

WERKSTOFFTECHNIK-GRUNDPRAKTIKUM

Versuch G4: Wärmebehandlung von Stählen

Inhalt

- 1 Einleitung**
- 2 Grundlagen**
 - 2.1 Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild**
 - 2.2 Zeitabhängige Zustandsänderungen**
- 3 Verfahren der Wärmebehandlung**
 - 3.1 Glühverfahren**
 - 3.2 Härten**
 - 3.3 Vergüten**
 - 3.4 Oberflächenhärten**
- 4 Härbarkeit**
- 5 Stirnabschreckversuch nach DIN EN ISO 642**
- 6 Versuchsdurchführung**
- 7 Fragen zum Thema Wärmebehandlung von Stählen**
- 8 Literatur und Weblinks**

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Testat: _____

Vorbemerkung

Die in den Kapiteln 1 bis 4 beschriebenen Informationen dienen als Grundlagenwissen zur Wärmebehandlung von Stählen. Kapitel 5 und 6 beschreiben den Versuchsaufbau und -durchführung des Stirnabschreckversuchs nach DIN EN ISO 642.

1 Einleitung

Viele Eigenschaften der Stähle, insbesondere die mechanischen Eigenschaften, sind vom Mikrogefüge abhängig (Bild 1). Nach dem Gießen und Warmumformen liegt ein Gefüge vor, das im Wesentlichen durch den Kohlenstoffgehalt des Stahles, aber auch durch andere im Stahl vorhandene Elemente bestimmt ist. Sehr viele Stähle kommen in diesem "unbehandelten" Zustand zum Einsatz, andere werden nach einer Kaltumformung (z.B. Kaltwalzen) definiert gegläht. Vor allem die legierten Stähle durchlaufen eine oder mehrere Wärmebehandlungen, damit die Ausgangsprodukte für die Verarbeitung und die Bauteile für ihren Einsatz das optimale Gefüge und somit die gewünschten Eigenschaften erreichen.

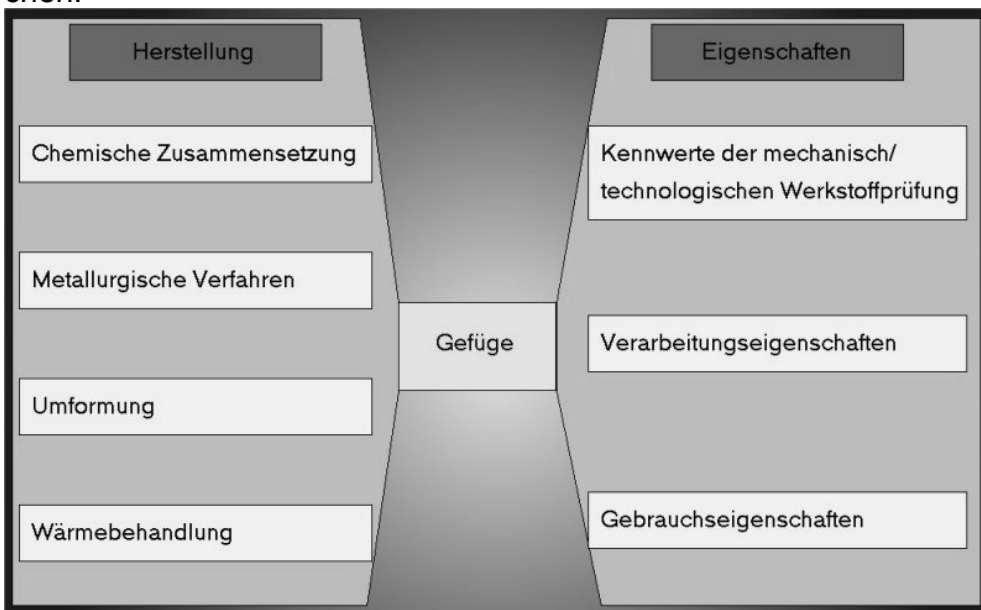


Bild 1: Gefügeeinstellung und Eigenschaften durch die Herstellungsbedingungen

Von überragender Bedeutung für alle diese Fertigungsabläufe, besonders aber für die Wärmebehandlung der letzteren Gruppe, sind grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse, die im Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff und in weiteren Schaubildern, die den Faktor Zeit bei den Gefügeveränderungen berücksichtigen, dargestellt.

2 Grundlagen

2.1 Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff (Bild 2) ist ein Zweistoffsystem und macht Aussagen über Gleichgewichtsverhältnisse im System Eisen-Kohlenstoff. Es bildet eine wichtige Grundlage für technische Eisenlegierungen, insbesondere für die Wärmebehandlung von Stählen, mit der man neben der Auswahl von Legierungselementen gezielt Einfluss auf deren Eigenschaften nehmen kann. Mit Hilfe des Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes wird festgestellt, in welchem Zustand sich ein unlegierter Stahl mit bekanntem Kohlenstoffgehalt bei einer bestimmten Temperatur befindet und welche Gefügeveränderungen bei Temperaturänderungen zu erwarten sind.

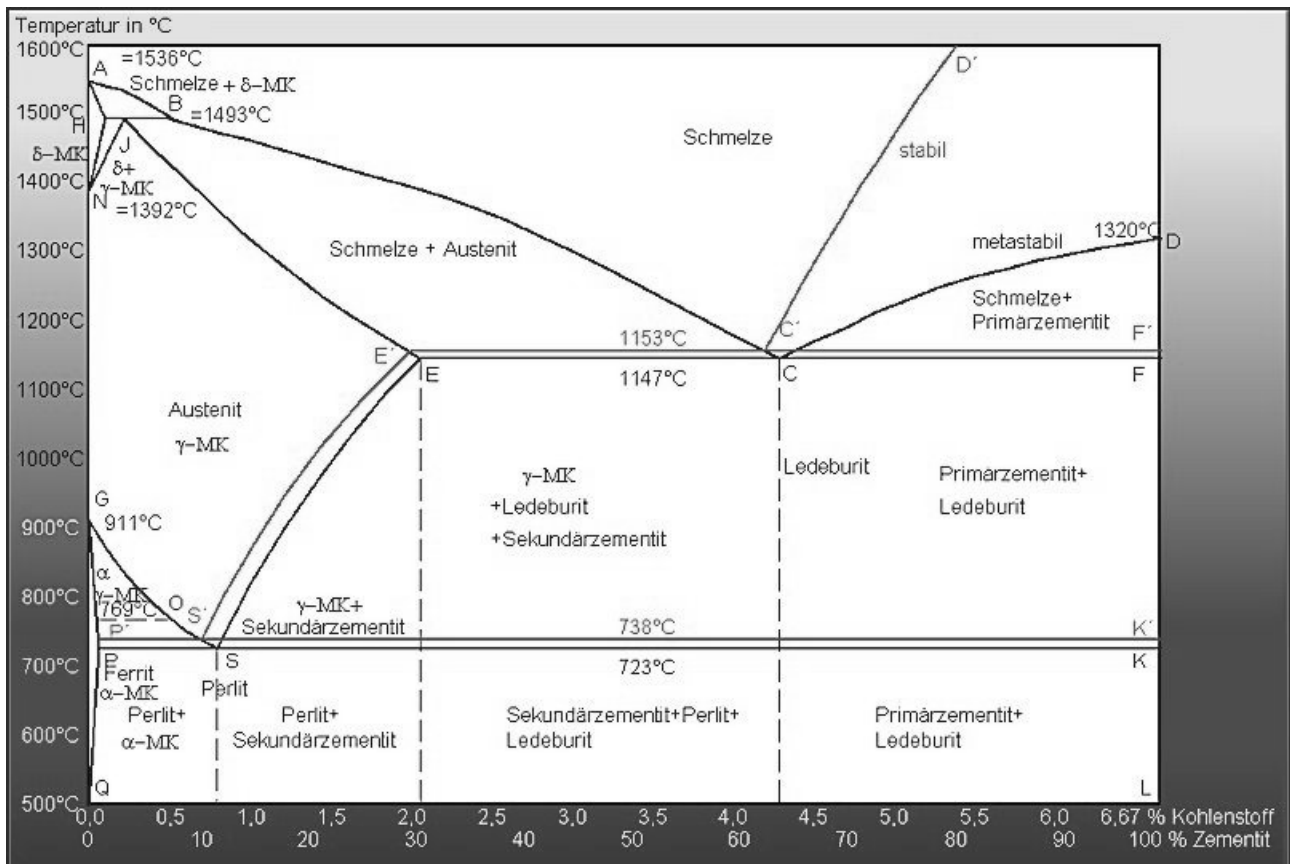


Bild 2: Eisen-Kohlenstoff-Schaubild

Eisen (Fe) ist ein Schwermetall (Dichte 7.85 g/cm^3) und ist als reines Metall zäher und weicher als Stahl. Es wird technisch nur für ganz bestimmte Aufgaben verwendet. Kohlenstoff (C) kann in der Natur in verschiedenen Modifikationen vorkommen (Graphit oder Diamant). In Eisenwerkstoffen liegt er atomar in den Mischkristallen Ferrit und Austenit vor, gebunden an Eisen als Eisenkarbid (Zementit) oder ungebunden als Graphit. Der Kohlenstoff ist ein wichtiges Begleitelement des Eisens und geringe Unterschiede im Gehalt beeinflussen die mechanischen und technologischen Stahleigenschaften deutlich.

2.2 Zeitabhängige Zustandsänderungen

Die Zustandsschaubilder beschreiben Gleichgewichtsverhältnisse in Legierungen, z.B. im System Eisen-Kohlenstoff, die sich nur bei sehr langsamen Temperaturänderungen einstellen. Bei der technischen Wärmebehandlung treten allerdings rasche Temperaturänderungen bei der Prozessführung auf. Da die Diffusion der Elemente eine zeitabhängige Größe ist, hat die Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf den kristallinen Zustand des metallischen Werkstoffes. Dies bedeutet, dass Zustandsdiagramme nur teilweise auf die jeweiligen Wärmebehandlungsverfahren anwendbar sind, da sie Art und Zusammensetzung der Phasen während der Temperaturführung nicht immer widerspiegeln. Es wird also eine andere Darstellungsweise gewählt, welche die Zeitabhängigkeit der Umwandlungen berücksichtigt.

Bild 3 zeigt im Zusammenhang eine Austenitisierung (isothermes ZTA-Schaubild) und die Phasenumwandlung bei stetiger Abkühlung (kontinuierliches ZTU-Schaubild) am Beispiel eines unlegierten Stahles mit 0.45% C. Sie zeigt schematisch eine Prozessführung, wie sie bei technischen Wärmebehandlungsprozessen durchgeführt wird.

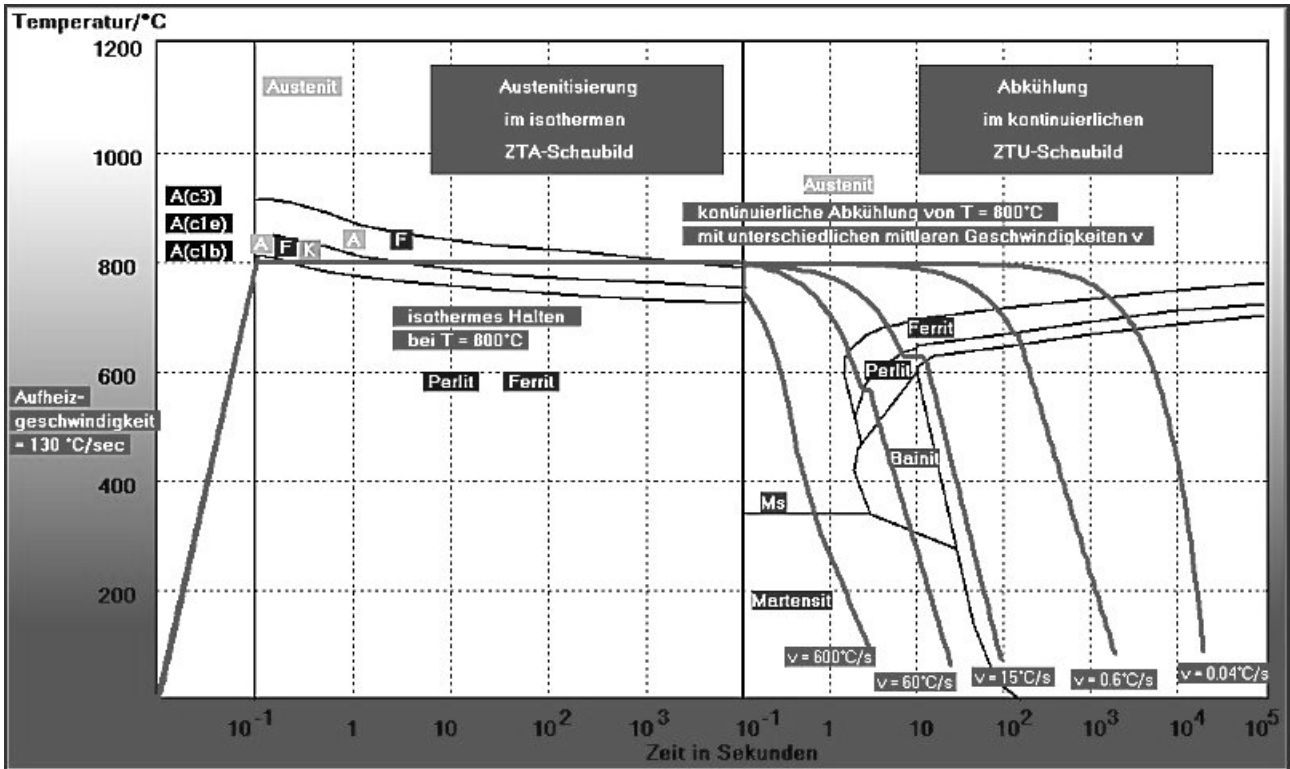


Bild 3: ZTA/ZTU-Schaubild für einen unlegierten Stahl mit C = 0.45 % (schematisch)

3 Verfahren der Wärmebehandlung

3.1 Glühverfahren

Als Glühverfahren werden die Wärmebehandlungsverfahren bezeichnet, bei denen auf eine bestimmte Glühtemperatur erwärmt und bei dieser definiert gehalten wird, sowie anschließend, in der Regel ein langsamer Abkühlungsprozess stattfindet. Bild 4 zeigt schematisch für Glühverfahren den Temperaturbereich, im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild, bei denen die entsprechende Wärmebehandlung durchgeführt wird.

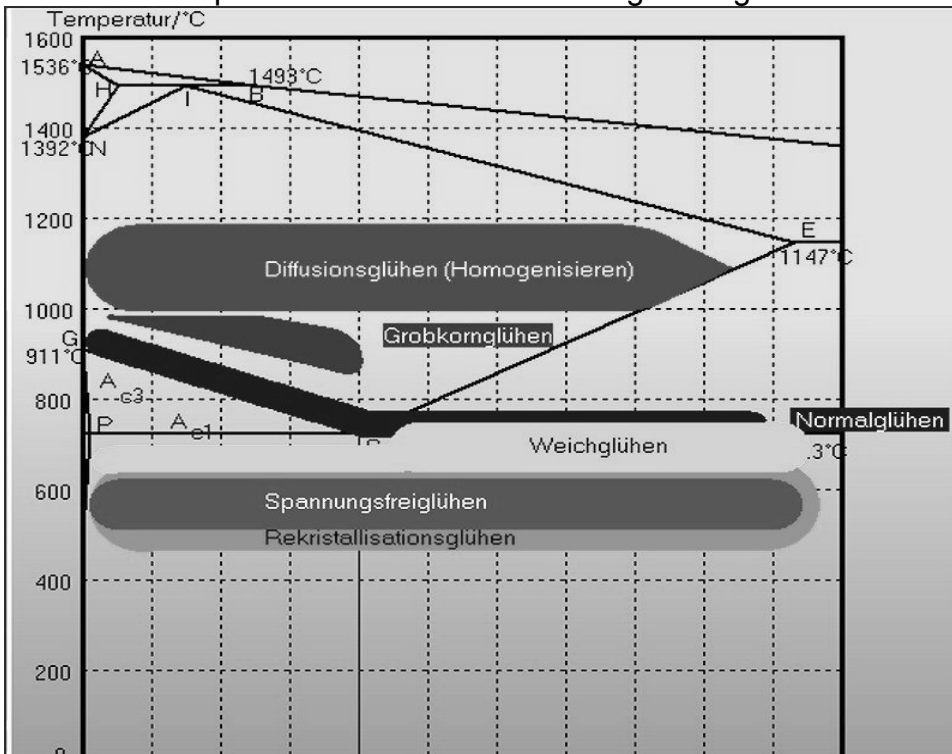


Bild 4: Schematische Darstellung der Temperaturführung verschiedener Glühverfahren im EKS

Normalglühen: Es wird ein möglichst feinkörniges Gefüge mit Perlit angestrebt um eine gute Kombination von Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften zu erreichen.

Diffusionsglühen (Homogenisieren): Wird durchgeführt um örtliche Konzentrationsunterschiede im Werkstoff auszugleichen, mit dem Ziel einer gleichmäßigen Verteilung löslicher Bestandteile.

Grobkornglühen: Glühen bei einer Temperatur im Austenitgebiet mit ausreichend langem Halten um ein gröberes Korn zu erzielen. Wird zur Verbesserung der spanabhebenden Bearbeitung bei untereutektoidischen Stählen durchgeführt.

Spannungsfreiglühen: Wird durchgeführt um Spannungen, die infolge ungleicher Erwärmung (z.B. beim Schweißen) aufgetreten sind, auszugleichen.

Rekristallisationsglühen: Eigenschaftenänderungen durch vorhergehende Kaltverformung werden rückgängig gemacht. Dabei wird eine Kornneubildung ohne Phasenumwandlung erreicht.

Weichglühen: Glühen bei einer Temperatur dicht unter Ac1 (eventuell auch oberhalb Ac1) oder pendeln um Ac1. Wird zur Verbesserung der spanlosen Umformbarkeit durchgeführt.

3.2 Härten

Härten ist das Abschrecken von kohlenstoffhaltigen Stählen nach dem Austenitisieren mit so großer Geschwindigkeit, dass eine Härtesteigerung, vorzugsweise durch Bildung von Martensit, in mehr oder weniger großen Bereichen des Werkstückes stattfindet (siehe Bild 5). Die Umwandlungshärtung ist nur bei Werkstoffen möglich, die eine γ - α -Umwandlung durchlaufen. Unlegierte Stähle mit mindestens 0.2% Kohlenstoff besitzen gute Voraussetzungen für diese Härtung. Der im Austenit (Gamma-Eisen) gelöste Kohlenstoff kann bei schneller Abkühlung nicht mehr diffundieren und bleibt in einem verspannten Ferritgitter (Martensit) zwangsgelöst. Stähle mit weniger als 0.2% Kohlenstoff müssen extrem schnell abgekühlt werden, damit Martensit auftritt; außerdem hat der Martensit wegen des niedrigen Gehaltes an Kohlenstoff keine allzu hohe Härte. Beim Umwandlungshärten wird, je nach Abschreckmittel zwischen Wasser-, Öl- oder Lufthärten unterschieden. Die Darstellung zeigt schematisch die Prozessführung beim Härten eines unlegierten Stahles mit 0.45% Kohlenstoff, der üblicherweise in Wasser "abgeschreckt" wird.

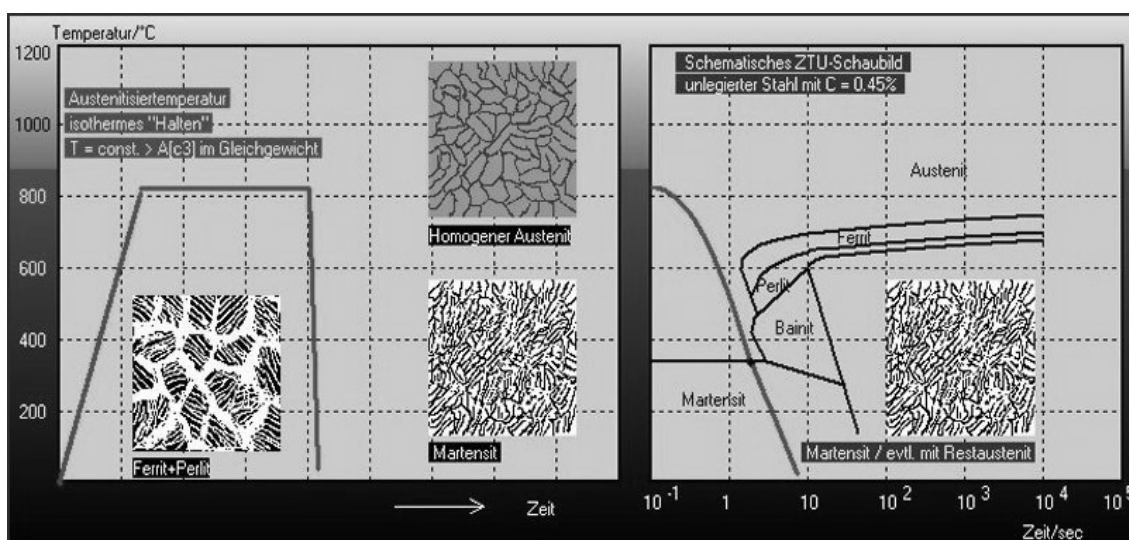


Bild 5: Schematische Prozessführung beim Härten

3.3 Vergüten

Das Vergüten besteht aus einem Härten und einem anschließenden Anlassen, das bei Temperaturen unterhalb von A_{c1} stattfindet (siehe Bild 6). Eine Verbesserung der Zähigkeit kommt z. B. bei einem Ferrit-Perlitgefüge dadurch zustande, dass durch das Härten und dem anschließendem Ausscheiden feinverteilter kugeligter Karbide beim Anlassen ein gleichmäßigeres Gefüge entsteht als im unbehandelten Zustand. Die durch das Härten entstandenen Verspannungen werden mit Hilfe des Anlassens weitestgehend rückgängig gemacht. Mit Hilfe dieses Verfahrens können in Konstruktionsteilen hohe Festigkeitswerte bei guter Zähigkeit erzielt werden. Durch das Vergüten steigen im Vergleich zum normalgeglühten Zustand Zugfestigkeit, Streckgrenze und die Härte, ebenso in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur auch Brucheinschnürung, Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit.

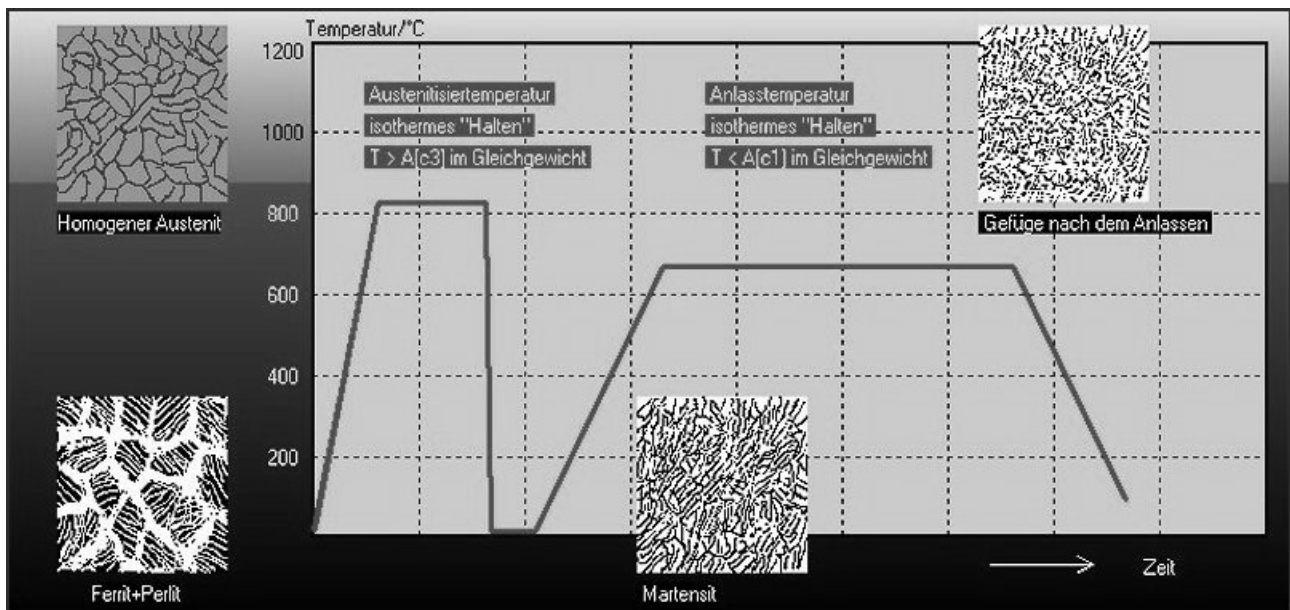


Bild 6: Schematische Prozessführung beim Vergüten

3.4 Oberflächenhärten

Unter dem Oberflächenhärten, auch Randschichthärten, werden die Verfahren zusammengefasst die das Härten der äußeren Schicht beinhalten. Alle Verfahren bezwecken, dass dem Bauteil oder Werkzeug eine harte und verschleißfeste Oberfläche gegeben wird.

Oft eingesetzte Verfahren der Oberflächenhärten sind:

- Einsatzhärten
- Nitrieren und Carbonitrieren
- Flammhärten
- Induktionshärten

4 Härbarkeit

Die oben beschriebenen optimalen Eigenschaften durch das Vergüten werden aber nur dann erzielt, wenn das Ausgangsgefüge martensitisch, ggf. noch bainitisch ist. Ebenso sind bei Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, die einsatzgehärtet werden, die optimalen Kerneigenschaften in Bauteilen nur in einem bainitisch/martensitischen Gefüge vorhanden. Für die Stahlauswahl für ein bestimmtes Bauteil ist also wichtig, welches Gefüge und welche Härte man bei einer bestimmten Wärmebehandlung erzielen kann. Da die Bestimmung der Härte weniger aufwendig ist als eine Gefügeuntersuchung und in knappen Zahlen auszudrücken ist, wird diese Abhängigkeit der von der Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren in einem einfachen Versuch, dem Stirnabschreckversuch, bestimmt und Härbarkeit genannt.

Untereutektoide Stähle ($C < 0.8\%$) werden auf ca. 30 bis 50°C oberhalb der GOS-Linie erwärmt (austenitisiert) und nach dem Abschrecken besteht das Gefüge aus Martensit. Übereutektoide Stähle ($C > 0.8\%$) werden aus dem Zweiphasengebiet (Eisen+Zementit) zwischen ca. 780°C und 800 °C abgeschreckt. Eine Erhöhung der Härtetemperatur hat keine Härtesteigerung zur Folge, da der Anteil an Restaustenit zunimmt und im Gegenteil ein Härteabfall erfolgt. Die für die Stahlhärtung notwendigen Abkühlgeschwindigkeiten, Informationen über die Gefügezusammensetzung und Härtewerte können dem jeweiligen kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern (ZTU-Schaubild) entnommen werden.

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Aufhärbarkeit von Stählen hat der Kohlenstoff. Bis zu einem C-Gehalt von ca. 0.6% steigt die Härte an (siehe Bild 7). Mit einer weiteren Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes ist keine merkliche Härtesteigerung mehr möglich. Bei unlegierten Vergütungsstählen erzielt man bis ca. 10 mm Probertiefe eine Durchhärtung. Bei größeren Bauteilabmessungen ist demzufolge keine Durchhärtung mehr möglich.

Durch das Zulegieren von Legierungselementen, z.B. Chrom, Nickel, Mangan, Vanadium und Molybdän kann die Einhärbarkeit merklich verbessert werden (siehe Bild 8). Dies wirkt sich günstig auf die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften aus. Das bedeutet das größere Bauteilabmessungen durchhärbar sind und die Neigung zum Verzug und Härterissbildung wird verringert. Wegen der Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung (unterschiedliche Chargen) kommt es auch bei einer Stahlart zu unterschiedlichen Härteverläufen und damit zu einem Streuband bei der Aufnahme mehrerer Härteverläufe bei einer Stahlqualität (siehe Bild 9).

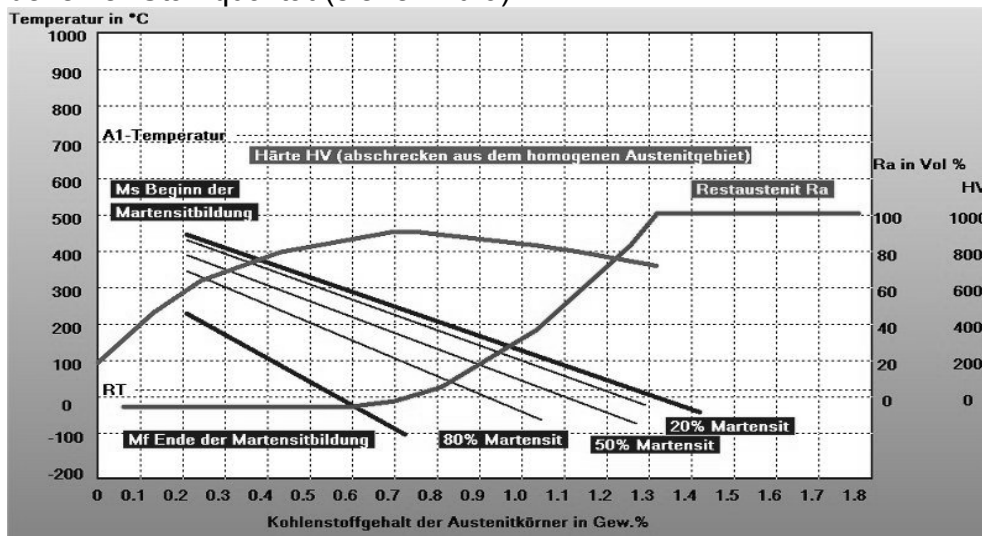


Bild 7: Abhängigkeiten vom C-Gehalt in unlegierten Stählen (Wärmebehandlung des Stahls, Europa Verlag)

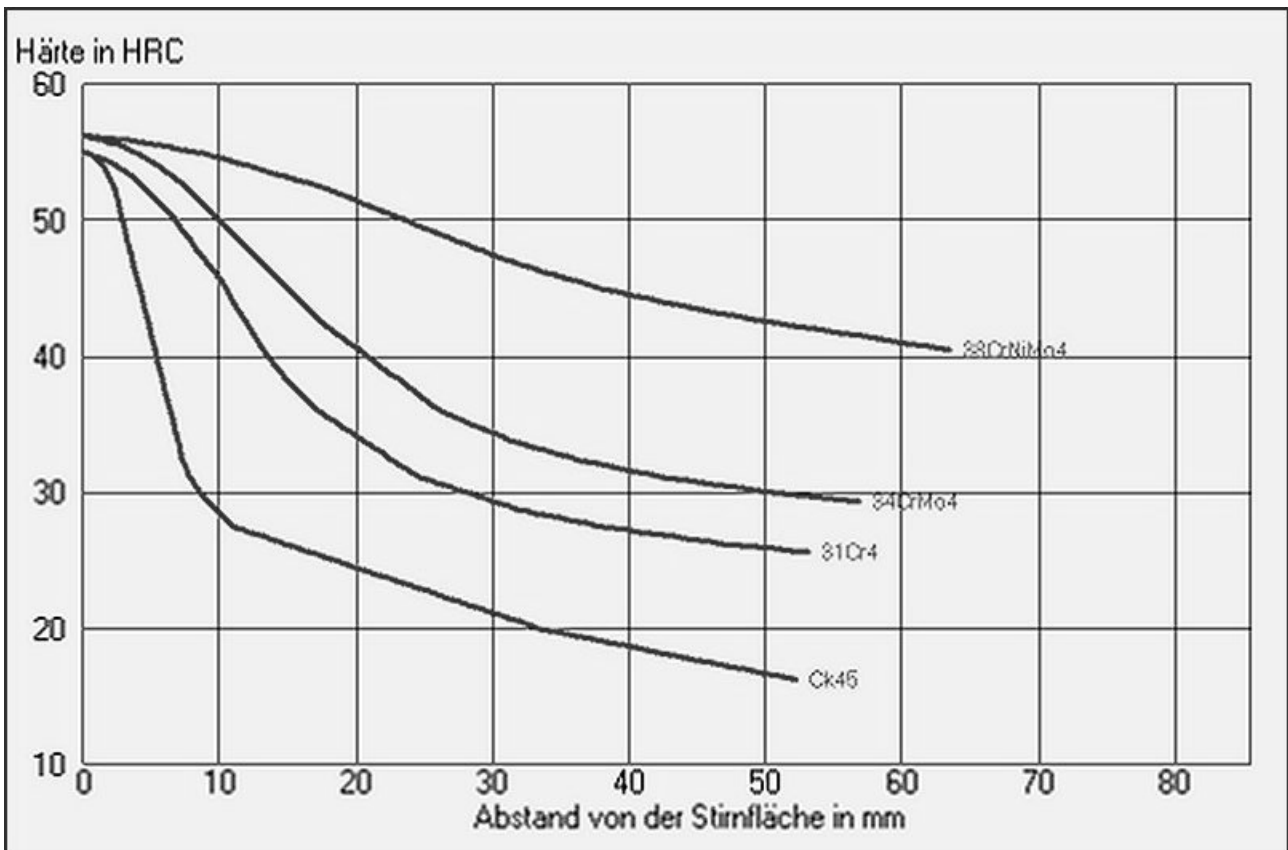


Bild 8: Einfluss der Legierungselemente auf die Einhärbarkeit

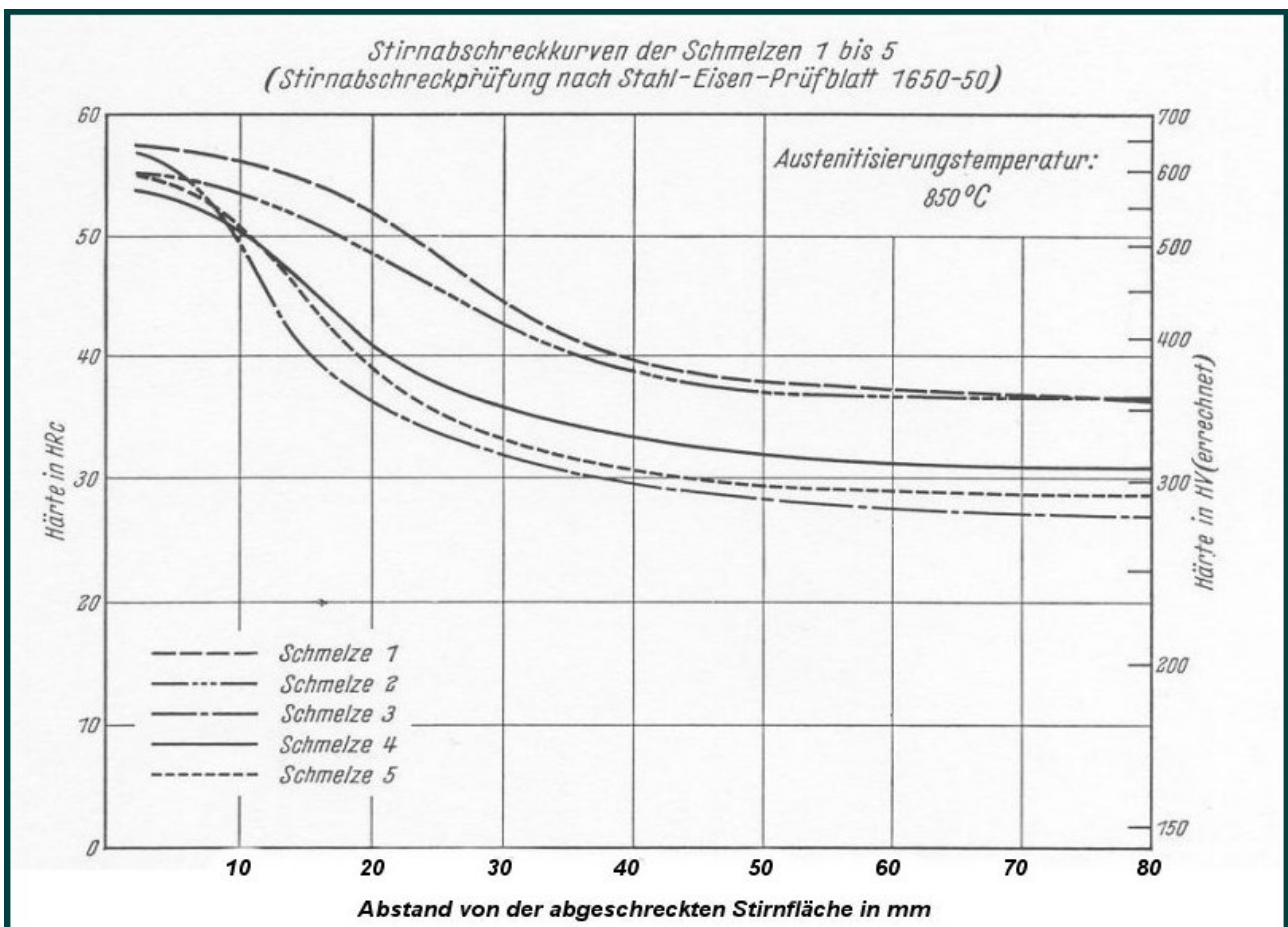


Bild 9: Härteverläufe unterschiedlicher Chargen (Vergütungsstahl 42CrMo4)
(Rose: Atlas der Wärmebehandlung, Verlag Stahleisen)

5 Stirnabschreckversuch nach DIN EN ISO 642

Der Stirnabschreckversuch (Jominy-Versuch benannt nach W.E. Jominy) nach DIN EN ISO 642 (bisher DIN 50191) ist ein Verfahren zur Prüfung der Härtebarkeit aufgrund des Umwandlungsverhaltens von Stählen an zylindrischen Proben.

Die Härtebarkeit beinhaltet die **Aufhärbarkeit** und **Einhärbarkeit**.

Aufhärbarkeit: Gibt die maximal erreichbare Härte an.

Einhärbarkeit: Aufnahme des Härteverlaufes (Härte in entsprechender Tiefe).

Zum Einsatz kommen in der Regel:

- Vergütungsstähle
- Einsatzstähle
- Nitrierstähle
- Stähle zum Flamm-, Induktions- und Tauchhärten.

Im Stirnabschreckversuch wird eine zylindrische Stahlprobe von 100 Millimeter Länge und 25 Millimeter Durchmesser nach einem Normalisieren auf Härtetemperatur erwärmt, dann innerhalb von 5 Sekunden aus dem Ofen genommen in die Abschreckeinrichtung überführt und an der Stirnseite von unten mindestens 10 min lang mit einem 20° C warmen Wasserstrahl abgeschreckt (siehe Bild 10).

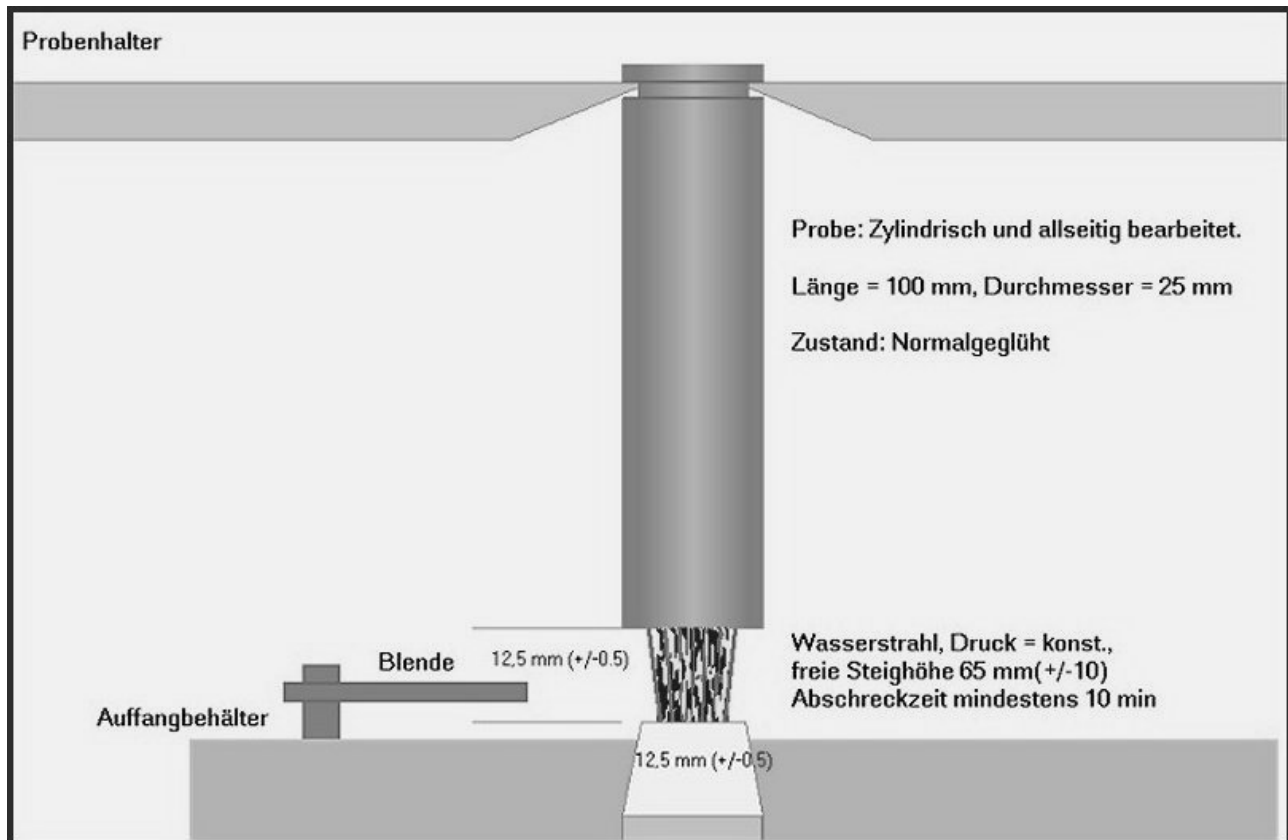


Bild 10: Versuchseinrichtung für den Stirnabschreckversuch nach DIN EN ISO 642

Zwei gegenüberliegende Zylindermantelflächen werden um 0,4 bis 0,5 Millimeter plan abgeschliffen. Anschließend wird ausgehend vom jeweiligen Rand der abgeschreckten Stirnfläche in der Schrittweite (1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 25 - 30 - ... Millimeter) die Härte nach Rockwell HRC oder nach Vickers HV30 gemessen (siehe Bild 11).

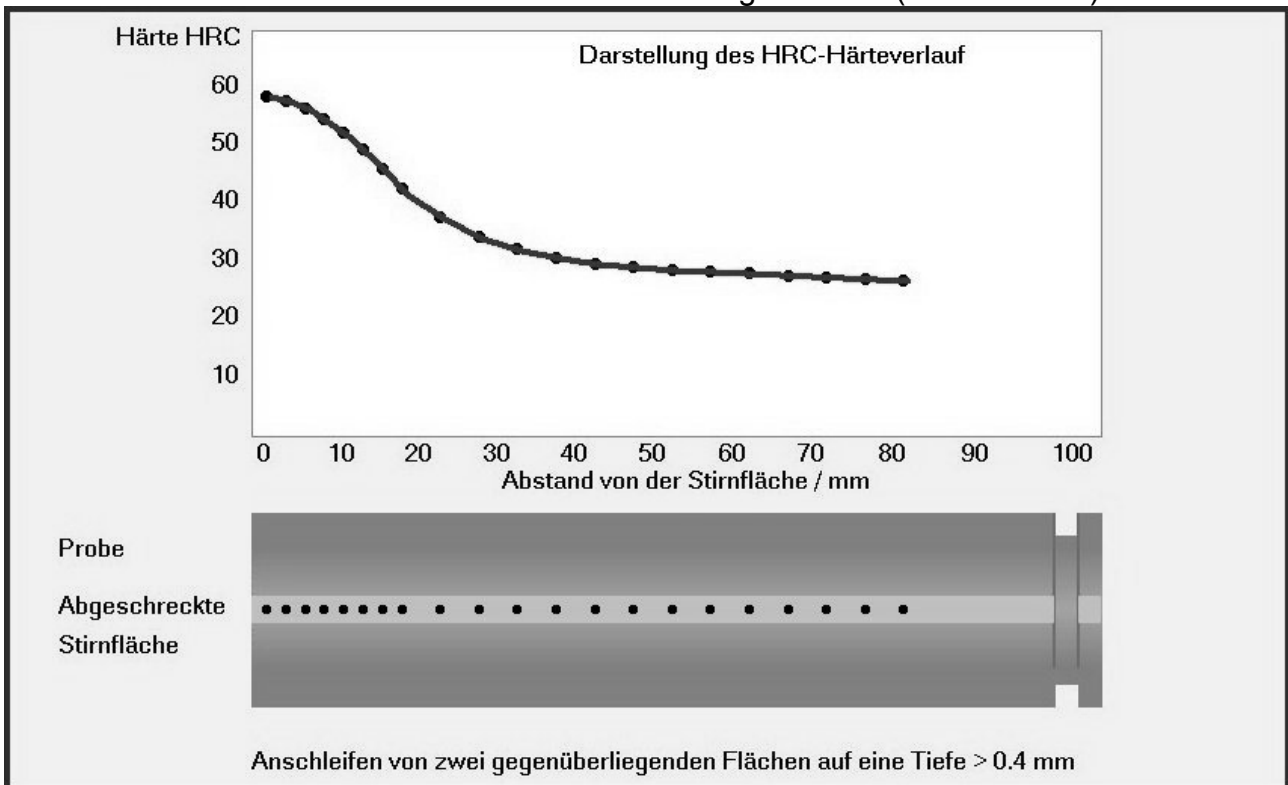


Bild 11: Härteverlaufskurve (HRC) für den Stirnabschreckversuch nach DIN EN ISO 642

Mit zunehmenden Abstand von der abgeschreckten Stirnfläche nimmt die Härte ab. Dieses lässt sich anhand des kontinuierlichen ZTU-Schaubildes erklären (Bild 12).

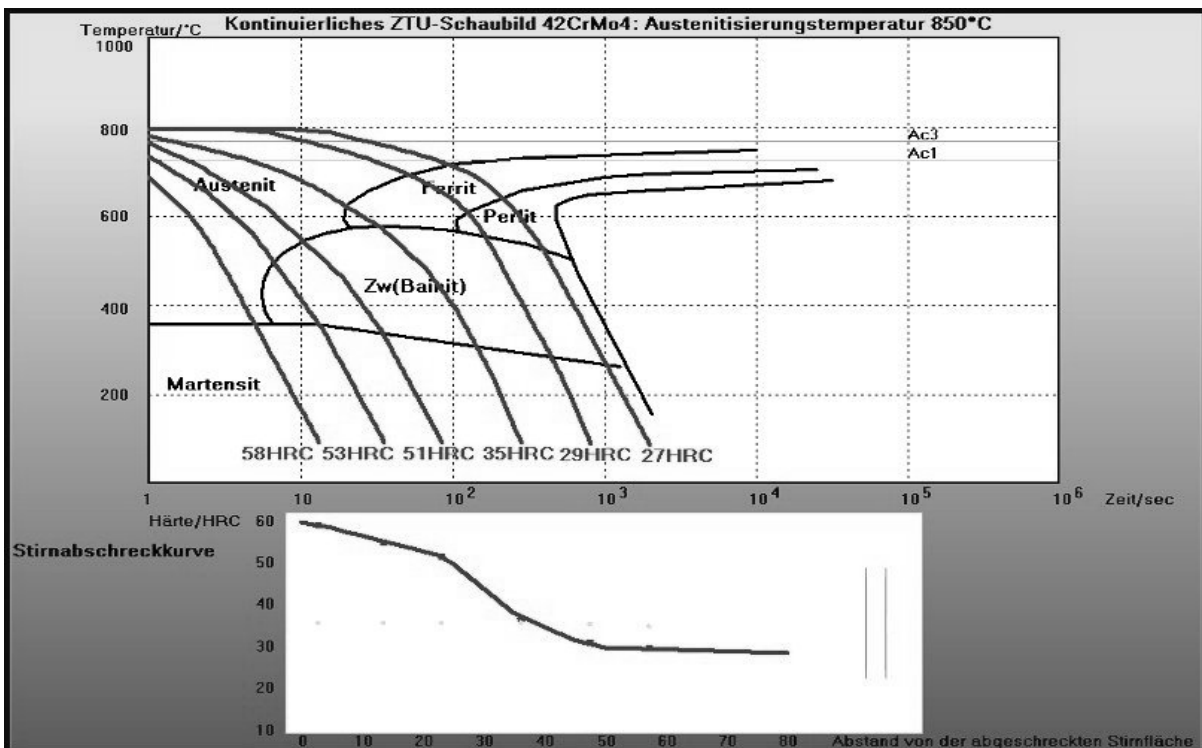


Bild 12: Kontinuierliches ZTU-Schaubild (42CrMo4) und Härteverlaufskurve (HRC)

6 Versuchsdurchführung

Versuchsablauf mit Räumlichkeiten im Gebäude Paul-Bonatz Straße (PB)

- Versuchseinleitung (Raum A223)
- Versuchsdurchführung (Raum D0108)
- Härtemessung HRC (Raum A223)
- Abschlussbesprechung (Raum A223)

Im Rahmen des Versuchs kommen folgende Stähle zum Einsatz:

42CrMo4:

Vergütungsstahl mit guten Kaltumformeigenschaften für Teile hoher Zähigkeit im Kfz- und Luftfahrtbereich, z.B. Achsschenkel, Achsen, Pleuelstangen, Kurbelwellen, Ritzel und Zahnräder.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Gew.-%	0.38-0.45	0-0.40	0.60-0.90	0-0.035	0-0.035	0.90-1.20	0.15-0.30

Bild 13: Chemische Zusammensetzung (Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH 2001)

X40 CrMoV 5 1:

Werkzeugstahl für Warmarbeit, der Verwendung als Press- und Lochdorn an Metallstrangpressen und als Leichtmetall-Druckgussform findet.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Gew.-%	0.36-0.42	0.90-1.20	0.30-0.50	0-0.030	0-0.030	4.80-5.50	1.10-1.40	0.25-0.50

Bild 14: Chemische Zusammensetzung (Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH 2001)

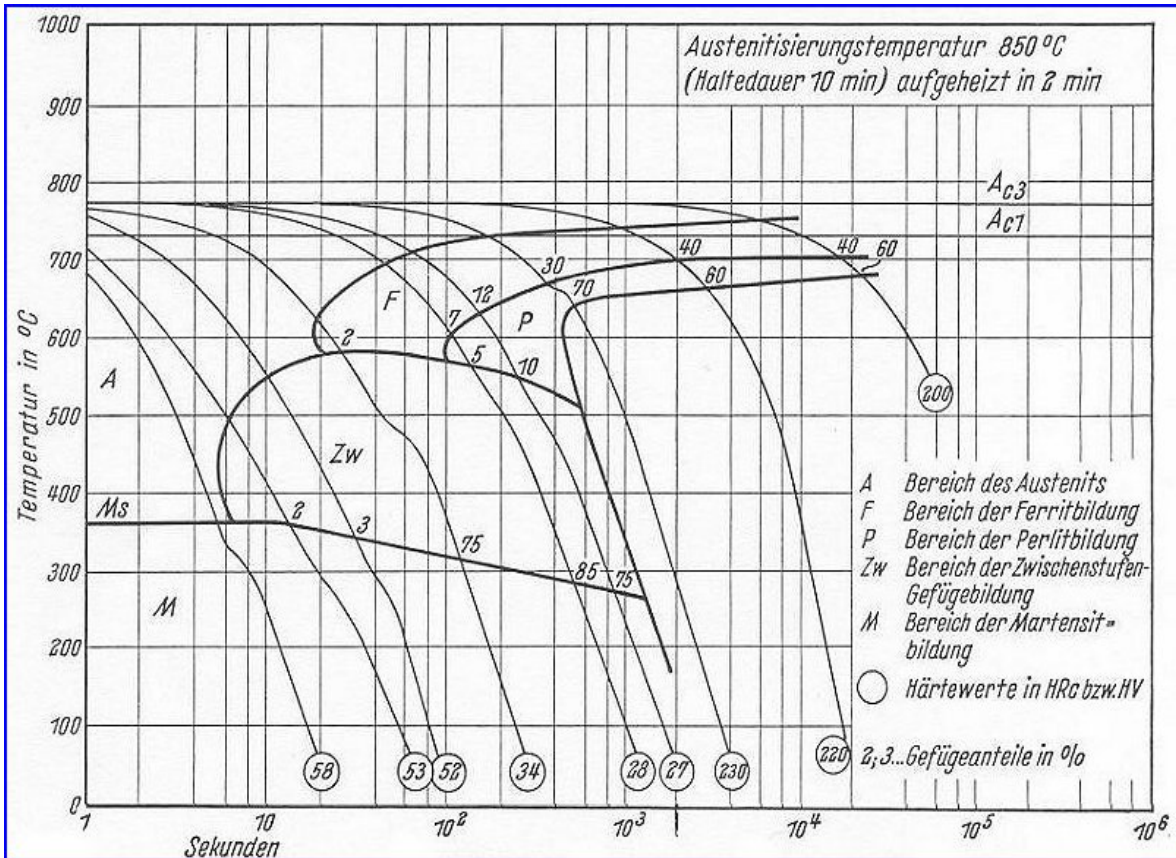


Bild 15: Kontinuierliches ZTU-Schaubild (42CrMo4) (Rose: Atlas der Wärmebehandlung, Verlag Stahl Eisen)

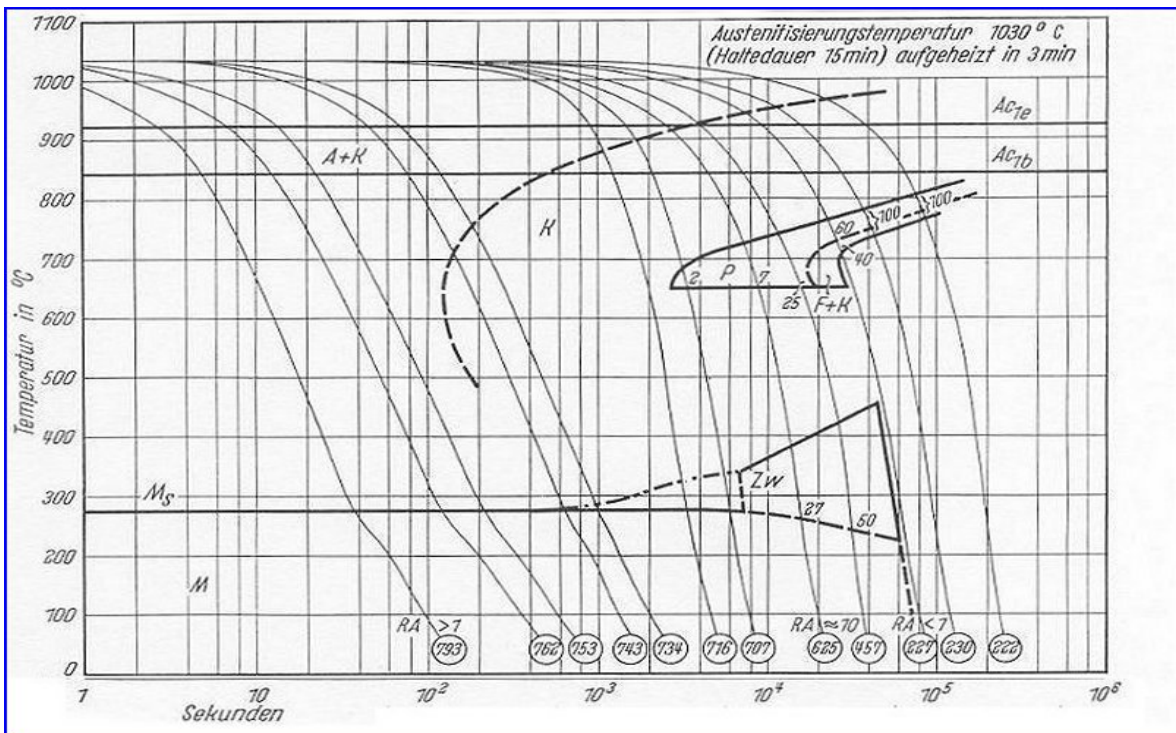
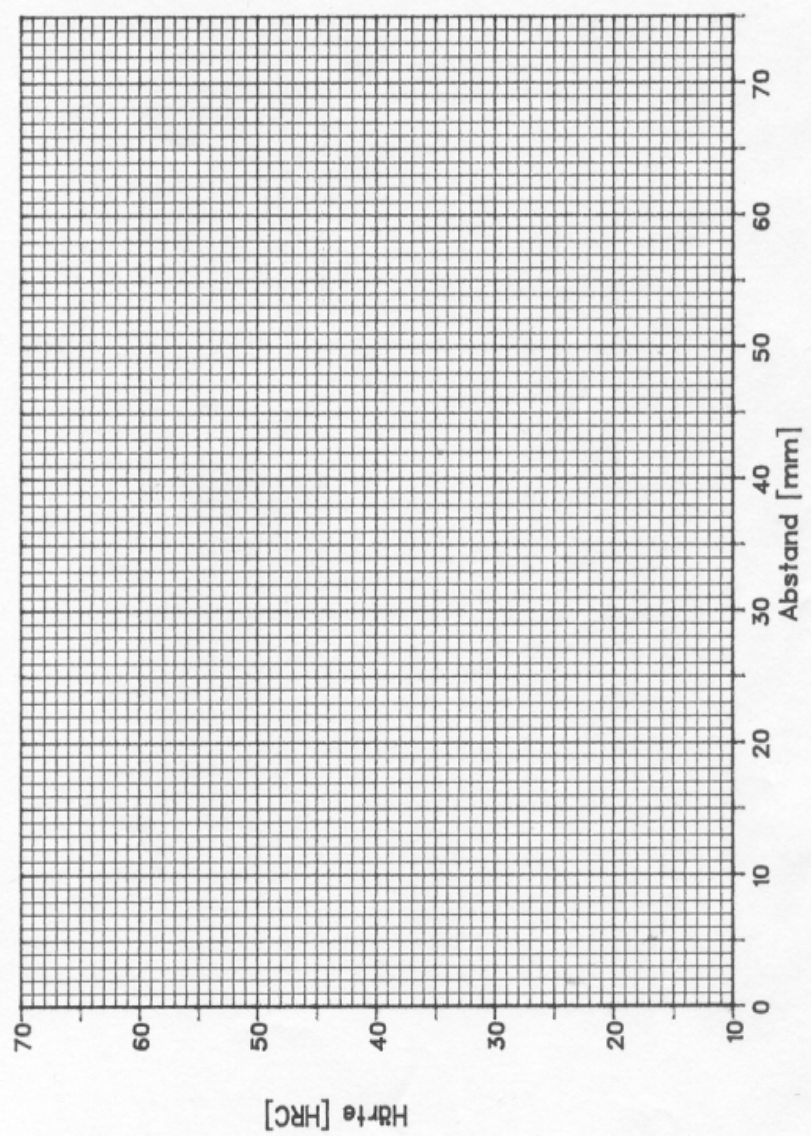


Bild 16: Kontinuierliches ZTU-Schaubild (X38CrMoV5.1) (Rose: Atlas der Wärmebehandlung, Verlag Stahl Eisen)

Stahlsorte: _____ Schmelznummer: _____

Chemische Analyse: _____

Stirnabschreckversuch zur Prüfung der Härtebarkeit von Stählen DIN EN ISO 642



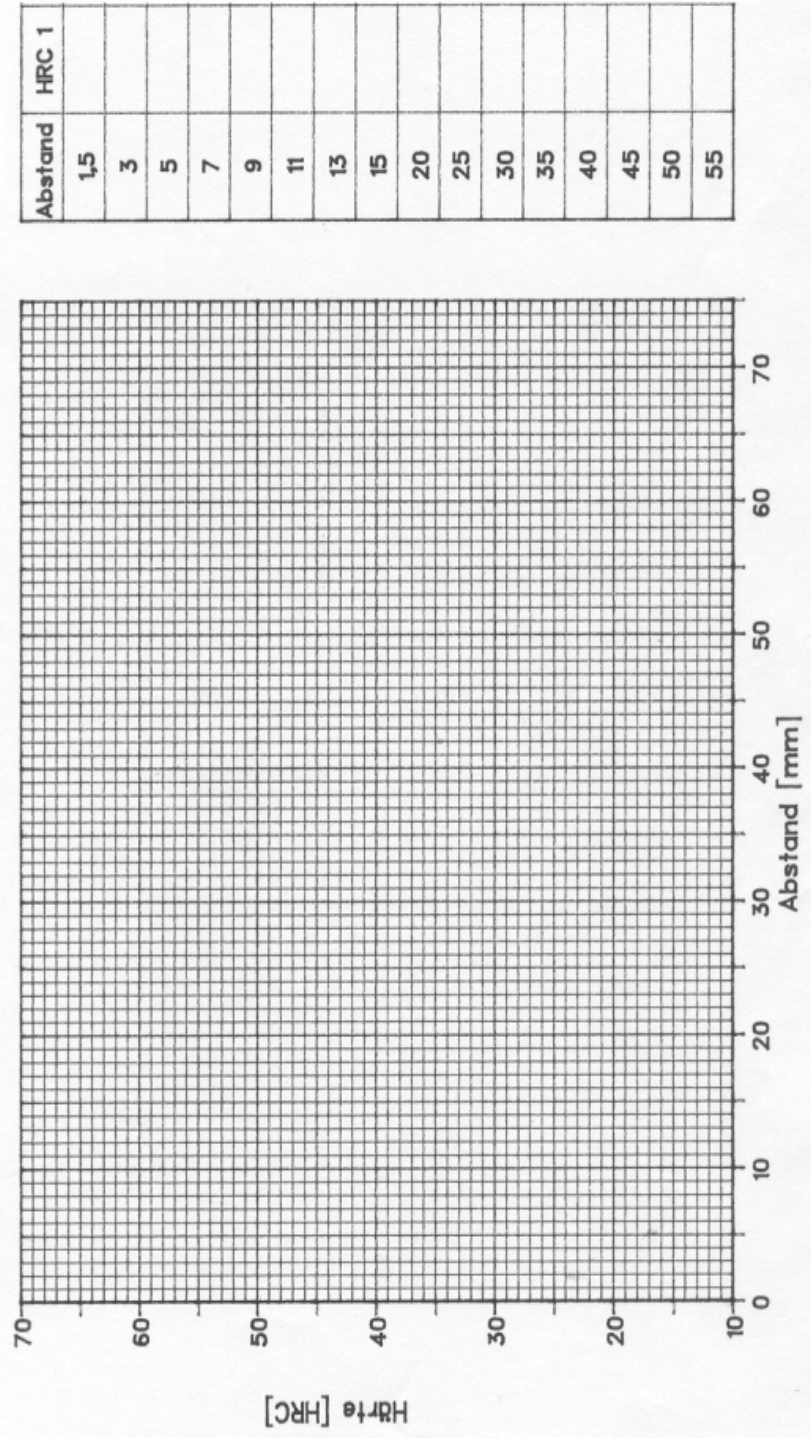
Abstand	HRC 1
1,5	
3	
5	
7	
9	
11	
13	
15	
20	
25	
30	
35	
40	
45	
50	
55	

Gruppe: _____ Datum: _____
Protokollführer: _____ Werkstoff: _____

Stahlsorte: _____ Schmelznummer: _____

Chemische Analyse: _____

Stirnabschreckversuch zur Prüfung der Härtebarkeit von Stählen DIN EN ISO 642



Gruppe: _____
Protokollführer: _____

Datum: _____
Werkstoff: _____

7 Fragen zum Thema Wärmebehandlung von Stählen

- 1) Welche Stahleigenschaften lassen sich mit Wärmebehandlungsverfahren ändern?
- 2) Nennen und beschreiben Sie unterschiedliche Glühverfahren?
- 3) Welchen Einfluss hat der Kohlenstoff auf die Härbarkeit von Stählen?
- 4) Erläutern Sie Sinn und Zweck des Vergütens.
- 5) Skizzieren Sie die Prozessführung (Temperatur-Zeit-Verlauf) beim Vergüten?
- 6) Welche Vergütungsstähle sind Ihnen bekannt?
- 7) Nennen Sie Verfahren zum Oberflächenhärten?
- 8) Welche Stähle kommen beim Einsatzhärten zum Einsatz?
- 9) Wozu dient der Stirnabschreckversuch nach DIN EN ISO 642?
- 10) Was versteht man unter Aufhärbarkeit und Einhärbarkeit?

8 Literatur und Weblinks

- Bargel-Schulze, Werkstoffkunde, Springer Verlag Berlin 2003.
- Scheer-Berns, Was ist Stahl, Springer Verlag Berlin 1980.
- Heinz Kiessler, Kleine Stahlkunde für den Maschinenbau, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1992.
- Stahlfibel, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1999.
- Stahl Lexikon, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1996.
- V. Läßle, Wärmebehandlung des Stahls, Verlag Europa-Lehrmittel 2003.
- Lernsoftware: Grundlagen der Wärmebehandlung
www.lernwerkstoffe.de
www.mb.uni-siegen.de/lmw