

Werkstoffe und Fertigung I

Prof.Dr. K. Wegener

Wintersemester 2006/07

Seminarübung 4

Legierungskunde

Musterlösung

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zentrum

Übungsassistenten: Niklas Roterding, Michael Kelterborn, Florian Hofmann, Tobias Ott, Tobias Nösekabel, Daniel Sutter, Robin Vujanovic, Peter Vogel.

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

Lernziele

Lernziele: Werkstoffe und Fertigung I, Kap. 2, LZ. 1 - 8

Kerninformationen

Zustandsdiagramme von Zweistoffsystemen

Beispiel 1: System mit unbegrenzter Löslichkeit von A und B im Mischkristall α .

Das Zustandsdiagramm gibt an, in welchen Bereichen von Temperatur T und Komponentengehalt w_B ($=1-w_A$) die Legierungen flüssig, fest oder als Mischung zwischen fest und flüssig vorliegen.

Man kann das Zustandsdiagramm horizontal lesen (Fig. 1) entlang einer Isothermen (Konode) T_1 :

- Welches ist der höchste Gehalt an B im Mischkristall α , $w_B^{\alpha}|_{\max(T_1)}$
- Welches ist die niedrigste Konzentration an B, welche die Schmelze enthalten kann: $w_B^S|_{\min(T_1)}$

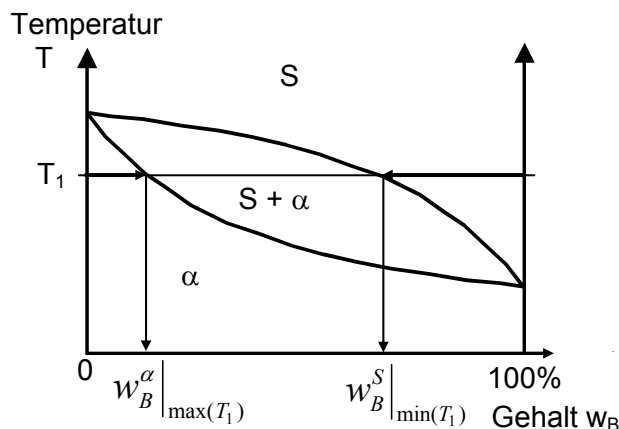


Fig. 1

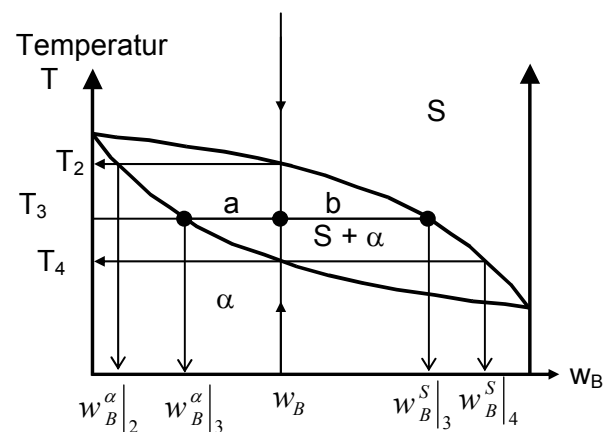


Fig. 2

Man kann das Zustandsdiagramm vertikal lesen (Fig. 2) entlang einer Linie konstanten Gehaltes w_B :

- Von oben nach unten (Abkühlung): Bei welcher Temperatur T_2 beginnt die Kristallisation, bei welcher Temperatur T_4 ist die Kristallisation abgeschlossen?
- Von unten nach oben (Erwärmung): Bei welcher Temperatur T_4 beginnt der Mischkristall zu schmelzen, bei welcher Temperatur T_2 ist der Mischkristall ganz aufgeschmolzen.

Das Zustandsdiagramm stellt Gleichgewichtszustände dar. Bei Fortschreiten von einem Zustandspunkt zum anderen muss man genügend lange warten, bis sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

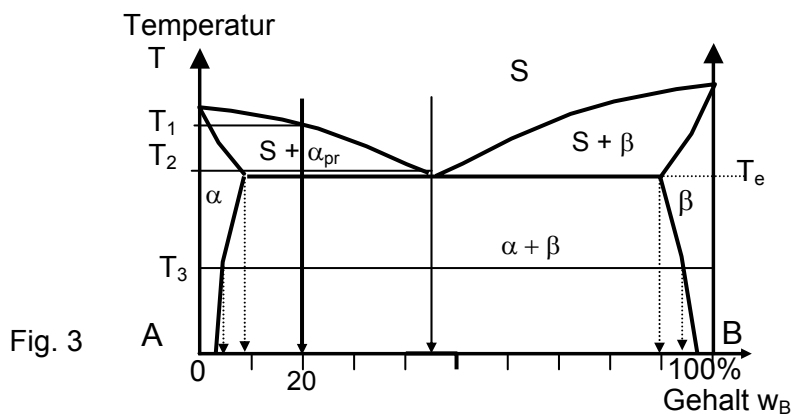
Nochmals Abkühlung entlang w_B :

Bei T_2 können sich erste vereinzelte Mischkristalle mit der Konzentration $w_B^{\alpha}|_2$ bilden. Bei T_3 besteht die Legierung aus $a/(a+b)=w_S$ Schmelze und $b/(a+b)=w_{\alpha}$ Mischkristall. Der Gehalt an B in der Schmelze ist grösser als es der Legierung entspricht $w_B < w_B^S|_3$. Der Gehalt an B der bei T_3 gebildeten Kristalle ist immer noch kleiner als es der Legierung entspricht, aber grösser als derjenige der bei T_2 gebildeten Kristalle. Diese müssen aus der Schmelze oder den angrenzenden Kristallen zusätzlich A-Atome aufnehmen, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen.

Beispiel 2: System mit begrenzter Löslichkeit von A und B in den Mischkristallen β und α .

Eutektikum

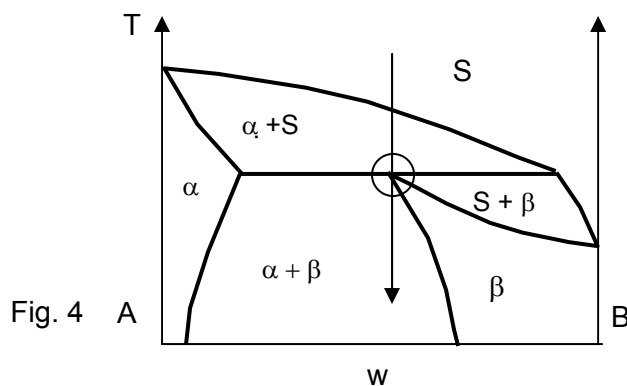
Wir betrachten (Fig. 3) die Abkühlung einer Schmelze mit einem Gehalt von $w_B^S = 20\%$ ($=w_B$, da Einphasengebiet). Mit Überschreiten der Liquiduslinie bei T_1 beginnen sich α -Mk. auszuscheiden (α_{pr} primär, weil direkt aus der Schmelze entstehend). Bei T_2 liegen α -Mk. des Gehaltes $w_B^\alpha = 9\%$ und Schmelze mit $w_B^S = 45\%$ vor. Dies ist die eutektische Zusammensetzung. Bei weiterem Wärmeentzug bleibt die Temperatur bei T_e stehen (Haltepunkt). Die Schmelze kristallisiert in die beiden Phasen α und β mit $w_B^\alpha = 9\%$ und $w_B^\beta = 90\%$. Nach vollständiger Kristallisation und bei weiterem Wärmeentzug sinkt die Temperatur wieder. Dabei nimmt die Löslichkeit von B in α und A in β ab (auf 4% resp. 6% bei T_3). Der Mischkristall α scheidet B in Form von β -Mk. aus, welche sich gegebenenfalls an bestehende β -Mischkristalle anlagern. Analog dazu scheidet der Mischkristall β die Komponente A als α -Mk. aus.



Beispiel 3: System mit begrenzter Löslichkeit von A und B in den Mischkristallen β und α .

Peritektikum.

In einer peritektischen Reaktion wandelt sich bei Abkühlung ein Gemisch eines Mischkristalls α mit Schmelze (Zweiphasengebiet) in einen Mischkristall β (Einphasengebiet zwischen zwei Zweiphasengebieten) um. Umgekehrter Vorgang bei Aufwärmung.



Abkühlungskurven (Fig. 5)

Eine Legierung mit dem Gehalt w_B zeigt bei Abkühlung durch konstanten Wärmeentzug einen charakteristischen Temperaturverlauf. Weil im Zweiphasengebiet durch die Phasenumwandlung flüssig → fest Kristallisationswärme frei wird, sinkt die Temperatur langsamer. Im Temperaturverlauf erscheinen **Knickpunkte**. Während der Phasenumwandlung ändert der Gehalt des α -Mischkristalls, wie oben erläutert.

Die reinen Stoffe A und B zeigen **Haltepunkte** in der Abkühlungskurve, d.h. die frei werdende Kristallisationswärme hält die Temperatur (Schmelztemperatur) bis zur völligen Erstarrung konstant.

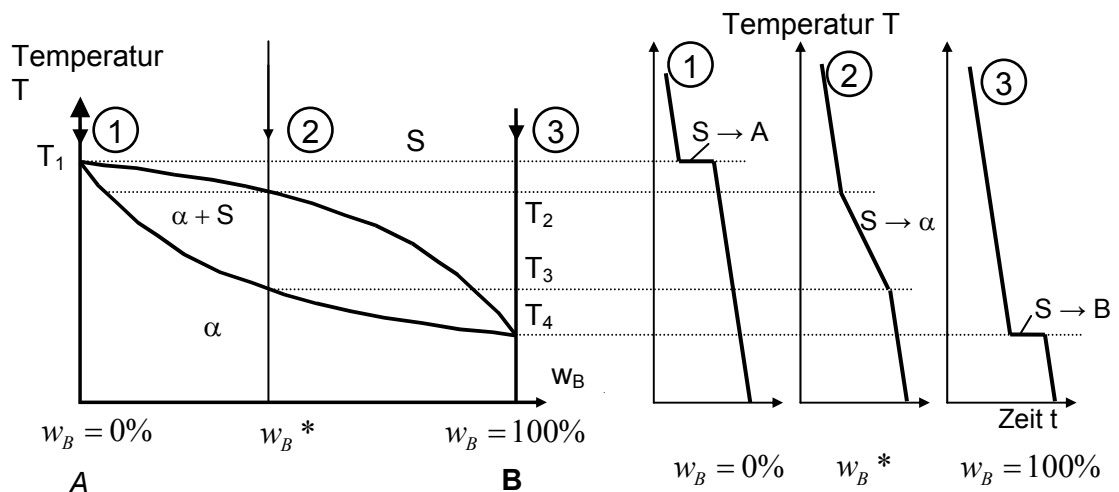


Fig. 5

Die Abkühlungskurven werden beschriftet mit der Angabe, welche Phasen sich in welche andere Phasen umwandeln.

Mengendiagramm (Fig. 6)

Man möchte für die Temperatur T_1 wissen, zu welchen Anteilen die Legierung K des Gehaltes w_{B2} aus den verschiedenen Phasen besteht, hier Schmelze S und α -Mischkristall, also w_S , $w_\alpha = ?$, und zwar für alle möglichen Legierungen. Mit Hilfe des Hebelgesetzes könnten die Werte berechnet und im sogenannten Mengendiagramm über dem Legierungsgehalt w_B aufgetragen werden. Das Hebelgesetz ist aber dieser Darstellung immanent, sodass lediglich die Schnittpunkte der Phasengrenzlinien mit der T_1 -Konode nach unten abgetragen und geradlinig miteinander verbunden werden müssen.

$$w_\alpha = w_\alpha(w_B);$$

$$w_S = w_S(w_B);$$

$$w_\alpha(w_B) + w_S(w_B) = 1$$

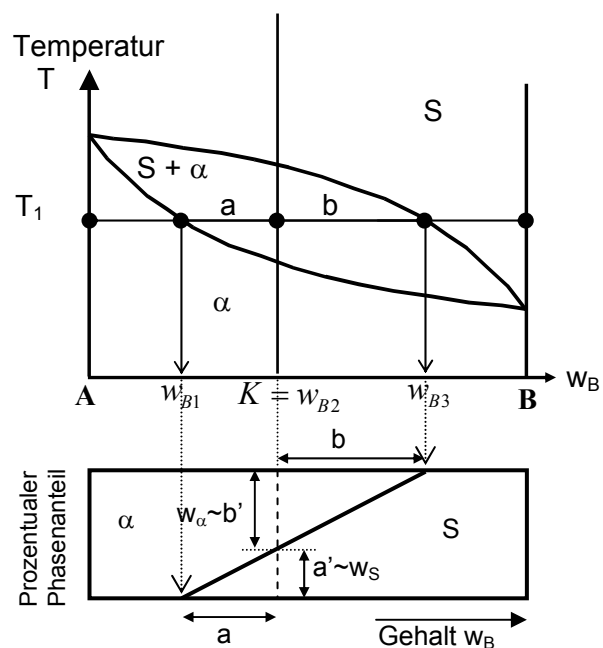
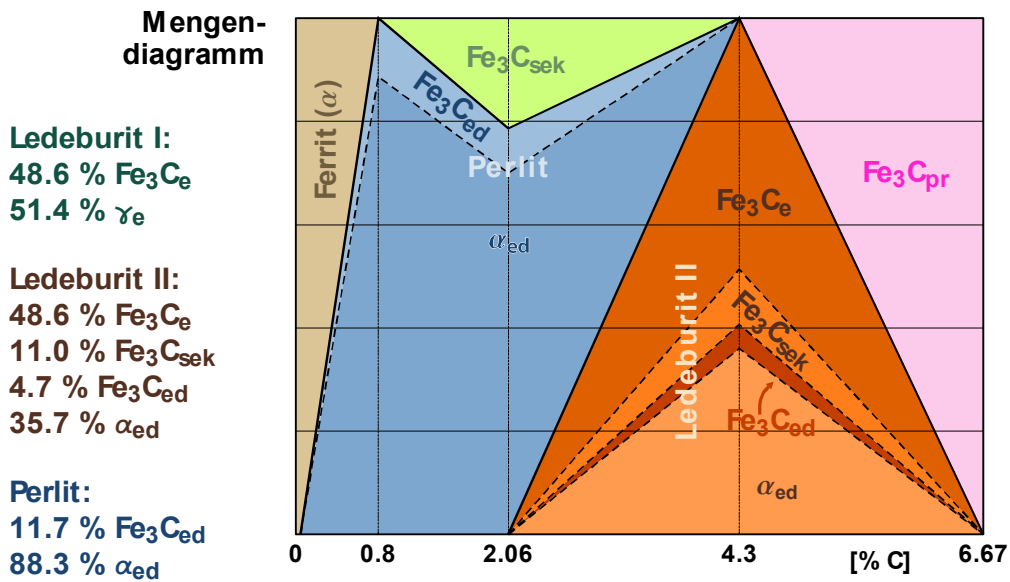
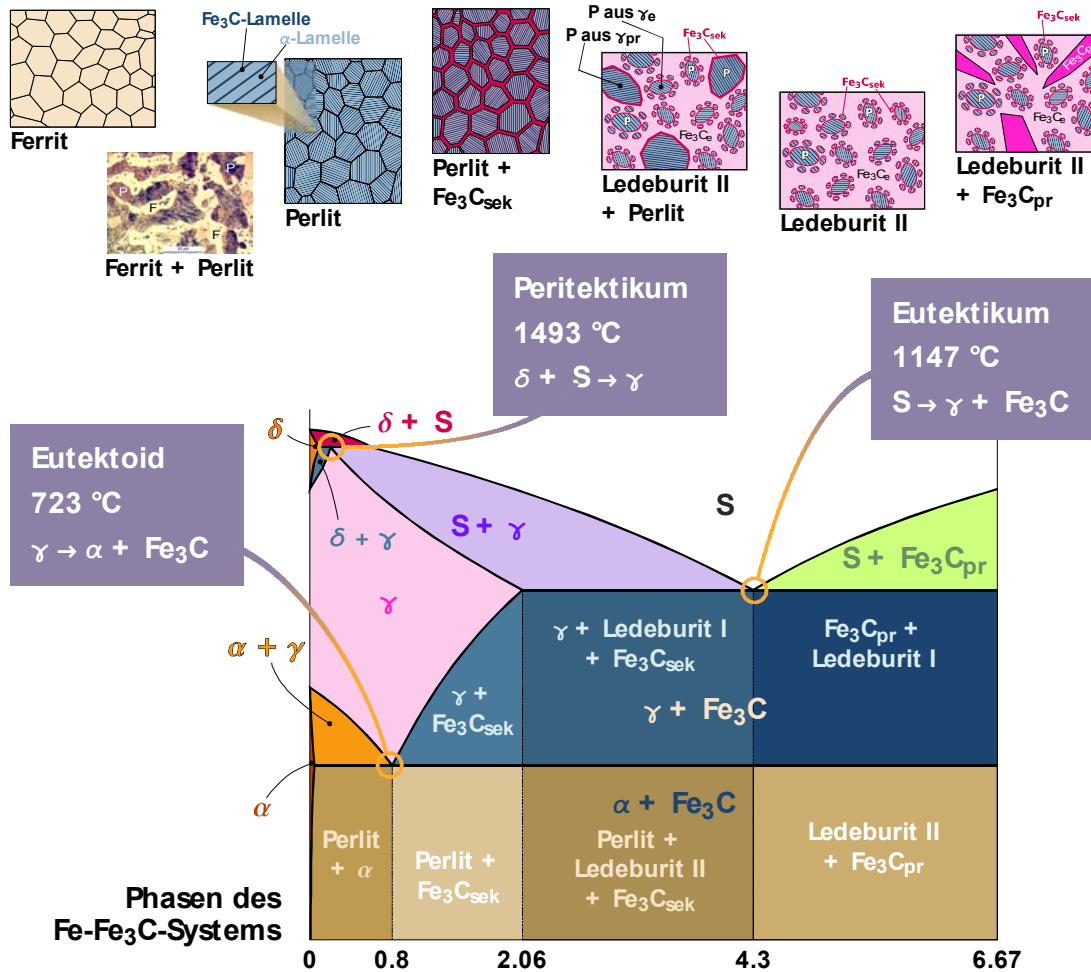
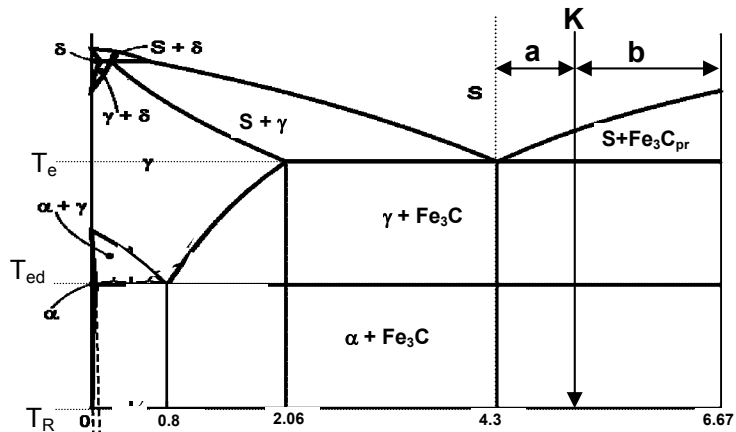


Fig. 6

Das metastabile Eisen-Kohlenstoffsystem Fe-Fe₃C- (Gefügebilder, Zustandsdiagramm, Mengendiagramm)



Abkühlung aus der Schmelze im metastabilen Eisen-Kohlenstoffsystem



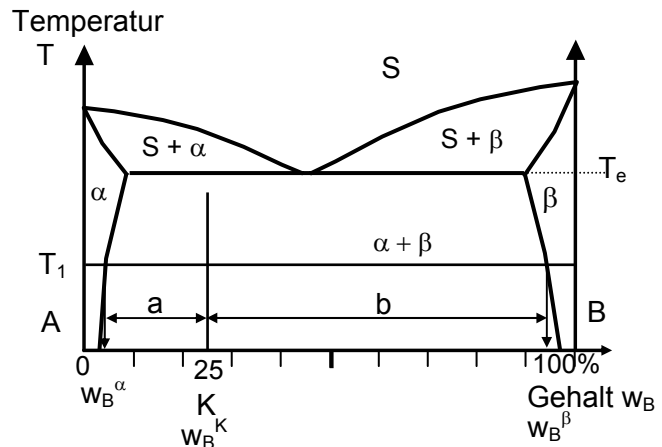
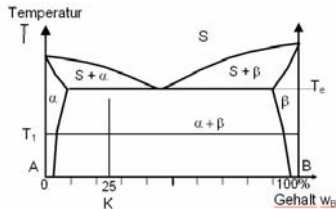
Die Abkühlung der Legierung K (übereutektisch) kann als Kaskade dargestellt werden:

Aus 100% Schmelze verbleiben bzw. entstehen ab Liquiduslinie bis T_e :	
↓	→
$x = \frac{b}{a+b}$ Anteile (Rest-)Schmelze	$1-x = \frac{a}{a+b}$ Anteile $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{pr}}$ (primär)
↓	
T_3 : Eutektische Umwandlung, aus der Schmelze entsteht Ledeburit I, bestehend aus	
↓	→
$x \cdot 51.5\% \gamma_e$	$x \cdot 48.5\% \text{Fe}_3\text{C}_e$
↓	
T_e bis T_{ed} : Löslichkeit von C in γ nimmt ab, es verbleiben bzw. entstehen	
↓	→
$x \cdot 40.4\% \gamma_e$	$x \cdot 11.1\% \text{Fe}_3\text{C}_{\text{sek}}$
↓	
T_{ed} : Eutektoide Umwandlung. Es entsteht Perlit, bestehend aus:	
↓	→
$x \cdot 0.404 \cdot 88.2\% \alpha_{ed}$	$x \cdot 0.404 \cdot 11.8\% \text{Fe}_3\text{C}_{ed}$
↓	
Abkühlung bis Raumtemperatur: Wegen der abnehmenden Löslichkeit von C in α verbleiben bzw. entstehen	
↓	→
$x \cdot 0.404 \cdot 88.0\% \alpha_{ed}$	$x \cdot 0.404 \cdot 0.882 \cdot 0.21\% \text{Fe}_3\text{C}_{\text{tert}}$

1 Gehalte

Geben Sie für die Legierung K des abgebildeten Zweistoffsystems bei der Temperatur T_1 an:

- Welche Phasen liegen vor?
- Welches sind die Gehalte dieser Phasen in der Legierung
- Welches sind die Phasengehalte?
- Geben Sie den Komponentengehalt der Legierung an und rechnen Sie nach.

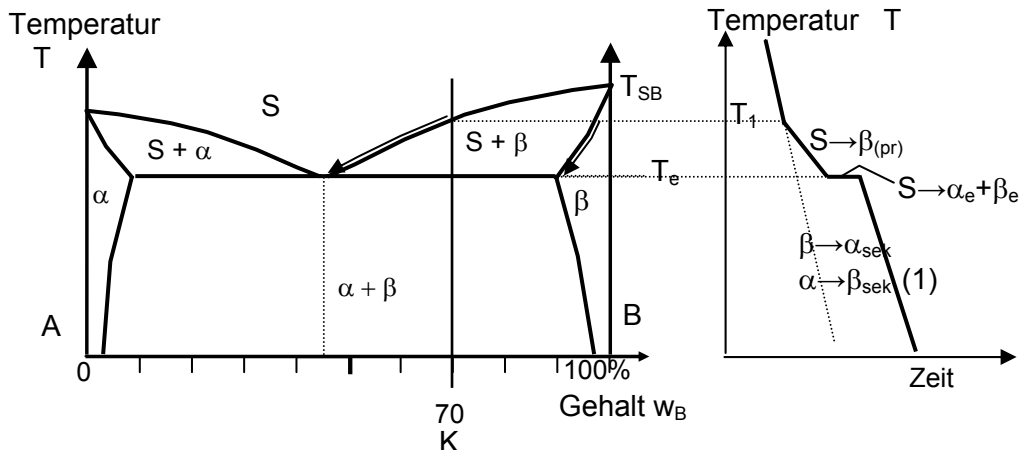
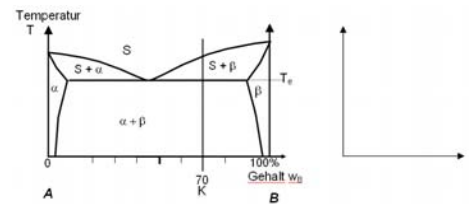


Lösung:

- Der Zustandspunkt von K liegt in einem Zweiphasengebiet: Phasen α und β
- Gehalte von α und β in der Legierung: Anteile gemäss Hebelgesetz:
 $w_\alpha = (w_B^\beta - w_B^K) / (w_B^\beta - w_B^\alpha) = b / (a + b)$; $w_\beta = (w_B^K - w_B^\alpha) / (w_B^\beta - w_B^\alpha) = a / (a + b) = 1 - w_\alpha$
 $w_\alpha = (94 - 25) / (94 - 4) = 69 / 90 = 77\%$; $w_\beta = (25 - 4) / (94 - 4) = 21 / 90 = 23\%$
- Phasengehalte aus Diagramm:
 $w_B^\alpha = 4\%$; $w_A^\alpha = 100 - w_B^\alpha = 96\%$; $w_B^\beta = 94\%$; $w_A^\beta = 100 - w_B^\beta = 6\%$;
- Komponentengehalt: Aus Diagramm abgelesen: $w_B^K = 25\%$; $w_A^K = 75\% = 100 - w_B^K$
 Berechnet: Anteil B in der Legierung K ist Anteil B im Mischkristall α + Anteil B im Mk β :
 $w_B^K = w_\alpha \cdot w_B^\alpha + w_\beta \cdot w_B^\beta = 0.77 \cdot 0.04 + 0.23 \cdot 0.94 = 0.03 + 0.22 = 0.25$; $w_A^K = 1.00 - w_B^K = 0.75$

2 Abkühlungskurven, Phasenregel, Gesetz der wechselnden Phasenzahl

1. Zeichnen Sie für die Legierung K im gegebenen Zweistoffsystem die Abkühlungskurve und beschriften Sie sie.
2. Erläutern Sie die Vorgänge mit dem Gibbs'schen Phasengesetz und mit dem Gesetz der wechselnden Phasenzahl.

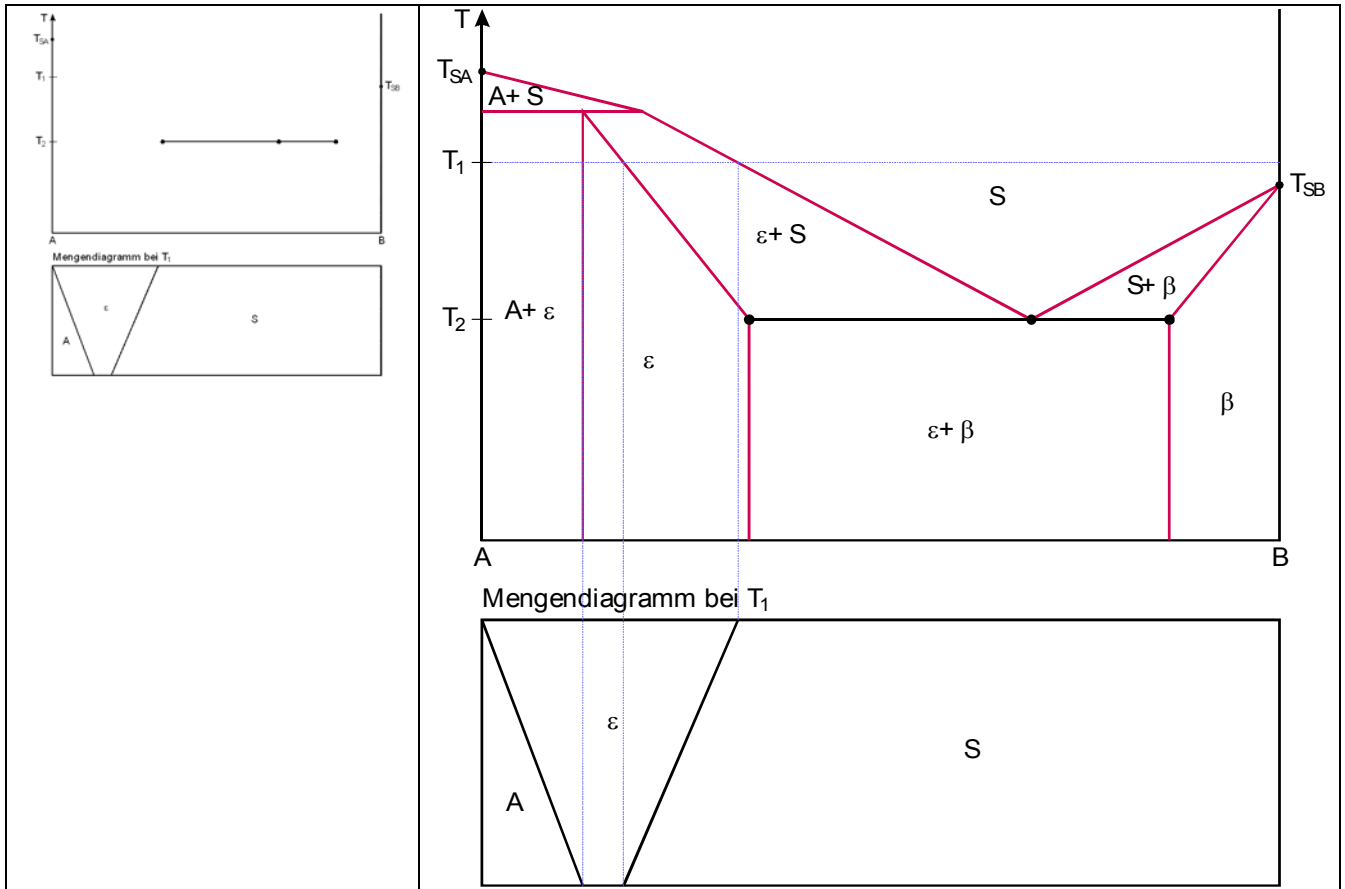


Lösung:

1. Die Abkühlungskurven werden abschnittsweise als Geraden angenommen (abgeführte Wärme pro Zeit ist konstant, Wärmekapazität ist auch konstant).
Bei T_1 und T_e sind Knickpunkte, dazwischen ist die Abkühlung langsamer, weil Kristallisationswärme frei wird. Bei T_e ist danach ein Haltepunkt: Die verbliebene Schmelze hat eutektische Zusammensetzung und kristallisiert bei konstanter Temperatur zu $\alpha_{\text{eutektisch}}$ und $\beta_{\text{eutektisch}}$.
(1): $T < T_e$: Wegen der mit abnehmender Temperatur geringer werdenden Löslichkeit von B in α und von A in β (die Phasengrenzlinien öffnen sich nach unten) wird aus den α -Mischkristallen (entstanden in der eutektischen Umwandlung und als Sekundärausscheidung aus β) die Komponente B ausgeschieden, welche als gesättigter β -Mischkristall an Korngrenzen oder im Innern des α -Mk auftritt oder an β -Mk angelagert wird. Analog entstehen α -Mk aus den β -Mk (β primär, eutektisch und sekundär gebildet). Die Beschriftung der Abkühlungskurven gibt an, welche Phase in welche andere Phase(n) umgewandelt wird.
2. Das Gibbs'sche Phasengesetz $P + F = K + 1$ bei konstantem Druck gibt einen Zusammenhang zwischen der Anzahl P der Phasen im betrachteten Gebiet des Zustandsdiagrammes, der Anzahl der Komponenten und der Anzahl der Freiheitsgrade, d.h. Zustandsgrößen, die noch nicht festgelegt sind. Aufgelöst: $F = K + 1 - P$. Weil hier ein Zweistoffsystem vorliegt, also $K=2$ ist, gilt: $F=3-P$.
Die Legierung K liegt oberhalb T_1 als Schmelze vor, Phasenzahl $P=1$; Zahl der Freiheitsgrade $F=2$ (Temperatur T , Konzentration w). Im anschliessenden Zweiphasenraum mit Schmelze und β -Mischkristallen ist $P=2$, $F=1$ (Temperatur ist variabel, die Gehalte der Phasen sind durch die Grenzlinien festgelegt). Auf der Eutektikalen (T_e) kristallisiert die restliche Schmelze zu α_e und β_e , das ist ein 3-Phasenraum, $F=3-3=0$, Temperatur und Konzentrationen der Phasen sind festgelegt. Im anschliessenden Zweiphasengebiet $\alpha+\beta$ ist $F=3-2=1$.
Gesetz der wechselnden Phasenzahl: Beim Übergang von einem Phasenraum zum nächsten erhöht oder erniedrigt sich die Phasenzahl um 1. Beispiel: S ; $S+\beta$; $S+\alpha+\beta$; $\alpha+\beta$. Ausnahme: Eutektischer /peritektischer Punkt.

3 Konstruktion Zweistoffsystem

Konstruieren Sie aus den Angaben (Schmelzpunkte von A und B, Eutektische Gerade bei T_2) und dem Mengendiagramm bei T_1 ein vollständiges Phasendiagramm und beschriften Sie es.
Anmerkung: Alle Phasengrenzlinien sind Geraden. Keine Änderung der Löslichkeit im festen Zustand.

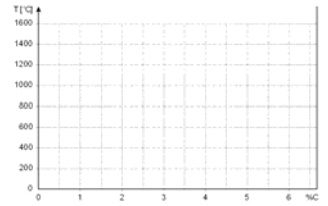


Lösung:

Eckpunkte im Mengendiagramm auf die T_1 -Konode übertragen. Figur ergänzen. Keine Änderung der Löslichkeit im festen Zustand bedeutet, dass die Grenzlinien zwischen $A + \epsilon$ und ϵ , ϵ und $\epsilon + \beta$ und $\epsilon + \beta$ und β senkrecht sind.

4 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm metastabil

- a) Zeichnen Sie im untenstehenden Feld ein Eisen-Kohlenstoff-Diagramm mit den genauen Temperaturen und Komponentengehalten ein. Beschriften Sie die Felder mit den Phasenbezeichnungen (nicht Phasengemische!)
- b) Geben Sie an, in welchem Bereich des Kohlenstoffgehalts bei Raumtemperatur Sekundärzementit ($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{sek}}$) vorliegt.

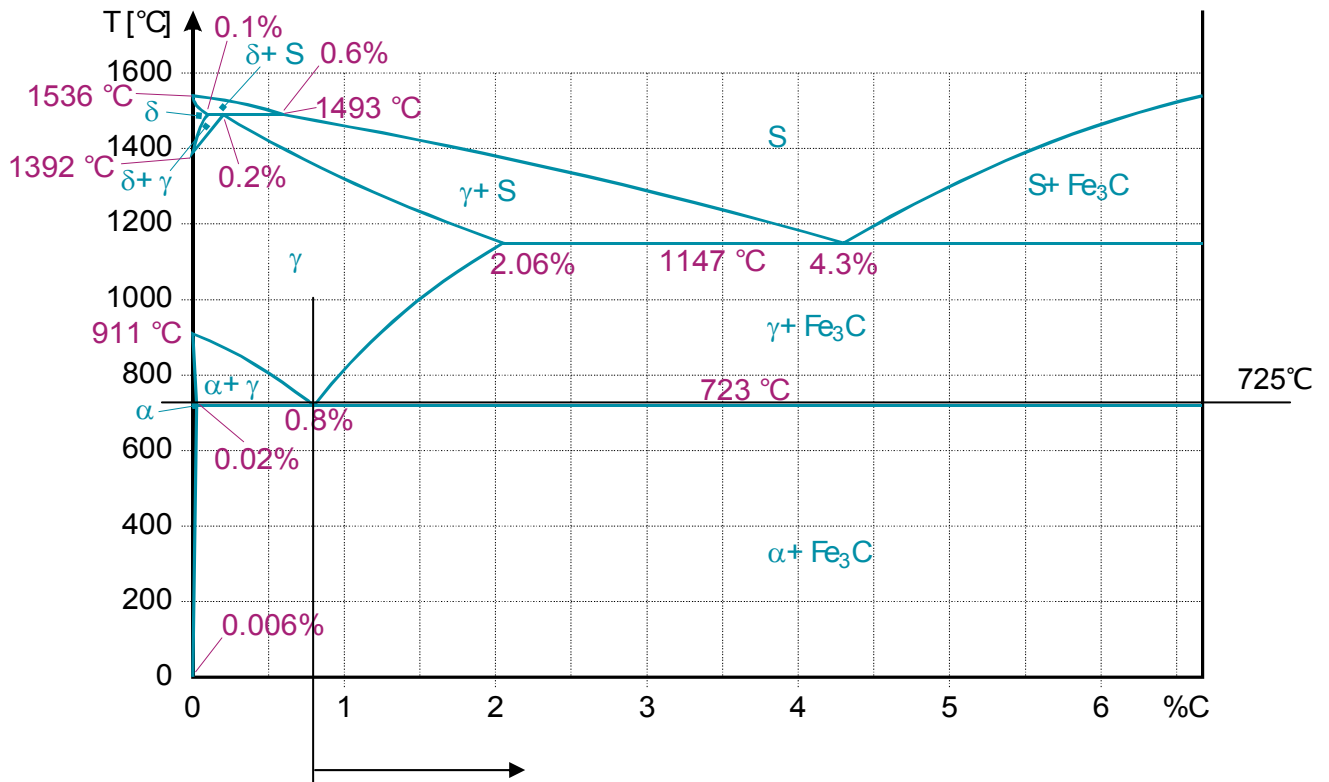


Lösung

Informationen: Skript W+F I, Kap.4,

Tab. 4.4 Maximale Löslichkeit:		
$\alpha\text{-Fe}$	723°C RT	0.02%C 0.006%C
$\delta\text{-Fe}$	1493°C	0.10%C
$\gamma\text{-Fe}$	1493°C 723°C 1147°C	0.16%C 0.80%C 2.06%C
Schmelze	1493°C 1147°C	0.51%C 4.3%C
Fe_3C	beliebig	6.67%C
Umwandlungstemperatur 100% Fe_3C :		
S- Fe_3C	1402°C	

Tab.4.5: Dreiphasenräume		
Peritektikum	S+ δ + γ	1493°C
Eutektikum	S+ γ + Fe_3C	1147°C
Eutektoid	G+ α + Fe_3C	723°C
Umwandlungstemperaturen reine Komponente Fe:		
S- δ	1536 °C	
δ - γ	1392 °C	
γ - α	911 °C	



- b) Sekundärzementit wird bei allen Legierungen gebildet, deren Abkühlung durch das Zweiphasenfeld $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ geht. Dieses erstreckt sich von 0.8 bis 6.67 %C. (vgl. auch Mengendiagramm bei Raumtemperatur). Insbesondere wird aus γ_e des Ledeburit I $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{sek}}$ ausgeschieden.

5 Stahlgefüge

- a) Sie wollen einen Stahl herstellen, der bei Raumtemperatur **keinen Perlit** enthält. In welchem Bereich darf sich der Kohlenstoffgehalt befinden?
- b) Ein anderer Stahl soll **Ferrit und Perlit zu je 50 %** enthalten. Welchen Bereich des Kohlenstoffgehalts streben sie nun an?

Lösung:

a) Der C-Gehalt muss unter 0.02 % liegen. Nur dann wird oberhalb von 723 °C der Austenit vollständig in α -Ferrit umgewandelt. Liegt bei 723 °C noch Austenit vor, zerfällt dieser eutektoid zu Perlit. (Der eutektische Austenit in Ledeburit I zerfällt bei 723°C ebenfalls in Perlit, Ledeburit II enthält also Perlit).

b) (Neue Argumentation) Bei Raumtemperatur enthält dieser Stahl auch Fe_3C_{tert} aus voreutektoidem Ferrit. Die Frage müsste also heißen "Ferrit und Perlit zu gleichen Teilen".

Ein Stahl mit Kohlenstoffgehalt x bestand nach der eutektoiden Umwandlung zu $\frac{x-0.02}{0.8-0.02}$ aus

Perlit, Rest zu 1 = $\frac{0.8-x}{0.8-0.02}$ aus voreutektoidem Ferrit. Von diesem Ferrit verbleibt nach

Abkühlung auf Raumtemperatur $\frac{6.67-0.02}{6.67-0.006} = 0.998$, Rest zu 1 ist Fe_3C_{tert} . Gleichviel Ferrit wie

Perlit bei Raumtemperatur heisst also:

$$\frac{x-0.02}{0.8-0.02} = \frac{0.8-x}{0.8-0.02} \cdot 0.998, \text{ somit } x = \frac{0.998 \cdot 0.8 + 0.02}{1 + 0.998} = 0.4096\%C$$

$$\text{Anteil Perlit bei Raumtemperatur} = \frac{x-0.02}{0.8-0.02} = \frac{0.4096-0.02}{0.8-0.02} = 0.4995$$

$$\text{Anteil Ferrit bei Raumtemperatur} = \frac{0.8-x}{0.8-0.02} \cdot 0.998 = \frac{0.8-0.4096}{0.8-0.02} \cdot 0.998 = 0.4995$$

Kurzverfahren: Ausscheidung von Fe_3C_{tert} wird vernachlässigt, C-Gehalt von Ferrit bei Raumtemperatur sei immer noch 0.02%. Gleiche Anteile heisst 50%/50%. C-Gehalt $= (0.8+0.02)=0.41\%$

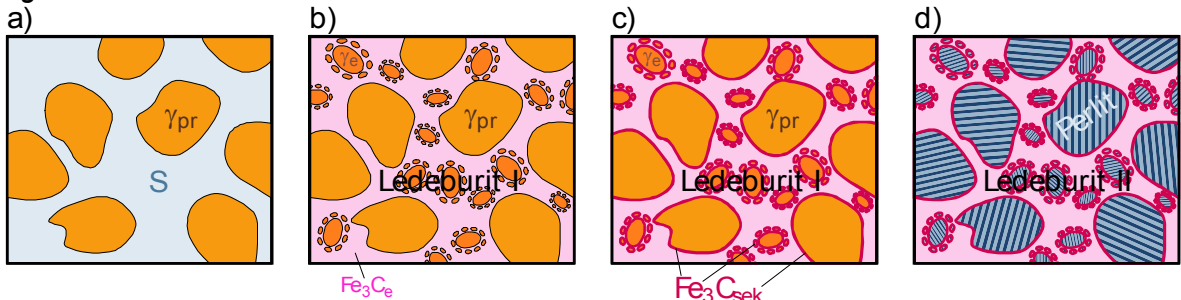
6 Gefügebilder

Betrachten Sie eine Eisen-Kohlenstofflegierung mit 3 % Kohlenstoffgehalt.

Zeichnen Sie schematisch das Gefüge dieser Legierung bei

- a) 1150 °C
b) 1140 °C
c) 730 °C
d) 25 °C

Lösung



7 Metastabiles Eisen-Kohlenstoff-System, Mengendiagramm.

(Vgl. Abb.)

Konstruktion der Mengendiagramme für Phasen (links) und daraus abgeleitet für Gefügeanteile (rechts).

Wir betrachten bei einer Abkühlung die Zustände bei 5 charakteristischen Temperaturen T_1 - T_5 , insbesondere die Gehalte der Phasen in den drei Legierungen, welche genau den Gefügen Perlit (0.8% C), γ_{pr} (2.06% C) und Ledeburit (4.3% C) entsprechen. Diese sind im festen Zustand charakteristische Gemenge von γ -(Austenit) oder α -Mischkristall (Ferrit) und Fe_3C (Zementit).

Bei T_1 liegen die 3 Phasen Austenit γ , Schmelze S und Zementit Fe_3C vor. K_1 und K_2 bestehen aus 100% γ , K_3 aus 100% Schmelze. Legierungen mit C-Gehalten grösser als K_2 oder K_3 bestehen aus Mischungen von γ und S bzw. S und Fe_3C .	Zur Konstruktion der Mengendiagramme für Gefügebestandteile werden die Phasenanteile der Legierungen $K_1 - K_3$ übertragen. Die ausgezogenen Linien stellen die Grenzen zwischen den Gefügeanteilen (α -Mk, Perlit, Fe_3C_{pr} ; Ledeburit ...) dar, die gestrichelten Linien die Phasengrenzen innerhalb der Gefügebestandteile.
Bei T_2 hat sich für K_1 und K_2 nichts verändert, K_3 hat sich von Schmelze (eutektisch) in γ und Fe_3C umgewandelt, die Anteile werden durch den Schnittpunkt der Phasengrenzlinie mit der Senkrechten markiert. → <i>Wir merken uns diese Werte für die Konstruktion der Mengendiagramme für Gefügebestandteile.</i>	
Bei T_3 hat sich im Zustandsdiagramm die Phasengrenzlinie von γ nach links verschoben (abnehmende Löslichkeit von C in γ , der ausgeschiedene Kohlenstoff hat sich in Fe_3C (sekundär) umgewandelt.) und entsprechend die 100%- γ -Grenze im Mengendiagramm, die Grenzlinie hier dreht sich im Gegenuhrzeigersinn, K_2 und K_3 haben einen kleineren γ -Gehalt und grösseren Fe_3C -Gehalt. Zur Erinnerung: Die γ -Anteile aller Legierungen K_1 - K_3 haben gleiche Zusammensetzung, nämlich 0.8% C (eutektoid). Für C-Gehalte kleiner als K_1 hat sich γ teilweise in α umgewandelt.	M1: Fe_3C_{sek} nimmt nach rechts ab, weil der Anteil an γ_{pr} kleiner wird, und nimmt nach links ab, weil der C-Gehalt in γ kleiner ist
Bei T_4 hat die eutektoidale Umwandlung von γ in α und Fe_3C stattgefunden. Der Zuwachs an Fe_3C wird durch ein weiteres Absinken der Grenzlinie im Mengendiagramm dargestellt.	
Bei T_5 (Raumtemperatur) ist die Löslichkeit von C in α gesunken. Das gebildete Fe_3C_{tert} ist mengenmässig unbedeutend.	

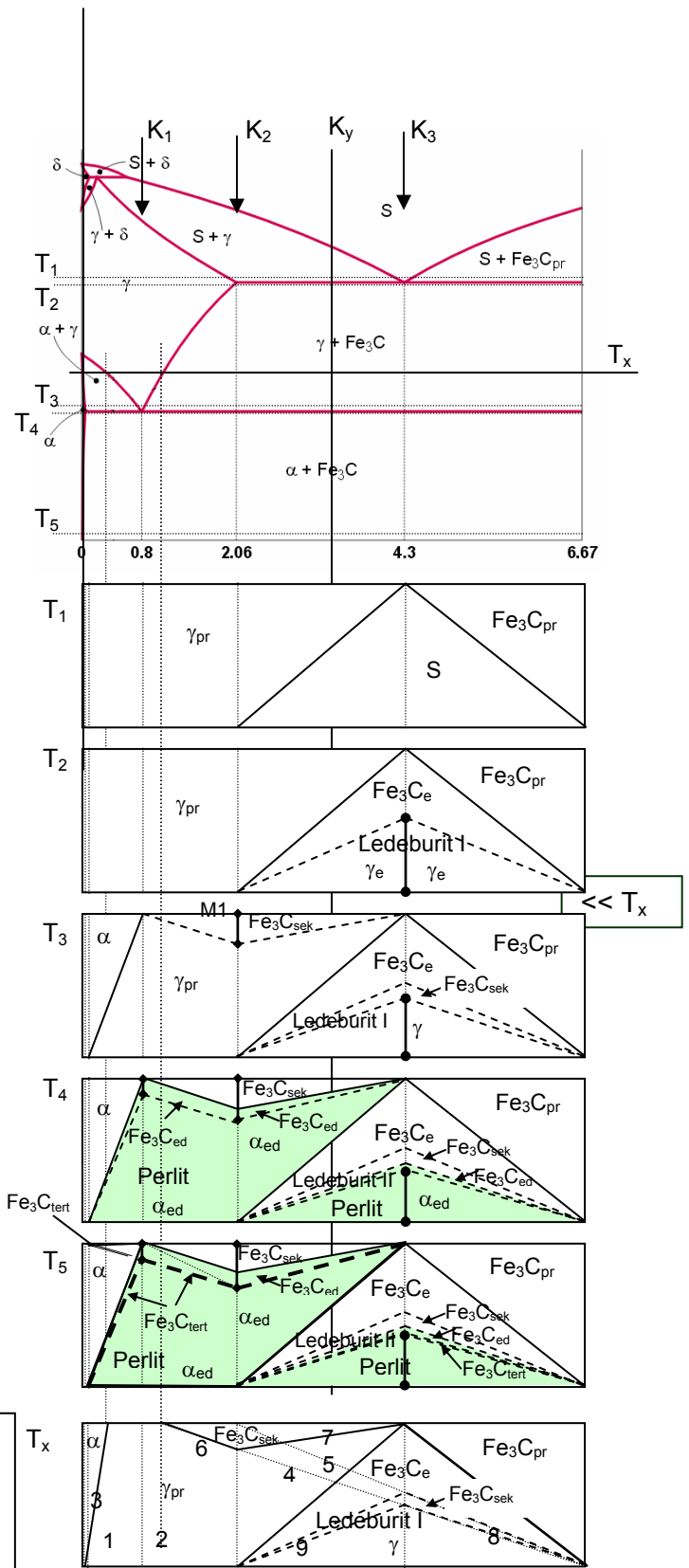
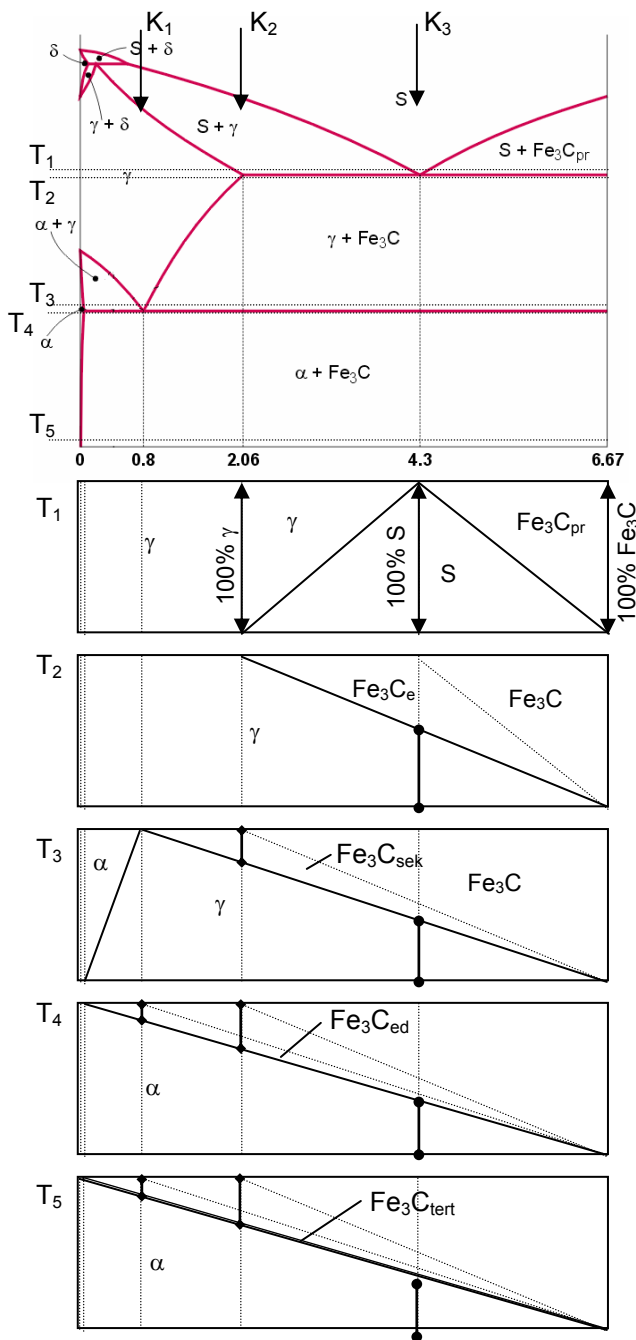
Aufgaben:

- Beschriften und kolorieren Sie Perlit-Gebiete in den angegebenen Mengendiagrammen.
- Lesen Sie die Gefügeanteile und deren Phasengehalte aus dem Diagramm für die Legierung K_y bei T_3 und T_5 .
- Zeichnen Sie ein Mengendiagramm für die Gefügeanteile für die Temperatur T_x .

T_x

--	--	--	--	--

Lösung:



Lösung Frage c: (Vgl. Linien-Nummern)
Mengendiagramm wie bei T_2 , zusätzlich:
Schnittpunkte der T_x -Konoden mit der α - γ -und
der γ - Fe_3C -Phasengrenzlinie nach unten
übertragen (1, 2). α - γ -Grenzlinie eintragen (3).
Hilfslinien 4, 5 eintragen ($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{sek}}$), diese mit 6, 8
ausziehen, mit 7 und 9 ergänzen.

Lösung Frage b:

Entlang der Vertikalen K_x die Abschnitte herausgelesen:

T_3		
$Fe_3C_{sek} = 1.8 \text{ mm} \rightarrow 9 \%$ $\gamma_{pr} = 6.8 \text{ mm} \rightarrow 34 \%$	}	aus γ_{pr}
$Fe_3C_e = 5.0 \text{ mm} \rightarrow 25 \%$ $Fe_3C_{sek} = 1.4 \text{ mm} \rightarrow 7 \%$ $\gamma = 5.0 \text{ mm} \rightarrow 25 \%$	}	Ledeburit I
Total 100 %		

T_5		
$Fe_3C_{sek} = 1.8 \text{ mm} \rightarrow 9 \%$ $Fe_3C_{ed} = 0.8 \text{ mm} \rightarrow 4 \%$ $\alpha_{ed} = 6.0 \text{ mm} \rightarrow 30 \%$	}	aus γ_{pr}
$Fe_3C_e = 5.0 \text{ mm} \rightarrow 25 \%$ $Fe_3C_{sek} = 1.4 \text{ mm} \rightarrow 7 \%$ $Fe_3C_{ed} = 1.0 \text{ mm} \rightarrow 5 \%$ $\alpha_{ed} = 4.0 \text{ mm} \rightarrow 20 \%$	}	Ledeburit II
Total 100 %		