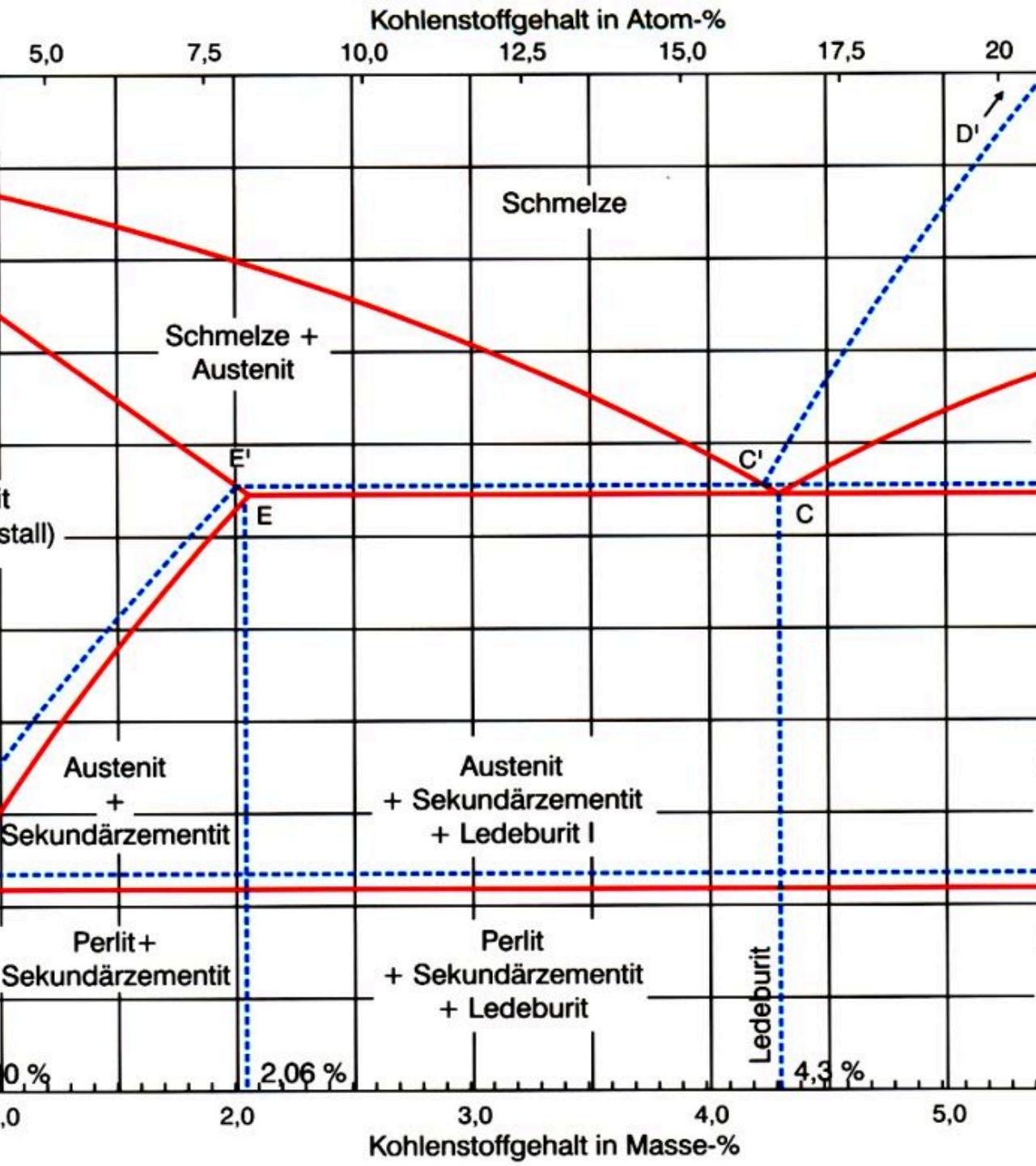


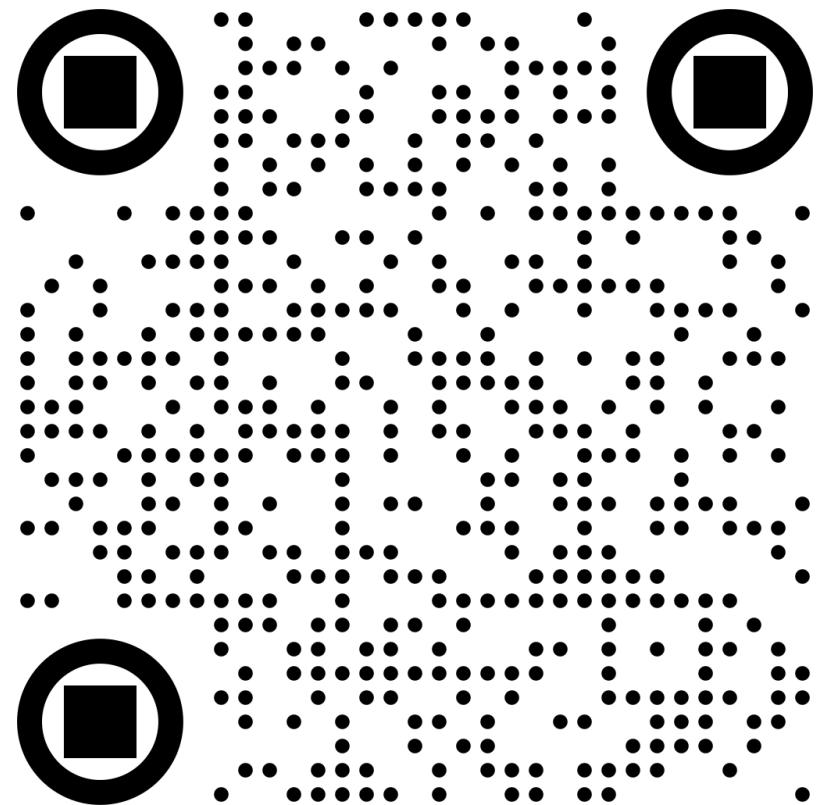
Vorlesung Werkstofftechnik - Gefüge der Werkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{ID}
Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de
Teile des Skripts sind von
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Häberle
übernommen



Inhalte



Begriffe

Legierung

- von "ligare" - zusammenbinden, verbinden, vereinigen
- Gemisch aus mehreren Atomsorten (*Komponenten*) mit *metallischem Charakter*
- Komponenten
 - meist metallisch (Cu, Ni)
 - nicht metallisch (C, P, S, N, O)
- Variationen
 - welche Komponenten
 - Zahl der Komponenten
 - Konzentration der Komponenten

Chemische Zusammensetzung oder Konzentration

Massenanteil, Gewichtsanteil, Massenprozent (Synonym)

$$\frac{m_1}{\sum_i m_i} \cdot 100 = m_{1-rel} \text{ in [%]}$$

$$\text{Bsp. } m_{Cu-rel} = \frac{m_{Cu}}{m_{Cu} + m_{Fe}} \cdot 100$$

Massen m von Komponenten sind unterschiedlich

Atomanteil

$$\frac{n_1}{\sum_i n_i} \cdot 100 = n_{1-rel} \text{ in [%]}$$

$$\text{Bsp. } n_{Cu-rel} = \frac{n_{Cu}}{n_{Cu} + n_{Fe}} \cdot 100$$

Wenn Massen m von Komponenten ähnlich sind, dann sind n_{rel} und m_{rel} gleich.

Übung

1 kg Legierung 25% Ni - 75% Cu.

Wieviel Masse hat Cu und Ni für den Massenanteil und den Atomanteil?

Lösung

- ▶ Massenanteil
- ▶ Atomanteil

Phase

- Bekannt im Bezug auf den Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig, plasmaförmig)

Allgemeine Definition

Unter Phase versteht man einen chemisch und physikalisch gleichartigen homogenen Bestandteil einer Legierung oder von Materie überhaupt.

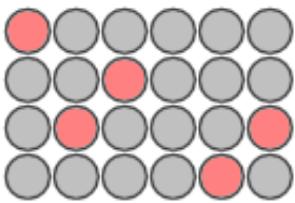
- ▶ Einphasigkeit
- ▶ Zweiphasigkeit
- ▶ Mischkristall



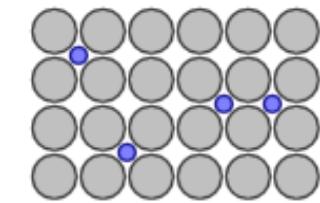
Mischkristalle - Arten

Substitutionsmischkristall

- ähnlicher chemischer Charakter
- ähnlicher Durchmesser
- gleiches Kristallgitter



Substitutionsmischkristalle



Einlagerungsmischkristalle

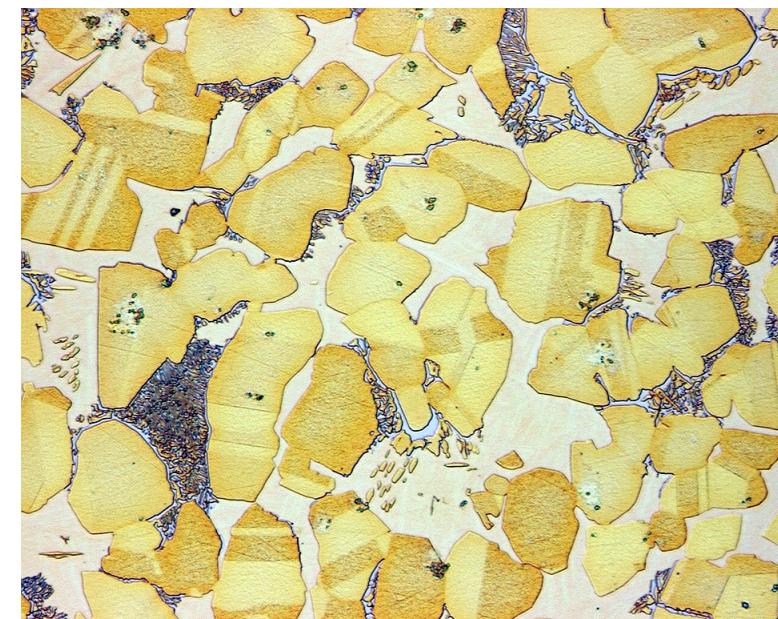
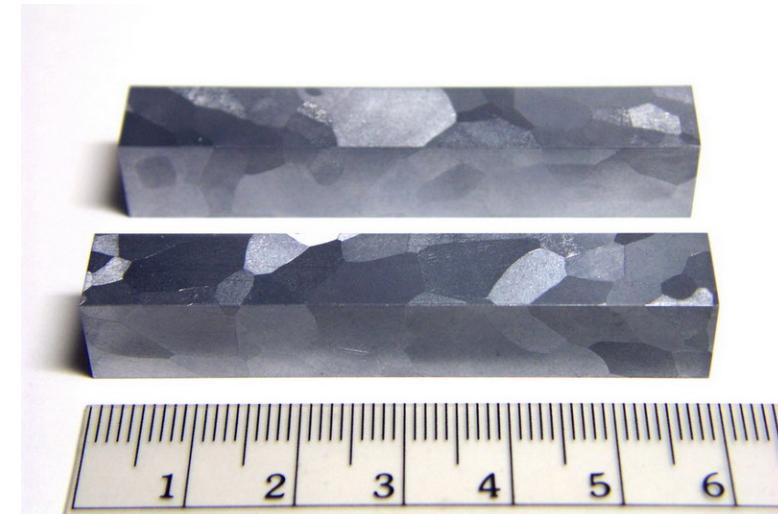
Einlagerungsmischkristall

- kleinere Atome
- in Lücken des Kristallgitters eingelagert (Einlagerungs- oder Zwischengitteratome)
- zweite Komponente ist gelöst

Beide Arten sind einphasig.

Gefüge der Werkstoffe

- durch Art, Größe, Form und Orientierung und Anordnung der einzelnen Bestandteile (Phasen), wie Kristallite (Körner), amorphe Bereiche, Verstärkungs- bzw. Füllstoffe, charakterisiert



Entstehung des Gefüges

Schmelze → Abkühlung /

Unterkühlung

↓

Keimbildung (homogen + heterogen)

↓

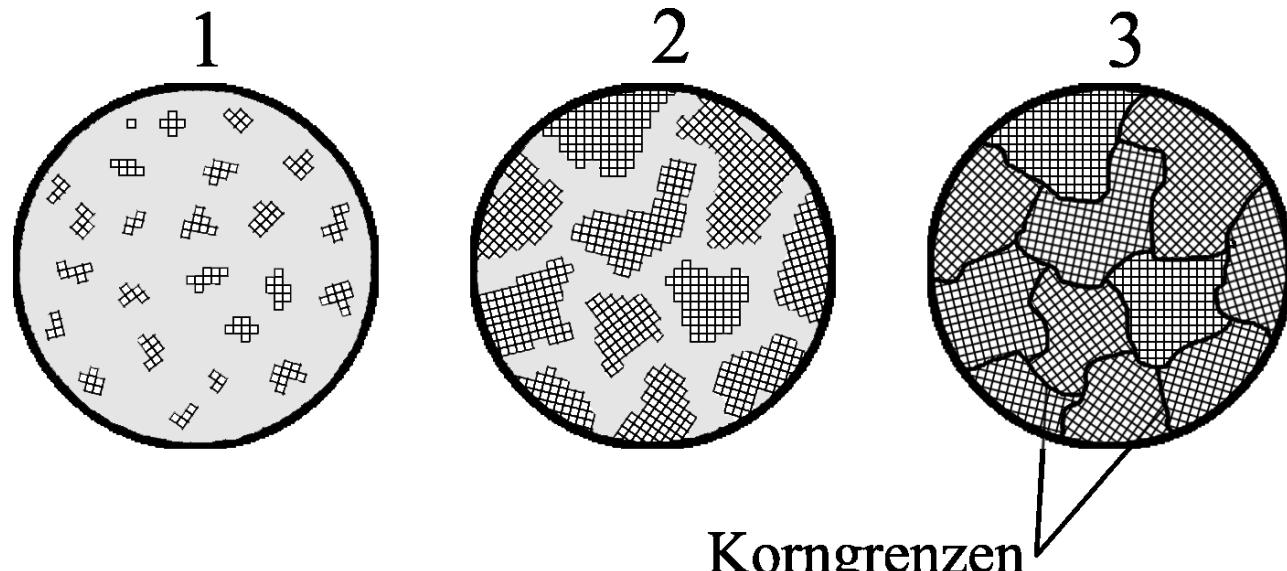
Keimwachstum → Kristallisation

↓

Kristallitbildung (Kornbildung mit
Korngrenzen)

↓

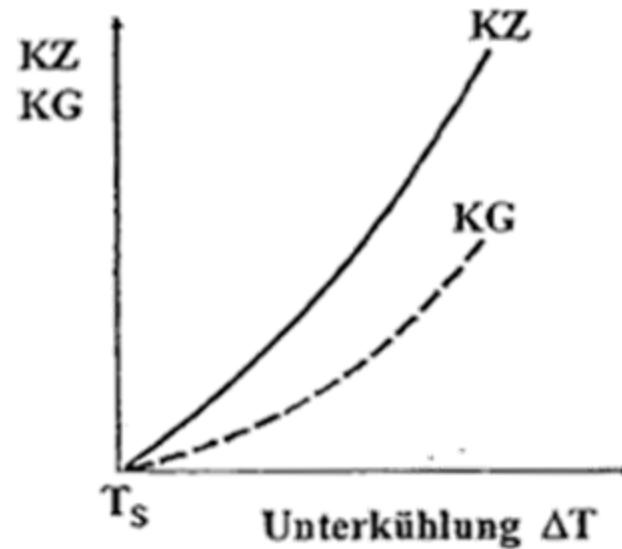
Σ aller Körner und Korngrenzen =>
Gefüge



Keimbildung

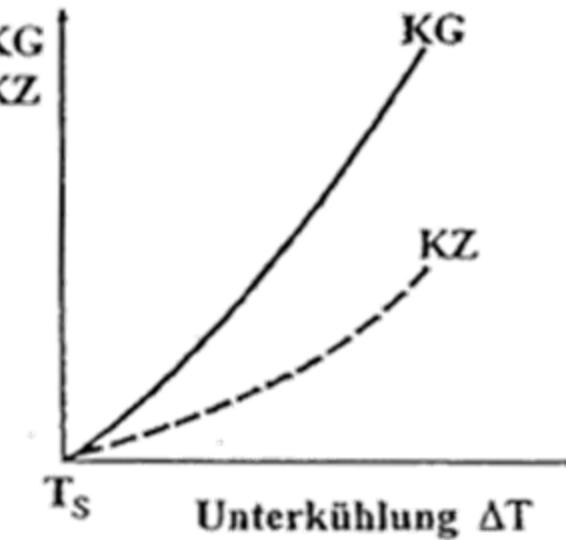
- Erstarren findet nicht gleichmäßig statt -> Bildung von Keimen
- homogen (arteigenen) oder heterogen (artfremden)
- Wachstum der Keime (Kristallwachstum) bis gesamte Schmelze erstarrt ist
- Es bestehen Zusammenhänge zwischen der Keimzahl (KZ) und der Kristallisationsgeschwindigkeit (KG) einer-seits und der Unterkühlung ΔT andererseits.

Einflussparameter auf die Ausbildung der Korngröße



a) → feinkörniges Gefüge

- große Zahl von Keimen -> feinkörniges Gefüge
- schnelles Kristallwachstum und geringe KZ -> grobkörniges Gefüge



b) → grobkörniges Gefüge

Begriffe

Korn

- Keime haben Wachstum abgeschlossen und stoßen aneinander
- Kristallorientierung zwischen benachbarten Körnern ist in der Regel unterschiedlich
- Form und Größe wird durch den Wärmefluss bestimmt
 - gleichmäßig in alle Richtungen - *globulistisch*
 - Vorzugsrichtung des Wärmeflusses - *transkristalline Erstarrung*

Korngrenze

- Übergangsflächen zwischen Körnern

Gießen oder Stranggießen

- Beim Gießen oder Stranggießen in eine Metallform (Kokille) bildet sich eine Gussstruktur in drei Zonen, meist mit einer deutlichen Abgrenzung zueinander:

1. Feinkörnige globulare Randzone

- starke Unterkühlung der Schmelze an der Kokillenwand
- Ausbildung von zahlreichen Kristallkeime -> kleine, gleichmäßige Kristallite

2. Transkristallisationszone mit stängelförmigen, sehr groben Kristalliten

- gerichtetes Wachstum von Kristallite (Stängelkristalle), bei denen die kristallografische Orientierung mit der Richtung des Wärmegefälles übereinstimmt;
- die dadurch aufgetretene Orientierung => Gusstextur

3. Globulare Kernzone

- Verunreinigungen, werden von den Stängelkristallen vor sich her geschoben und reichern sich im Kern an
- hohen Anzahl von artfremden Keimen
- globulare feinkörnige Kernzone
- Bei sehr reinen Metallen liegt in der dritten Zone allerdings ein grobkörniges Gefüge vor

Gefügenachweise

- Im Allgemeinen sind die einzelnen Kristallite (Körner) in einem Werkstoff nicht ohne weiteres sichtbar.
- Für werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen ist es jedoch notwendig, die vorhandene Mikrostruktur zu analysieren.
- Arbeitsschritte:
 - gezielte Probenentnahme
 - Schleifen und Polieren der Probe
 - Ätzen der Oberfläche

Mikroschliffe

- sorgfältig präparierte Schlifffläche kann mittels eines Licht- oder Elektronenrastermikroskops betrachtet werden.
- Das Elektronenrastermikroskop weist neben der wesentlich stärkeren Auflösung auch eine höhere Schärfentiefe auf.

Ätzungen

Das Ätzen zur Gefügeentwicklung kann auch als ein Korrosionsvorgang bezeichnet werden.

Korngrenzenätzung

- bevorzugtes auflösen von Korngrenzen

Kornflächenätzung

- nebeneinander liegende Kornschnittflächen werden unterschiedlich stark aufgeraut bzw. mit Oxidschichten bedeckt
- Körner reflektieren das Licht unterschiedlich

Makroschliffe

Mit Hilfe der Makroätzungen können nur Gefügeerscheinungen untersucht werden, die mit bloßem Auge oder einer Lupe zu erkennen sind.

Folgende Nachweise sind möglich:

- Seigerungen und deren Lokalisierung: Ätzungen nach Heyn und Oberhoffer oder Baumannabdruck
- Güte von Schweißverbindungen: Adlerätzung
- Entwicklung von Kraftwirkungslinien nach plastischer Verformung: Ätzung nach Fry

Begriffe für die qualitative und quantitative Beschreibung von Gefügen

Metallographie - Metalle

Keramographie - Keramiken

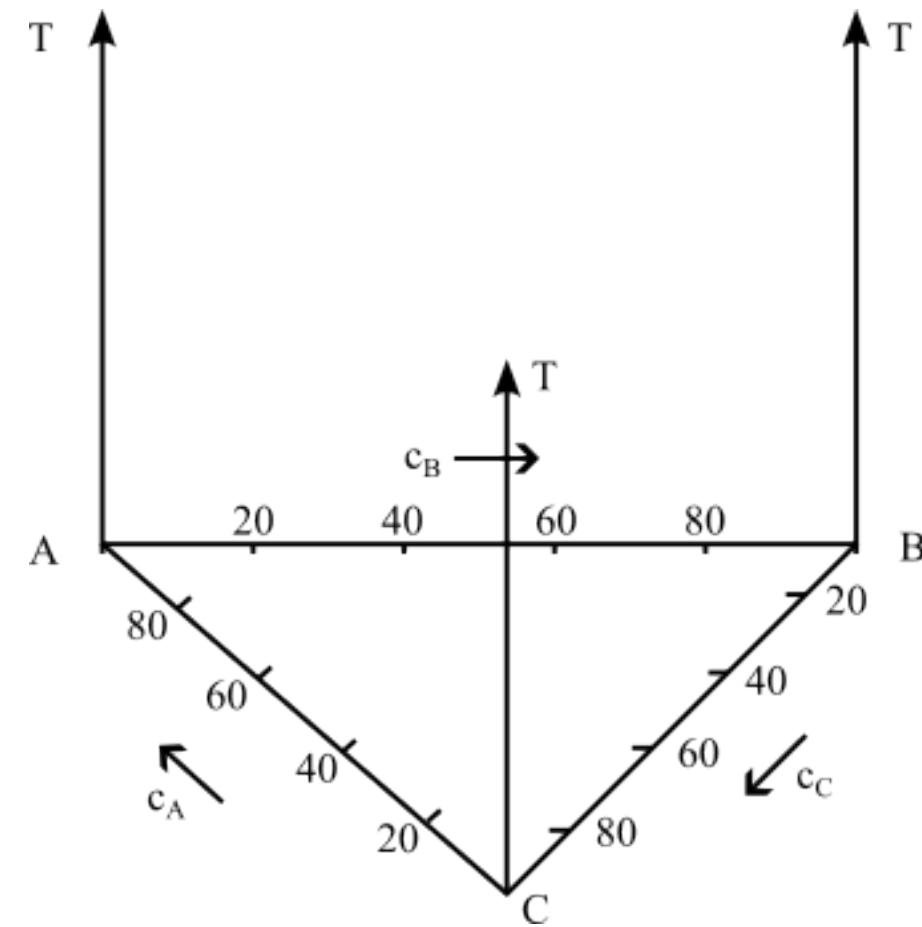
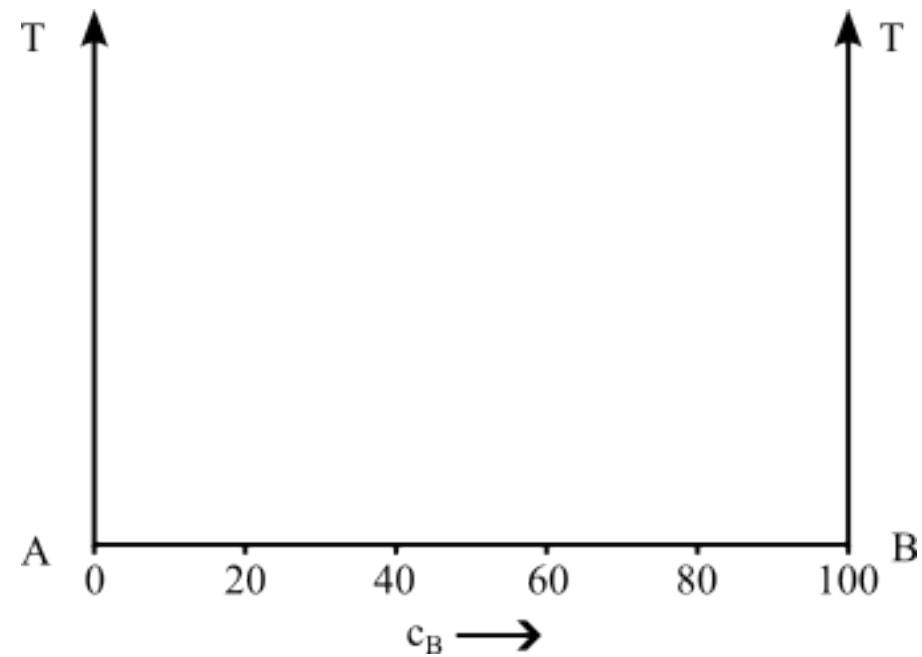
Plastographie - Polymerwerkstoffe

Zustandsdiagramme

- auch Phasendiagramm -phase diagram-
- stellt den Zustand von Legierungen und Stoffgemischen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung, Temperatur und ggf. dem Druck dar
- Zustand meint die auftretenden Phasen (alle festen, flüssige, gasförmige)

Achtung!

Zustandsdiagramme sind Gleichgewichtsdiagramme. Sie haben nur Gültigkeit bei einer sehr lang-samen Abkühlung aus dem schmelzflüssigen Zustand bis hin zur Raumtemperatur, bei der sich das Gleichgewicht zwischen den Phasen (an bzw. zwischen den Phasengrenzlinien) einstellen kann.



Die Anzahl der miteinander im Gleichgewicht stehenden Phasen ist gesetzmäßig verknüpft mit der Zahl der an der Legierungsbildung beteiligten Komponenten und der Zahl der Freiheitsgrade über die Gibbsche Phasenregel. Ein Freiheitsgrad beinhaltet die mögliche Veränderung von Zustandsvariablen, ohne das Gleichgewicht, d.h. die Anzahl der Phasen, zu ändern. Die Anzahl der frei wählbaren Zustandsvariablen wird nach der Phasenregel bestimmt:

$$F = n - P + 2$$

(für Gase und Flüssigkeiten)

F = Anzahl der Freiheitsgrade; n = Anzahl der Komponenten; P = Anzahl der Phasen

Unter Annahme, dass der Druck konstant ist (feste Stoffe), wird die Gibbsche Phasenregel zu:

$$F = n - P + 1$$

Damit ergibt sich für die Anwendung dieser Gesetzmäßigkeiten bei der Abkühlungs- und Erwärmungskurve für metallische Systeme

Löslichkeiten

- Unlöslich
- Löslich

Beispiel aus der eigenen Erfahrung

- Ölfilm auf Wasser ist nicht löslich und es findet eine Trennung aufgrund der unterschiedlichen Dichte statt
- Salz- / Zuckerkristalle in Wasser werden vollständig gelöst und ist nicht mehr sichtbar

Eutektischer Entmischung

- Komponenten sind **löslich** im flüssigen Zustand
- Komponenten sind **unlöslich** im festen Zustand

Eutektische Reaktion

- bei einer Konzentration erstarren aus der Schmelze S bei konstanter Temperatur (Eutektikale) A- und B-Kristalle zu einem feinkristallinen Kristallgemisch (Eutektikum)
- eutektische Gefüge besitzt oft eine schicht- oder lamellenartige Struktur
- Legierungen anderer Konzentrationen scheiden vor Erreichen der Eutektikale (Haltepunkt bei der Eutektischen Reaktion) die überwiegende Komponente aus (A- oder B-Kristalle), so dass sich die Konzentration der verbleibenden Schmelze der eutektischen Zusammensetzung annähert.
- die Eutektikale bildet die Soliduslinie des gesamten Systems

System mit Mischungslücken

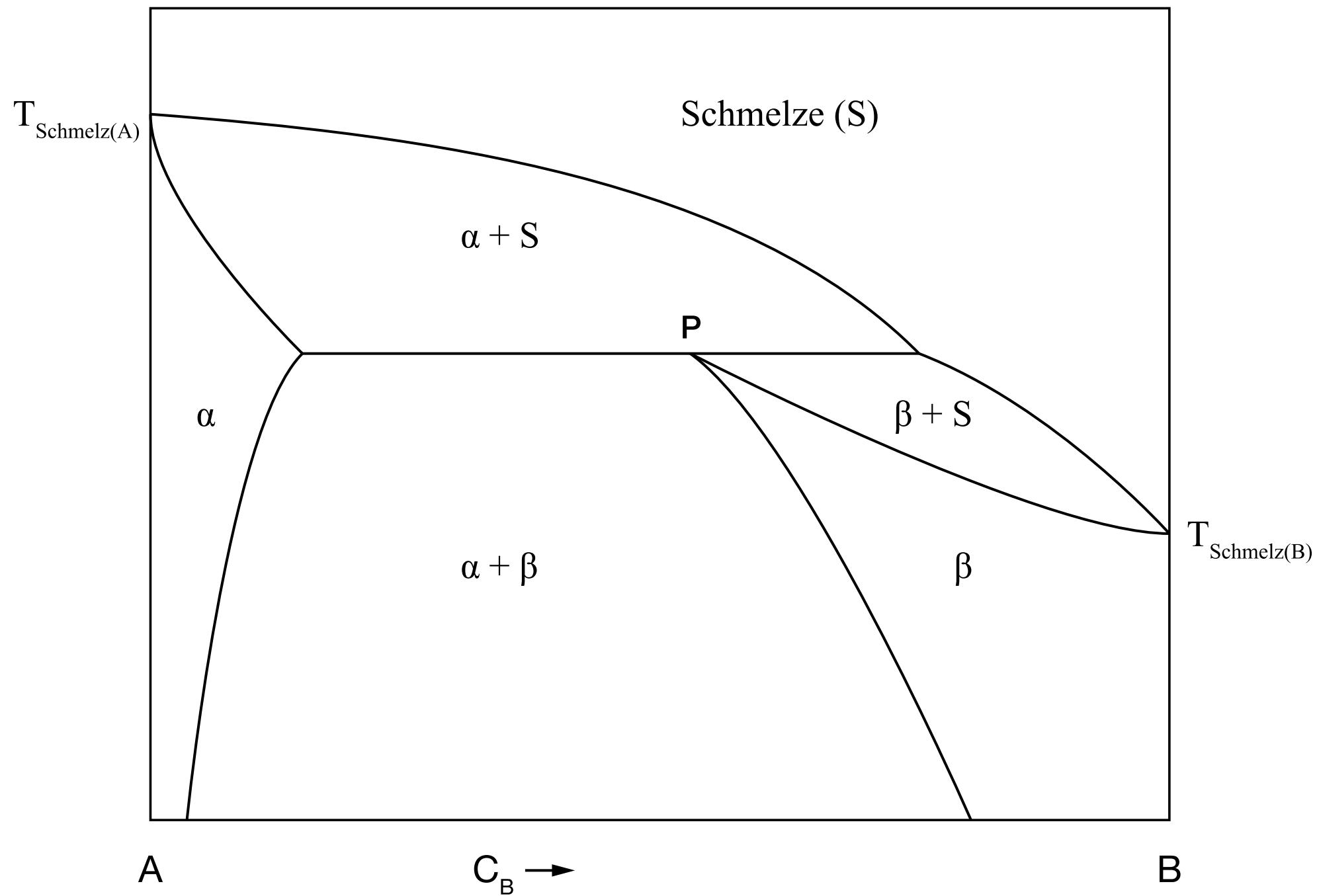
- Komponenten sind **löslich** im flüssigen Zustand
- Komponenten sind **begrenzt löslich** im festen Zustand

Löslichkeits- oder Sättigungslinien

- Linien, die die Einphasengebiete (α , β) von dem Gebiet der Kristallgemische aus Mischkristallen ($\alpha + \beta$) abgrenzen
- Sonderfall:
- ein System von Mischkristallen bilden Einlagerungsmischkristalle
 - Die Konzentrationsachse endet dann mit der Konzentration der Sättigung der Komponente B im Gitter der Komponente A
 - Das Einphasengebiet der Komponente B kann dann nicht existieren.

Systeme mit Peritektikum (mit peritektischer Entmischung)

- weit auseinander liegende Schmelz-/Erstarrungstemperaturen der beteiligten Komponenten sind charakteristisch.
- Bei Abkühlung aus der Schmelze bildet sich ein Mischkristall α
- bildet bei konstanter Temperatur (entsprechend der **Eutektikalen**) mit der Schmelze reagierend eine zweite Mischkristallart β bildet.
- bei einer peritektischen Reaktion entstehen aus der Schmelze und bereits ausgeschiedenen α -Mischkristallen bei gleich bleibender Temperatur neue β -Mischkristalle.



Realdiagramme

- die bisherigen Diagramme waren Idealdiagramme und treten so nicht wirklich auf
- Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) ist das wichtigste Realdiagramm
- Grundmetall ist Eisen -> Stahl oder Eisenguss
- das EKD setzt sich aus den Idealdiagrammen - dem peritektischen, eutektischen und eutektoiden Teildiagramm - zusammen

- Man kann je nach Erscheinungsform des Kohlenstoffs zwischen dem stabilen System Fe-C, in dem Kohlenstoff als Graphit, und dem metastabilen System Fe-Fe₃C, in dem Kohlenstoff gebunden als Fe₃C (intermediäre Phase Zementit) vorliegt, unterscheiden.
- Stabil bedeutet, dass der Kohlenstoff in Form von Graphit nicht weiter zerlegt werden kann, Fe₃C aber bei langzeitigem Glühen in Eisen und Temperkohle zerfällt.
- Das metastabile System stellt gewissermaßen ein relatives Minimum der Gesamtenergie des Systems dar. Für technische Belange kann es als „hinreichend stabil“ bewertet werden.

Wichtige Gleichgewichtslinien

ABCD Liquiduslinie

AHIECF Soliduslinie

ECF Eutektikale

PSK Eutektoiden

ES, PQ Sättigungslinien MOSK Curie-Linie

QPSECD Bildung/Auflösung Fe₃C

Punkte im Zustandsdiagramm

S - eutektoider Punkt

C - eutektischer Punkt

G - α / γ - Umwandlungspunkt des reinen Eisens

E - Punkt max. C-Löslichkeit im α - MK

P - Punkt max. C-Löslichkeit im γ - MK

u. a. m. (vgl. Fe-Fe₃C - Diagramm)

Folgende Grenzlinientemperaturen
(Umwandlungstemperaturen) werden
benutzt:

A: arreter (anhalten)

r: refroidir (abkühlen)

c: chauffer (erwärmen)

e: équilibre (Gleichgewicht)

Ac1: 723°C

Ac3: abhängig vom C-Gehalt

Sekundärzementit (aus dem Austenit bei sinkender Temperatur ausgeschieden) und (bei langsamer Abkühlung) aus Perlit. Der Perlit entsteht durch den eutektoiden Zerfall des Austenits aus dem Ledeburit I bei 723 °C. Bei rascherer Abkühlung kann anstelle des Perlit auch Bainit bzw. bei sehr schneller Abkühlung Martensit vorliegen. Ledeburit ist schlecht umformbar, hat sehr geringe Duktilität. Das Gefüge ist bei Raumtemperatur als feines Gemenge von Fe₃C-Kristalliten und Perlitbereichen im Auflichtmikroskop als charakteristische Pantherfellstruktur sichtbar.

a) b)

Bild 3.3-3: a) REM-Aufnahme eines vollständig perlitischen Gefüges;
b) Lichtmikroskopische Aufnahme von Ledeburit

Merke:

Die Eigenschaften der Legierung (z.B. Stahl, Gusseisen) wird durch die Art der beteiligten Phasen (z.B. α -Mk, Fe₃C), ihren mengenmäßigen Anteil (z.B. abhängig vom C-Gehalt) und die Art ihrer Verteilung im Gefüge bestimmt.

3.3.2 Phasen- und Gefüge im Ungleichgewichtszustand

Bisher wurde der oben beschriebene Gleichgewichtszustand betrachtet. Die Ausbildung

Referenzen

Rainer Schwab: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies, 2019; ISBN-10
352771538X

[Grundlagen der Metallkunde](#)