

$$HRC = 100 - \frac{0,12\text{mm}}{0,002\text{mm}} = 100 - 60 = 40 \quad (2)$$

Wie wir bereits wissen, ist der Kohlenstoffgehalt maßgeblich für die Härte eines Stahls. Deshalb besteht die Möglichkeit, die Härte nach Rockwell aus dem vorhandenen Kohlenstoffgehalt abzuschätzen. Dafür stehen folgende Formeln zur Verfügung:

$$HRC = 36 + 50 \cdot \%C \quad (3)$$

$$HRC = 60 \cdot \sqrt{\%C} + 20. \quad (4)$$

3. Versuchsmaterial und Geräte

Die Versuche werden zunächst in einem Muffelofen durchgeführt. Die Temperatur kann an der Frontseite abgelesen werden. Nach dem Erreichen der Härtetemperatur werden die Proben aus dem Ofen entnommen und mittels verschiedener Kühlmedien abgekühlt. Danach erfolgt eine kurze Präparation, um abschließend mit Rockwell-Härteprüfer die Härte der Proben bestimmen zu können. Über eine kleine Umrechnungstabelle kann daran der Härtewert abgelesen werden.

4. Versuchsdurchführung

Die vorbereiteten Proben aus drei verschiedenen Stählen werden im Ofen platziert und auf die Härtetemperatur erwärmt. Danach werden sie aus dem Ofen entnommen und in Wasser und Luft abgekühlt. Die Probenstücke sollten gekennzeichnet werden, damit später keine Verwechslungen auftreten.

Nach dem vollständigen Abkühlen der Proben werden diese angeschliffen, um eine einwandfreie Härtemessung zu ermöglichen. Damit wird die Härte jeder Probe mehrmals bestimmt und ein Mittelwert berechnet. Die Härtewerte werden anschließend in Bezug zum Kohlenstoffgehalt, zur Abkühlgeschwindigkeit und zum entstandenen Gefüge gesetzt.

Literatur

Eckstein, H.-J.: Wärmebehandlung von Stahl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969

Läpple, Volker: Wärmebehandlung des Stahls. Grundlagen, Verfahren und Werkstoffe. 9. Auflage, Europa-Lehrmittel