

Werkstoffe und Fertigung II

Prof.Dr. K. Wegener

Sommersemester 2007

Seminarübung 10

Wärmebehandlung im UG, ZTU, Teilchenhärtung

Musterlösung

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zentrum

Übungsassistenten: Michael Kelterborn, Florian Hofmann, Tobias Ott, Tobias Nösekabel, Jonas Schöndube, Daniel Sutter; Federico Wolff.

Koordination: Willi Müller, CLA F21.1, Tel. 01 633 23 84, wm@iwf.mavt.ethz.ch

Lernziele

Werkstoffe und Fertigung I+II, Kap. 11, LZ 3 Kap. 12, LZ 1, 2, Kap. 14

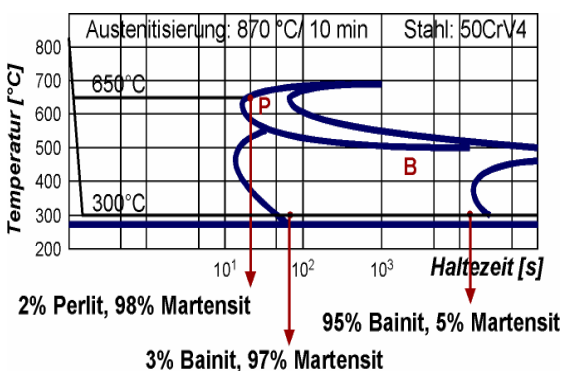
Kerninformationen

1 Wärmebehandlung im Ungleichgewicht

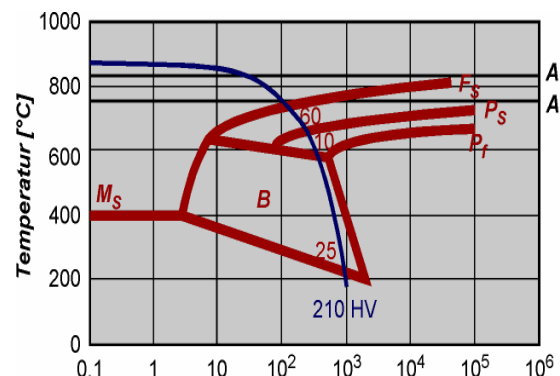
Die Zustandsdiagramme zeigen Gleichgewichtszustände, wie sie nach langer, bei tiefen Temperaturen nach sehr langer Zeit auftreten, indem Stoffausgleich durch Diffusion abläuft. Wärmebehandlungen im Ungleichgewicht benützen gezielt das zeitabhängige Verhalten der verschiedenen Werkstoffe. Die Umwandlungen starten am frühesten und laufen am schnellsten ab bei derjenigen Temperatur, bei der sowohl der Antrieb aus der Differenz der freien Enthalpie als auch die Diffusionsgeschwindigkeit gross sind. Bei sehr schneller Abkühlung werden die Diffusionsvorgänge überhaupt unterbunden (Martensitumwandlung). Solange die Abkühlungsgeschwindigkeit grösser ist als die obere kritische Abkühlungsgeschwindigkeit, hängt die Menge des gebildeten Martensits nur von der erreichten Endtemperatur ab. Für 100% Martensit muss die M_F -Temperatur unterschritten werden. Von aussen auf das Werkstück wirkende Schubspannungen und plastische Verformungen desselben erhöhen die Martensit-Start-Temperatur.

2 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU-Diagramm)

Isothermes ZTU – Schaubild



Kontinuierliches ZTU-Schaubild



Isothermes ZTU - Diagramm

Die Probe (Eisenwerkstoff) wird von der Austenitisierungstemperatur sehr schnell auf die Versuchstemperatur T abgekühlt und dort konstant gehalten. Bei Erreichen der Startlinie beginnt die Umwandlung von Austenit in Perlit bzw. Bainit. Soll die Umwandlung vor Erreichen der Endlinie gestoppt werden, wird die Probe auf Raumtemperatur abgeschreckt, aus dem verbliebenen Austenit entsteht Martensit, eventuell verbleibt ein Anteil Restaustenit.

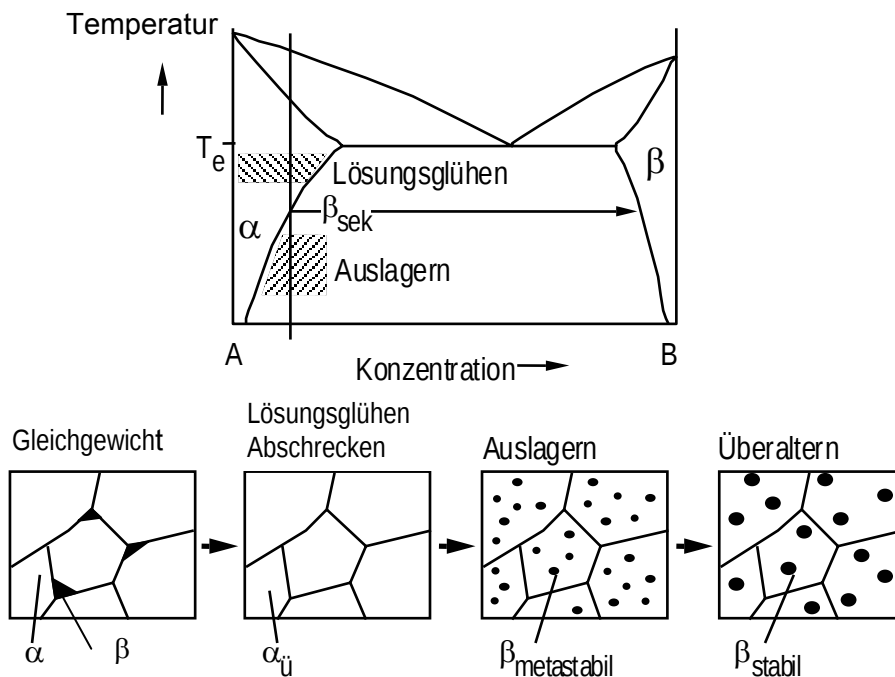
Kontinuierliches ZTU - Diagramm

Da die Wärme durch Wärmeleitung aus dem Innern eines Werkstückes nach aussen transportiert werden muss, lassen sich praktisch nicht beliebig hohe Abkühlgeschwindigkeiten realisieren. Entlang von praktischen Abkühlkurven werden Start- und Endpunkte der Gefügeumwandlung aufgezeichnet. Beim Schnittpunkt der Abkühlungskurve mit der Endlinie eines Umwandlungsbereiches wird der prozentuale Anteil des in diesem Feld gebildeten Gefügebestandteils angeschrieben, im Bild also 60% Ferrit, 10% Perlit, 25 % Bainit. Die restlichen 5% sind Martensit und Restaustenit.

3 Ausscheidungshärtung

In einer Legierung mit den Komponenten A, B können Teilchen des Mischkristalls β innerhalb der Mischkristalle α zu deren Verfestigung beitragen, indem Versetzungen am Laufen gehindert werden. Die Versetzungen müssen die Teilchen entweder durchschneiden – wenn deren Durchmesser kleiner als d_{Tc} (kritische Teilchengrösse) ist – oder die Teilchen umgehen. Es gilt, Menge und Grösse der Teilchen und damit auch die Abstände der Teilchen zu optimieren. Durch *Lösungsglühen* werden die groben Ansammlungen von β -Mischkristallen aufgelöst und als B-Komponente im α -Mk gelöst. Durch Abschrecken wird diese – bei tiefer Temperatur übersättigte – Lösung beibehalten. Bei gezielter Wärmebehandlung – Warmauslagern – oder Lagerung bei Raumtemperatur – Kaltauslagern – kristallisieren β -Mk-Teilchen aus, die Streckgrenze steigt bis zu einem Maximalwert, die Übersättigung der α -Mk hat sich abgebaut. Anschliessend wachsen aber die grösseren β -Mk-Teilchen unter Verzehr der kleineren langsam weiter an (Ostwaldreifung, Überalterung). Durch den vergrösserten Teilchenabstand sinkt die Streckgrenze wieder ab. Der Streckgrenzenzuwachs durch Teilchenhärtung ist umgekehrt proportional zum Teilchenabstand:

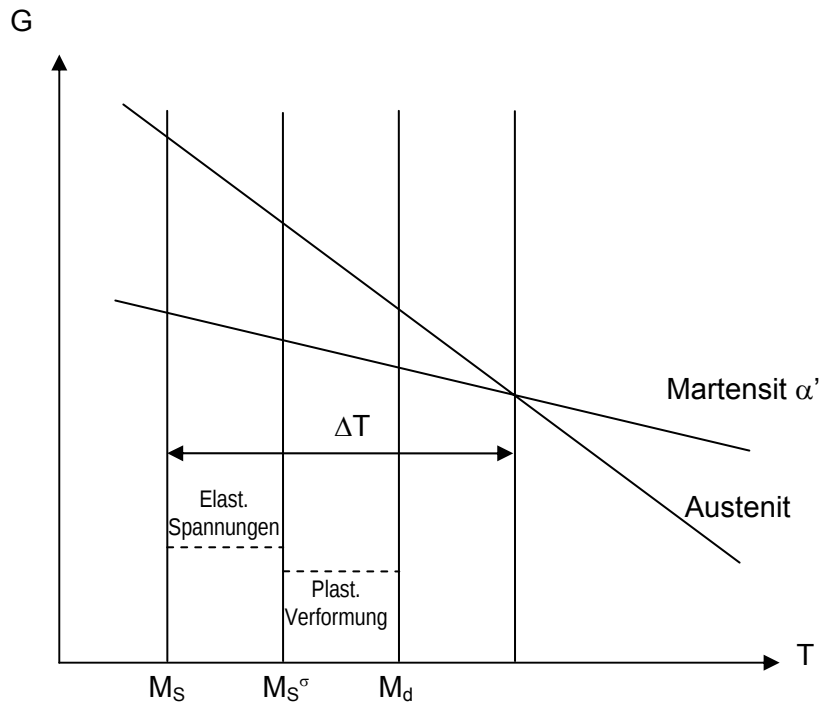
$$\Delta\sigma_T = \frac{1}{D_T}$$



1 G-T-Diagramm

- a) Zeichnen Sie in das G-T-Diagramm (freie Enthalpie/Temperatur) die Martensitstarttemperatur M_S ein.

Lösung



- a) Wie verändert sich M_S durch die Erhöhung der folgenden, gegebenen Parameter? (Zutreffendes ankreuzen)

	$M_S \uparrow$	$M_S \downarrow$
Spannung	☒	☐
Verformung	☒	☐
C-Gehalt	☐	☒
Mn-Gehalt	☐	☒

- b) Wie ändert sich die kritische Abkühlgeschwindigkeit bei der Zunahme von

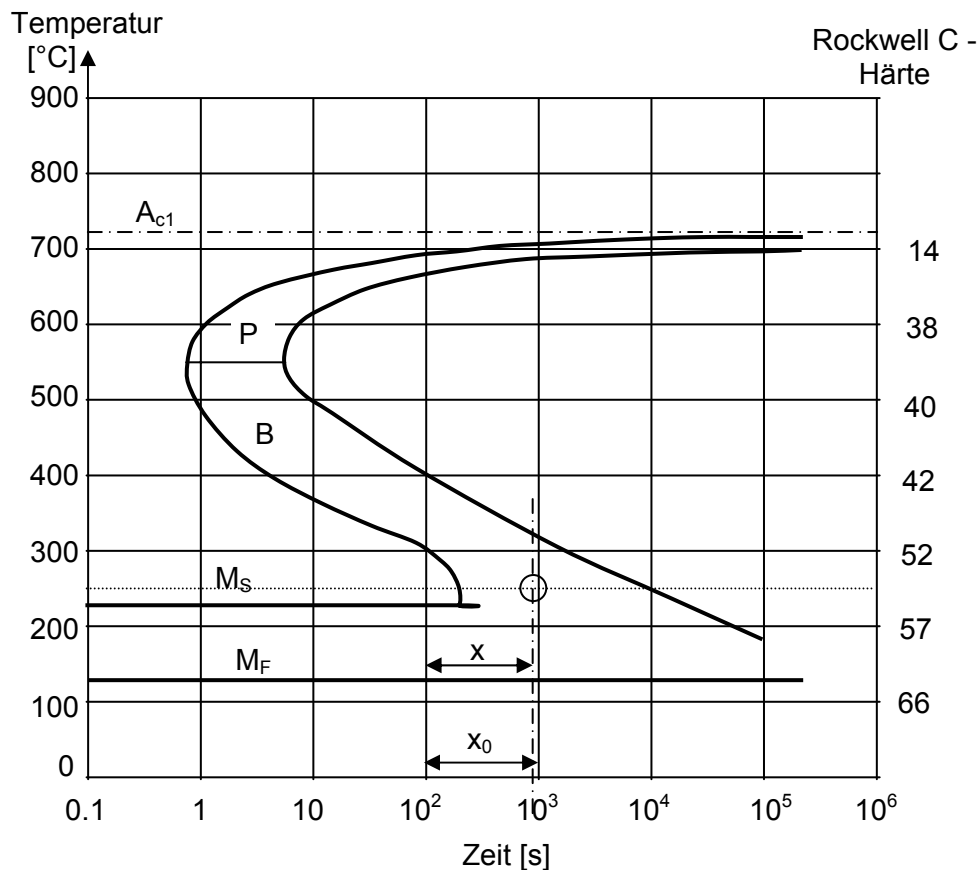
	$V_{krit} \uparrow$	$V_{krit} \downarrow$
Nichtmetallische Einschlüsse	☐	☒
Feinkorn	☒	☐
Legierungselemente	☐	☒

2 Isothermes und kontinuierliches ZTU-Diagramm

Bainit zeichnet sich durch eine günstige Kombination von Härte, Festigkeit und Zähigkeit aus. Um dieses Gefüge zu erzeugen, ist für einen eutektoiden Stahl folgendes Temperatur-Zeit-Regime vorgeschlagen: Austenitisieren bei 750°C, Abschrecken auf 250°C und Halten dieser Temperatur über 15 min, danach Abkühlen auf Raumtemperatur.

- Liegt nach diesem Ablauf ein Gefüge mit 100% Bainit vor?
- Falls nicht, was ist zu ändern?

Lösung:



- Nach 15 min = 900 s ≈ 1000 s befindet sich der Zustandspunkt des behandelten Werkstoffes innerhalb des Umwandlungsbereichs Austenit- Bainit. Der Bainitgehalt ist weit weg von 100%.
- Für 100% Bainit müssen 250°C während 10^4 s = 2.8 h gehalten werden.

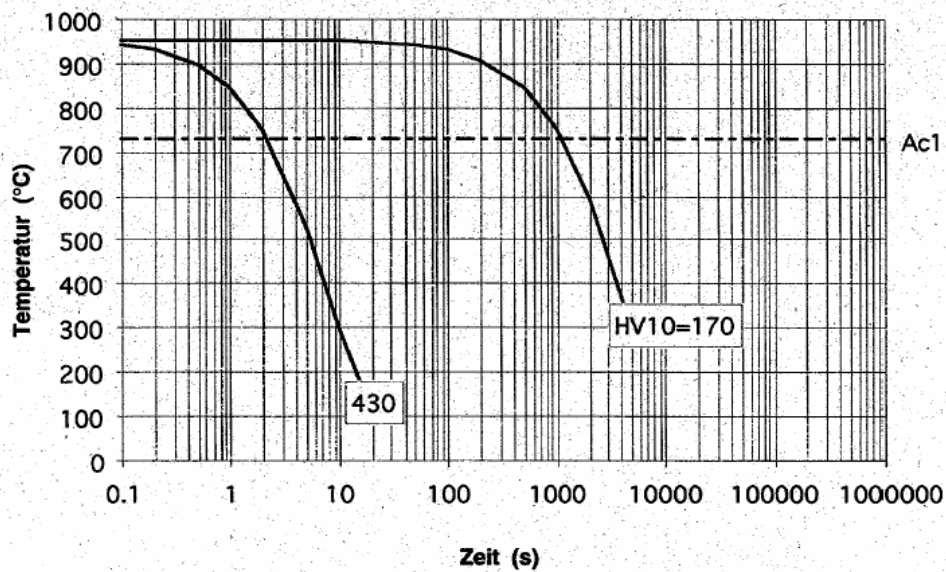
Wie findet man 900 s auf der logarithmischen Skala?:

$$x = x_0 \cdot \frac{\log 900 - \log 100}{\log 1000 - \log 100} = x_0 \cdot \frac{\log \frac{900}{100}}{\log \frac{1000}{100}} = x_0 \cdot \frac{\log 9}{\log 10} = 15 \text{ mm} \cdot 0.954 = 14.3 \text{ mm}$$

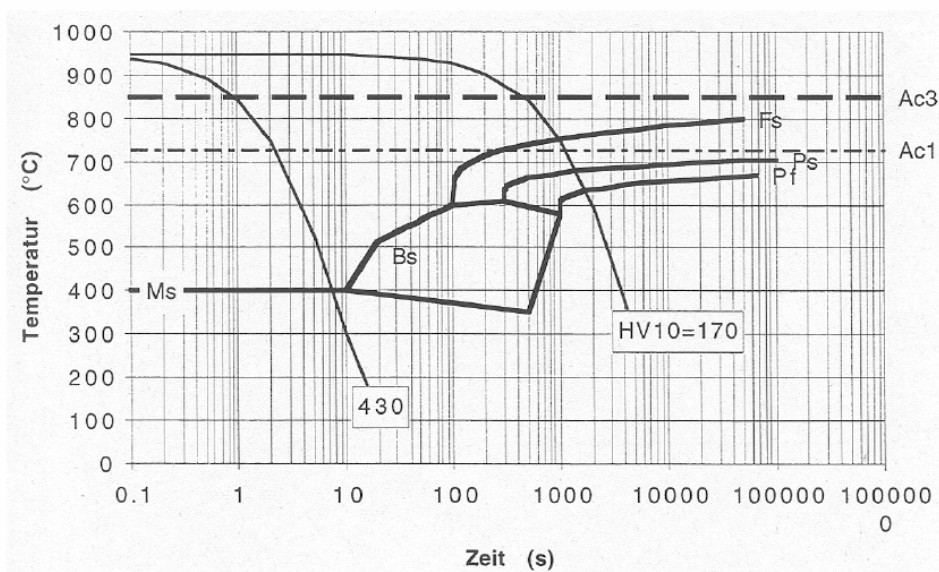
3 Kontinuierliches ZTU-Diagramm

Konstruieren Sie aus folgenden Angaben ein kontinuierliches ZTU-Diagramm:

- $A_{C1} = 730^{\circ}\text{C}$; $A_{C3} = 850^{\circ}\text{C}$; Austenitisierungstemperatur $T_A = 950^{\circ}\text{C}$
- M_S : $t < 10\text{s}$: 400°C ; $t = 500\text{s}$: 350°C
- Ferrit-Startlinie: Beginn bei 100s und 600°C
- Perlit-Start-Linie: Beginn bei 300s und 610°C ; Ende bei 1000s und 580°C
- Bainit-Start-Linie: Beginn bei 10s und 400°C ; 20s : 510°C
- Bainit-Ende: 500s , 350°C bis 1000s , 580°C
- Gefüge bei Raumtemperatur (Abkühlungskurven vorgegeben)
 100% Martensit (+RA), 430 HV10. Wie gross ist $t_{8/5}$?
 60% Ferrit + 40% Perlit, 170 HV10. Wie gross ist $t_{8/5}$?



Lösung

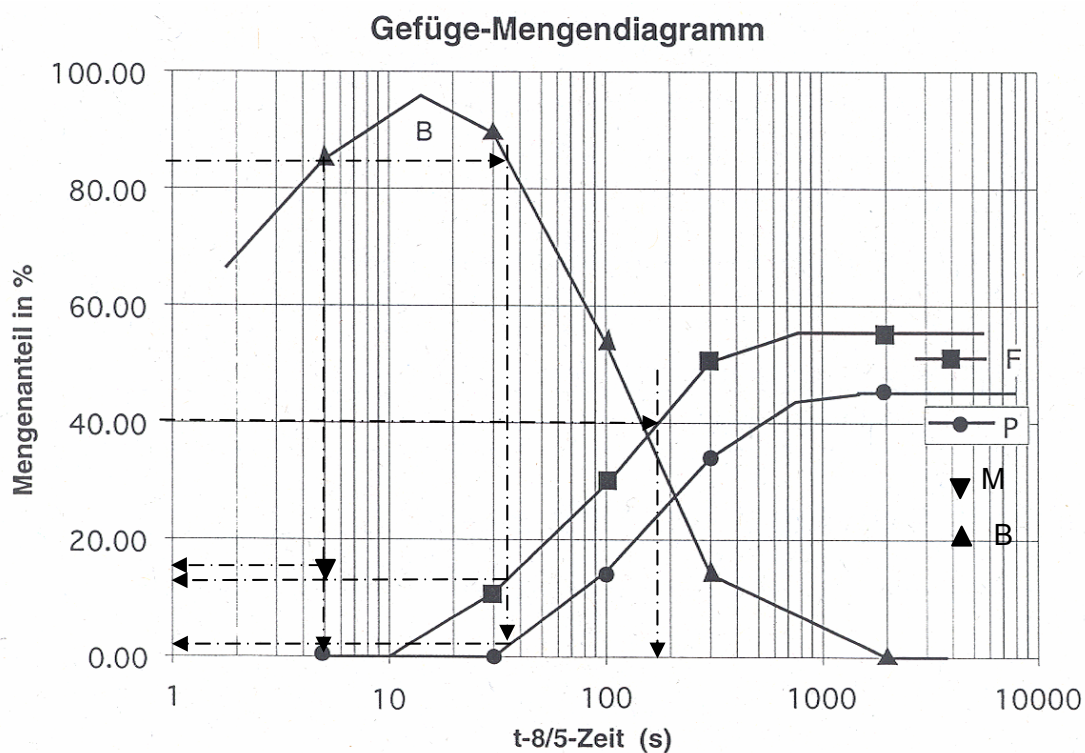
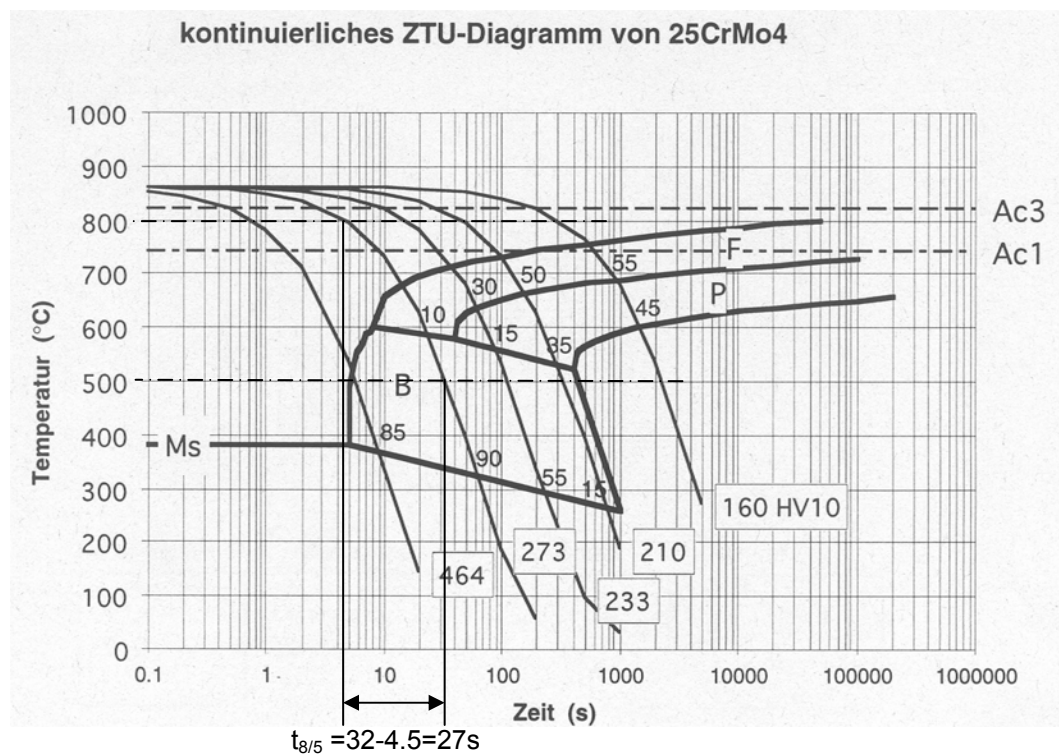


- Abkühlungskurve mit 430 HV10: $t_{8/5} = 5.2 - 1.3 \text{ s} = 3.9 \text{ s}$
- Abkühlungskurve mit 170 HV10: $t_{8/5} = 2600 - 700 \text{ s} = 1900 \text{ s}$

4 Kontinuierliches ZTU-Diagramm von 25CrMo4

- Bestimmen Sie aus dem gegebenen kontinuierlichen ZTU-Diagramm für die einzelnen Abkühlkurven die $t_{8/5}$ -Zeiten (= Abkühlungszeiten zwischen 800 und 500°C).
- Konstruieren Sie mit diesen Daten und den Angaben im ZTU-Diagramm das entsprechende Gefüge-Mengendiagramm. (Wie Beispiel für Ferrit)
- Bestimmen Sie aus dem erstellten Mengendiagramm die erforderliche Abkühlgeschwindigkeit ($t_{8/5}$ -Zeit), wenn ihr Werkstück bei Raumtemperatur 40% Ferrit enthalten soll.
- Bestimmen Sie aus dem erstellten Mengendiagramm die erforderliche Abkühlgeschwindigkeit ($t_{8/5}$ -Zeit), wenn ihr Werkstück bei Raumtemperatur 85% Bainit enthalten soll.

Lösung:



Siehe Diagramme.

- Für alle Abkühlkurven werden die $t_{8/5}$ -Zeiten und die Gefügeanteile bestimmt. Die nach der mittleren Kurve abgekühlte Probe enthält z.B. 30% Ferrit, 15% Perlit, 55% Bainit.
- Im Mengendiagramm werden die Gefügeanteile jeweils von der Grundlinie aus abgetragen.
- Der Schnittpunkt der F-Linie mit der 40%-Linie gibt die gesuchte $t_{8/5}$ -Zeit an. 170 s schätzen oder herausmessen: Der Punkt liegt etwa 6.2 mm rechts von 100 s, die 200s-Linie um etwa 8.1 mm.

$$\text{Linear interpoliert } \frac{t_{8/5} - 100s}{200s - 100s} = \frac{6.2\text{mm}}{8.1\text{mm}} \Rightarrow t_{8/5} = 100 + 100 \cdot \frac{6.2}{8.1} = 177s$$

$$\text{oder „exakt“: } \frac{\log t_{8/5} - \log 100}{\log 200 - \log 100} = \frac{6.2\text{mm}}{8.1\text{mm}} \Rightarrow t_{8/5} = 100 \cdot 2^{\frac{6.2}{8.1}} = 170s$$

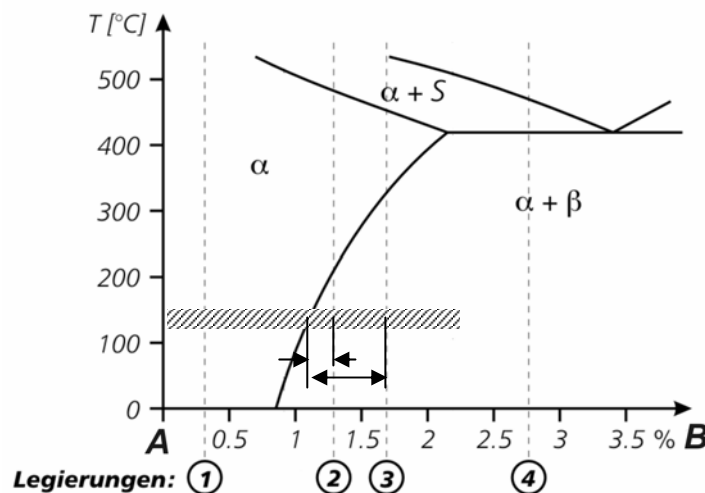
Um ein Werkstück mit 40% Ferrit zu erhalten, muss mit einer $t_{8/5}$ -Zeit von 170 s abgekühlt werden.

- Um ein Werkstück mit 85% Bainit zu erhalten kann mit einer $t_{8/5}$ -Zeit von 5 s abgekühlt werden, dann sind die restlichen 15 % Martensit und ev. Restaustenit, oder mit einer $t_{8/5}$ -Zeit von 35 s, dann besteht das übrige Gefüge aus 13 % Ferrit und 2% Perlit.

5 Teilchenhärtung

Gegeben ist ein Ausschnitt aus dem Phasendiagramm des Zweistoff-Systems A – B, das für Ausscheidungshärtung geeignet ist.

- Erklären Sie den Wirkmechanismus der Teilchenhärtung.
- Beschreiben Sie den Härtungsprozess der Teilchenhärtung. Welcher Vorgang ist zu vermeiden?
- Welche der Legierungen 1, 2, 3, 4, eignen sich für die Teilchenhärtung, warum bzw. warum nicht?
- Zeichnen sie qualitativ den Verlauf über der Zeit
 - des gesamten Volumenanteils der gebildeten Teilchen
 - des Teilchendurchmessers
 - der Streckgrenze



Lösung

- Teilchen blockieren Versetzungen. Dadurch wird die Streckgrenze erhöht. Für plastische Deformation müssen sie zerschnitten werden oder durch Klettern umgangen werden.
- Der Werkstoff muss aus mindestens 2 Komponenten bestehen, welche bei Gebrauchstemperatur zwei Phasen bilden. Durch Erhitzen geht das Teilchenmaterial in Lösung. Durch Abschrecken bleibt das Material in Lösung. Durch Warm- oder Kaltauslagern werden Teilchen von erwünschter Menge und Grösse gebildet. Bei zu langem Auslagern werden Teilchen zu gross (Ostwaldreifung), indem sie andere „auffressen“, dadurch wächst der Teilchenabstand und die Streckgrenze sinkt wieder.

- c) Für die Teilchenhärtung eignen sich die Legierungen 2 und 3, weil sie bei der Auslagerungstemperatur (schraffierter Bereich) ein Zweiphasensystem bilden und oberhalb der Grenzlinie die Komponente B in α vollständig gelöst ist. Dabei bildet Legierung 3 mehr Teilchenmasse als Legierung 2. Legierung 1 bildet nie eine zweite Phase, 4 bildet auch Eutektikum, an welches sich die Ausscheidungen anlagern.
- d) Nach Erreichen des kritischen Durchmessers werden die Teilchen nicht mehr geschnitten, Erhöhung der Streckgrenze nur noch wegen Abnahme der Zwischenräume. Wenn die ganze verfügbare Menge B als Teilchen (Mischkristall β) ausgeschieden ist, können die Teilchen nur noch auf Kosten der kleinen wachsen. Zunahme des Teilchenabstandes, Abnahme der Streckgrenze.

