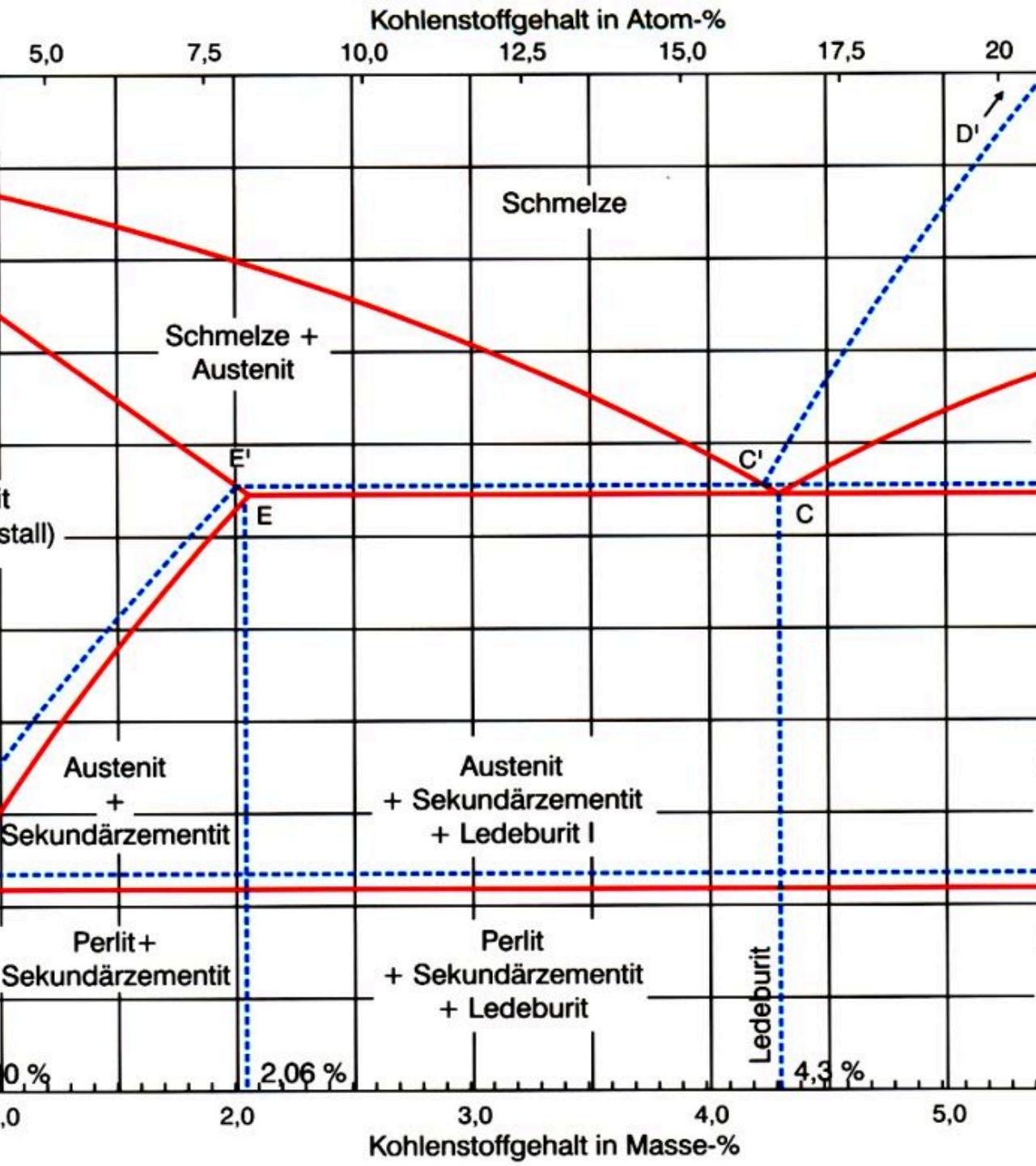


Vorlesung Werkstofftechnik - Gefüge der Werkstoffe

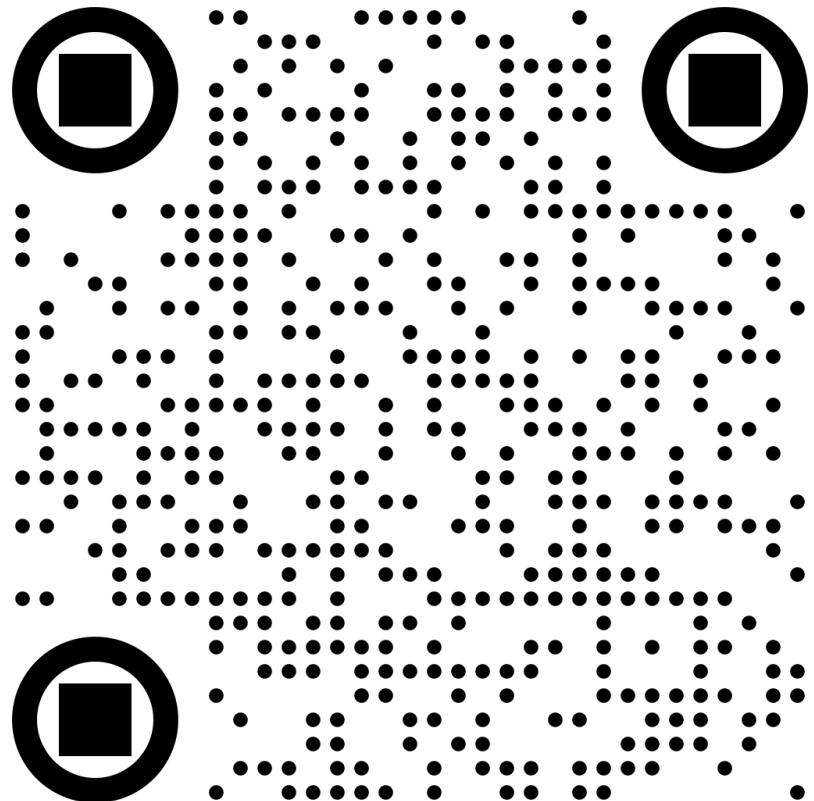
Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{id}
Hochschule Magdeburg-Stendal

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



Inhalte

- Grundbegriffe
- Kristallbildung
- Zustandsdiagramme



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.

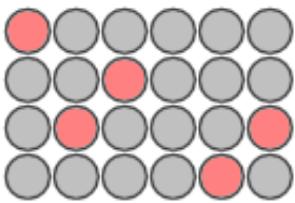
- ▶ Einphasigkeit
- ▶ Zweiphasigkeit
- ▶ Mischkristall



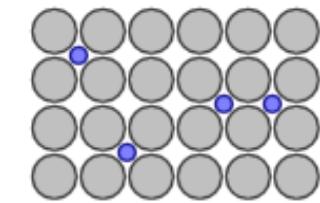
Mischkristalle - Arten

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.

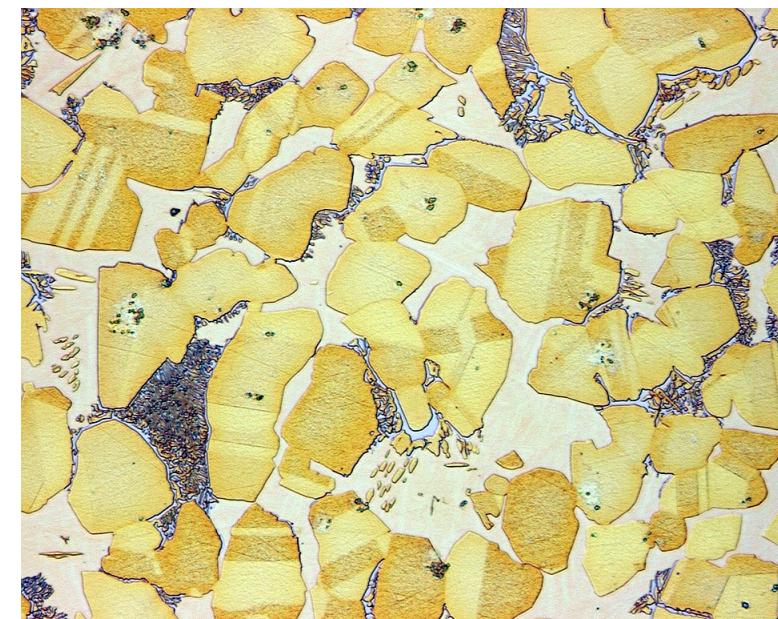
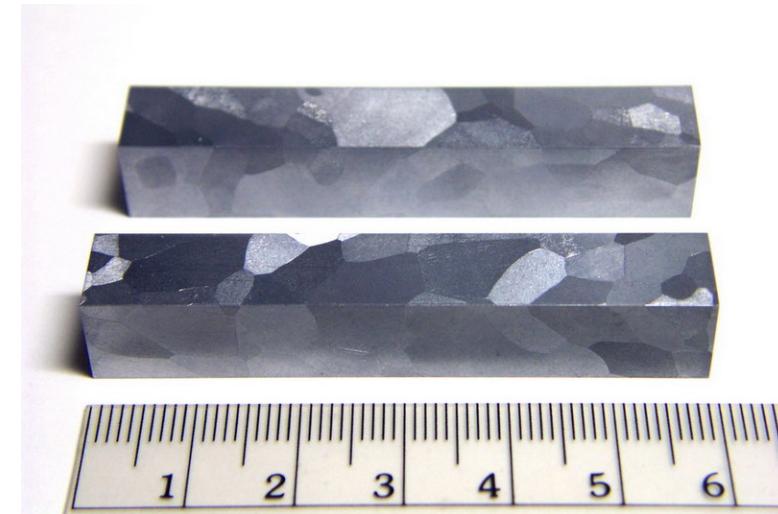
Intermetallische Phase

- meist komplizierter Gitteraufbau, unabhängig von Ausgangsgittern
- geordnete Einlagerungsstrukturen
- keine Verbindung im chemischen Sinne (Ge-setz der konstanten und multiplen Proportio-nen gilt nicht)
- vorherrschender Bindungstyp: Metallbindung, aber Atom- und Ionenbindungsanteile „zugemischt“

Eigenschaft: hart und sehr spröde

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)

↓

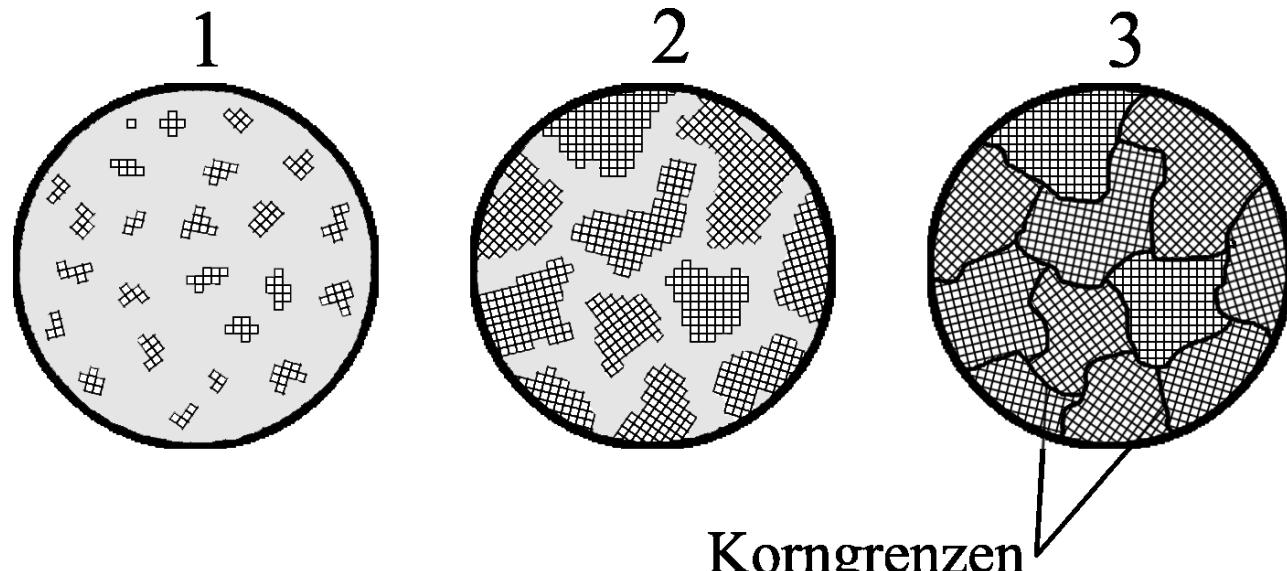
Keimwachstum → Kristallisation

↓

Kristallitbildung (Kornbildung mit
Korngrenzen)

↓

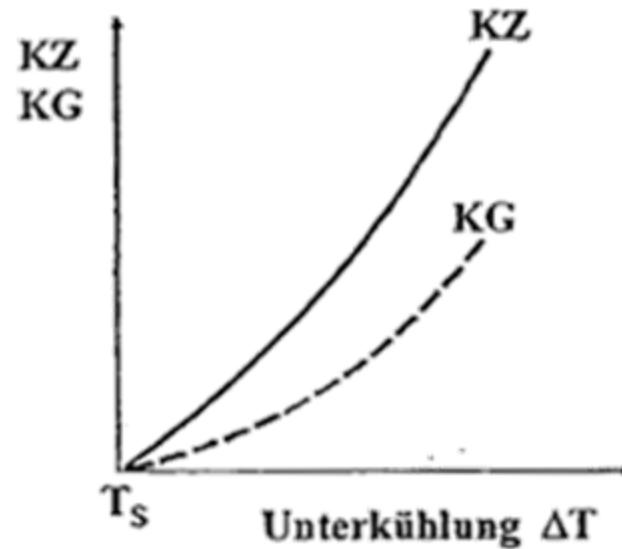
Σ aller Körner und Korngrenzen =>
Gefüge



Keimbildung

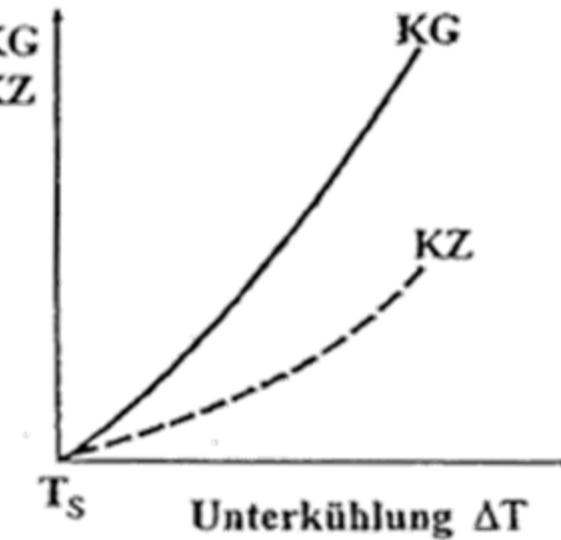
- Erstarren findet nicht gleichmäßig statt -> Bildung von Keimen
- homogen (arteigenen) oder heterogen (artfremden)
- Wachstum der Keime (Kristallwachstum) bis gesamte Schmelze erstarrt ist
- Es bestehen Zusammenhänge zwischen der Keimzahl (KZ) und der Kristallisationsgeschwindigkeit (KG) einer-seits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

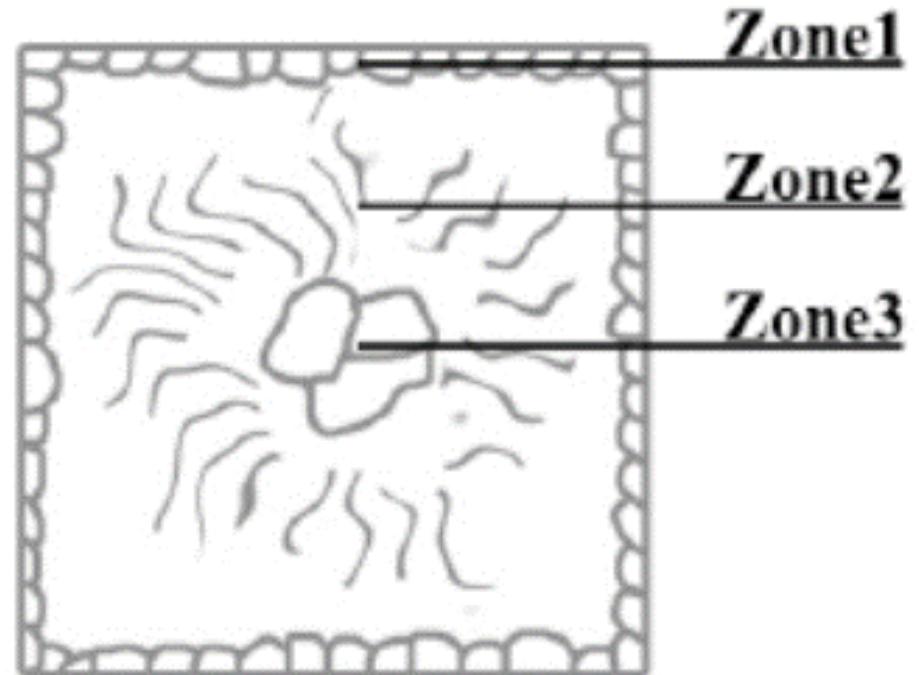
- Übergangsflächen zwischen Körnern

Gießen oder Stranggießen

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

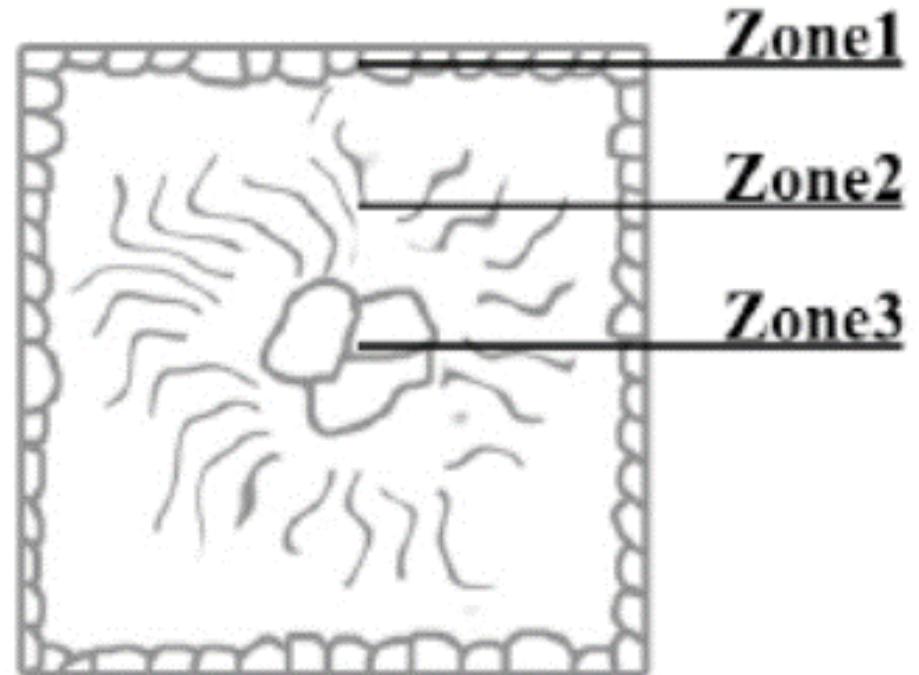
1. Feinkörnige globulare Randzone

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



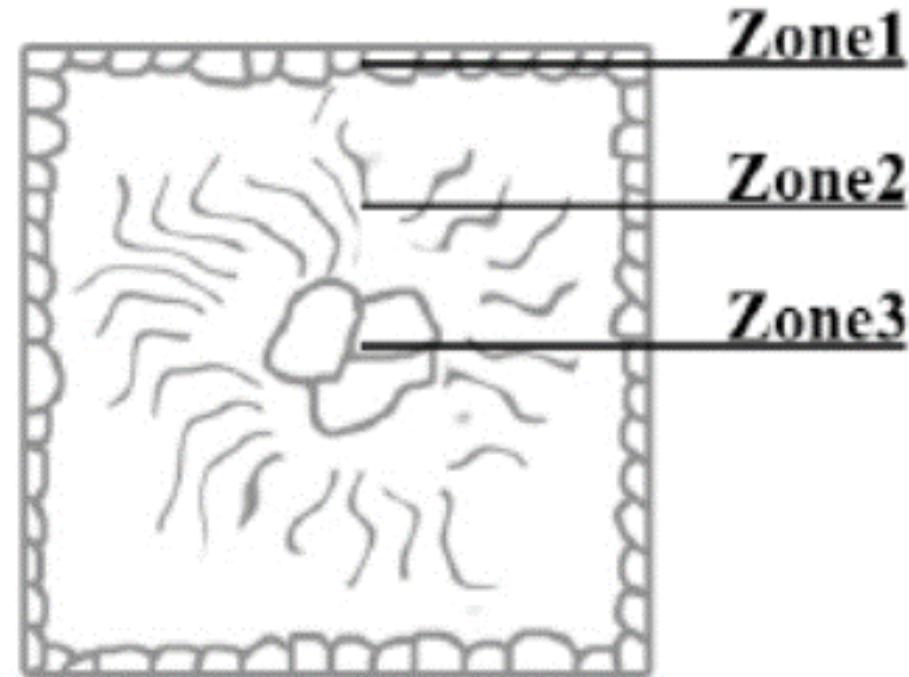
2. Transkristallisationszone mit stängelförmigen, sehr groben Kristalliten

- 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

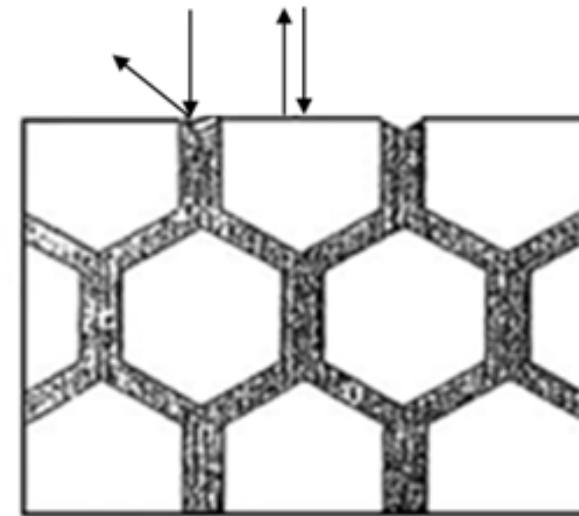
- sorgfältig präparierte Schlifffläche kann mittels eines Licht- oder Elektronenrastermikroskops betrachtet werden.
- Das Elektronenrastermikroskop weist neben der wesentlich stärkeren Auflösung auch eine höhere Schärfentiefe auf.

Ätzungen

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

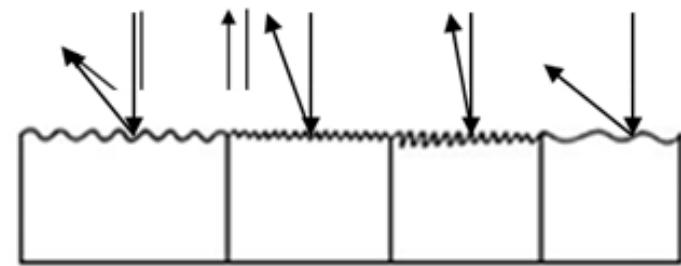
Korngrenzenätzung

- 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

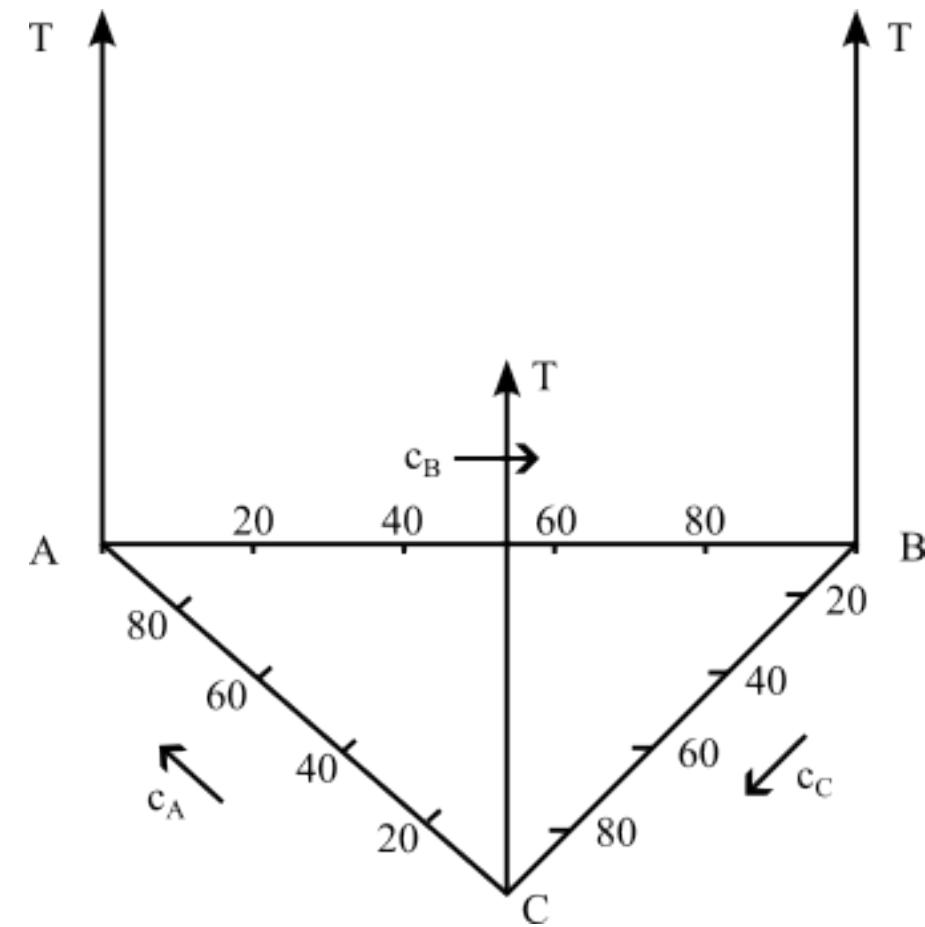
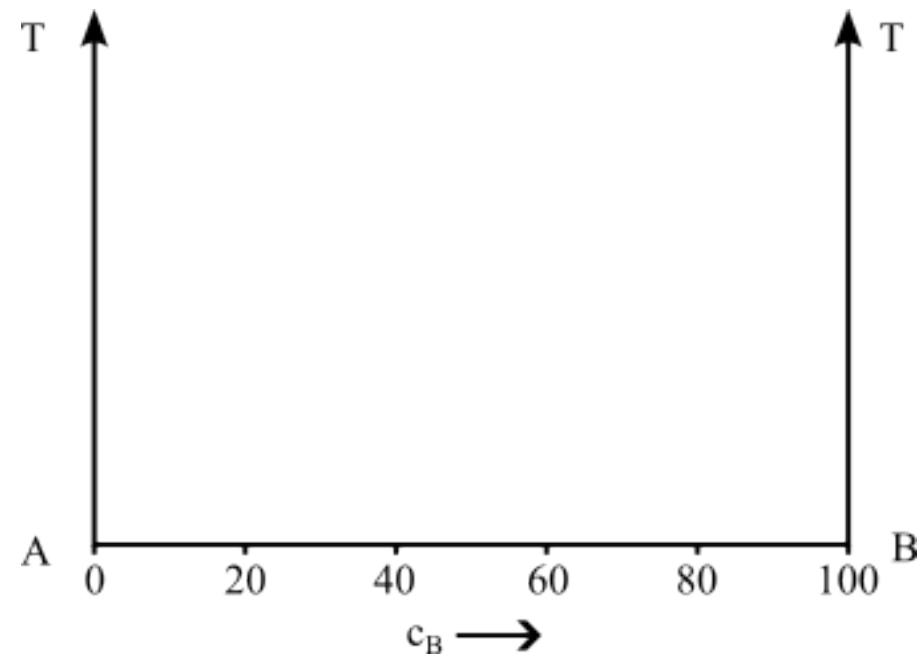
Plastographie - Polymerwerkstoffe

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.



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

Zustandsdiagramme (ZSD)

- Die Phasen bzw. Phasengrenzlinien können als ein Zustandsdiagramm dargestellt werden
- 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

Gibbsche Phasenregel

$$F = n - P + 2$$

(für Gase und Flüssigkeiten)

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

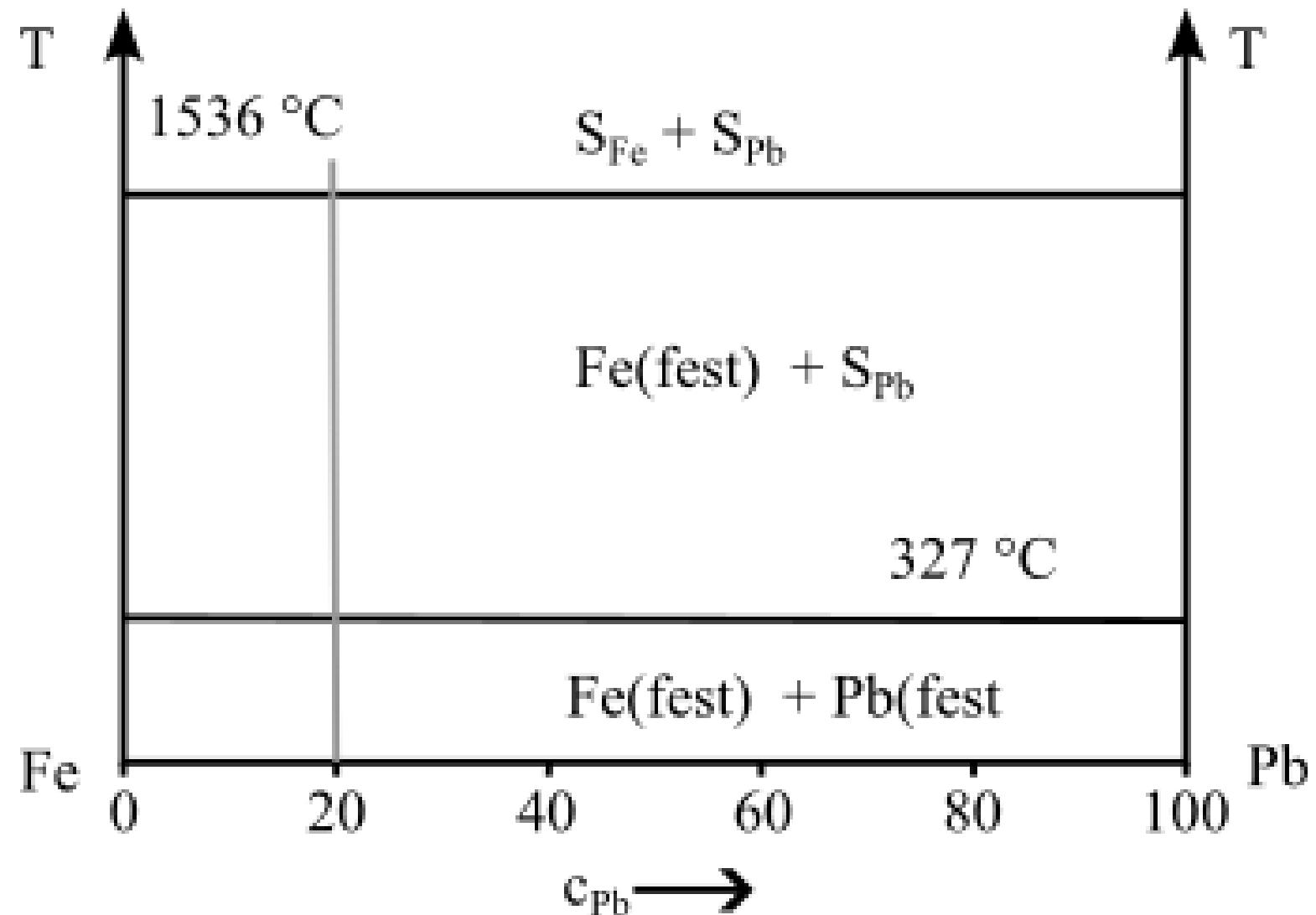
bei konstantem Druck (feste Stoffe)

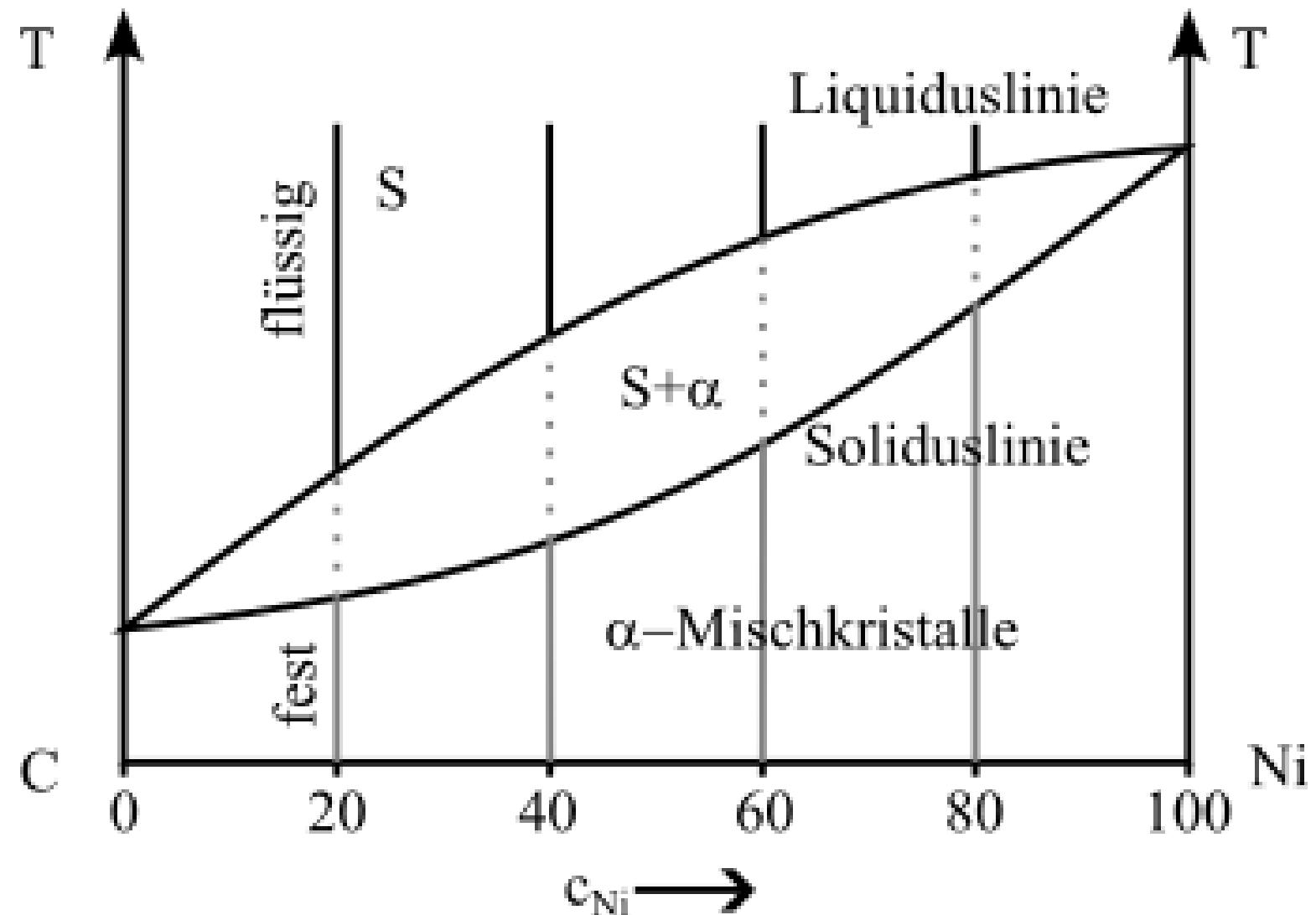
$$F = n - P + 1$$

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

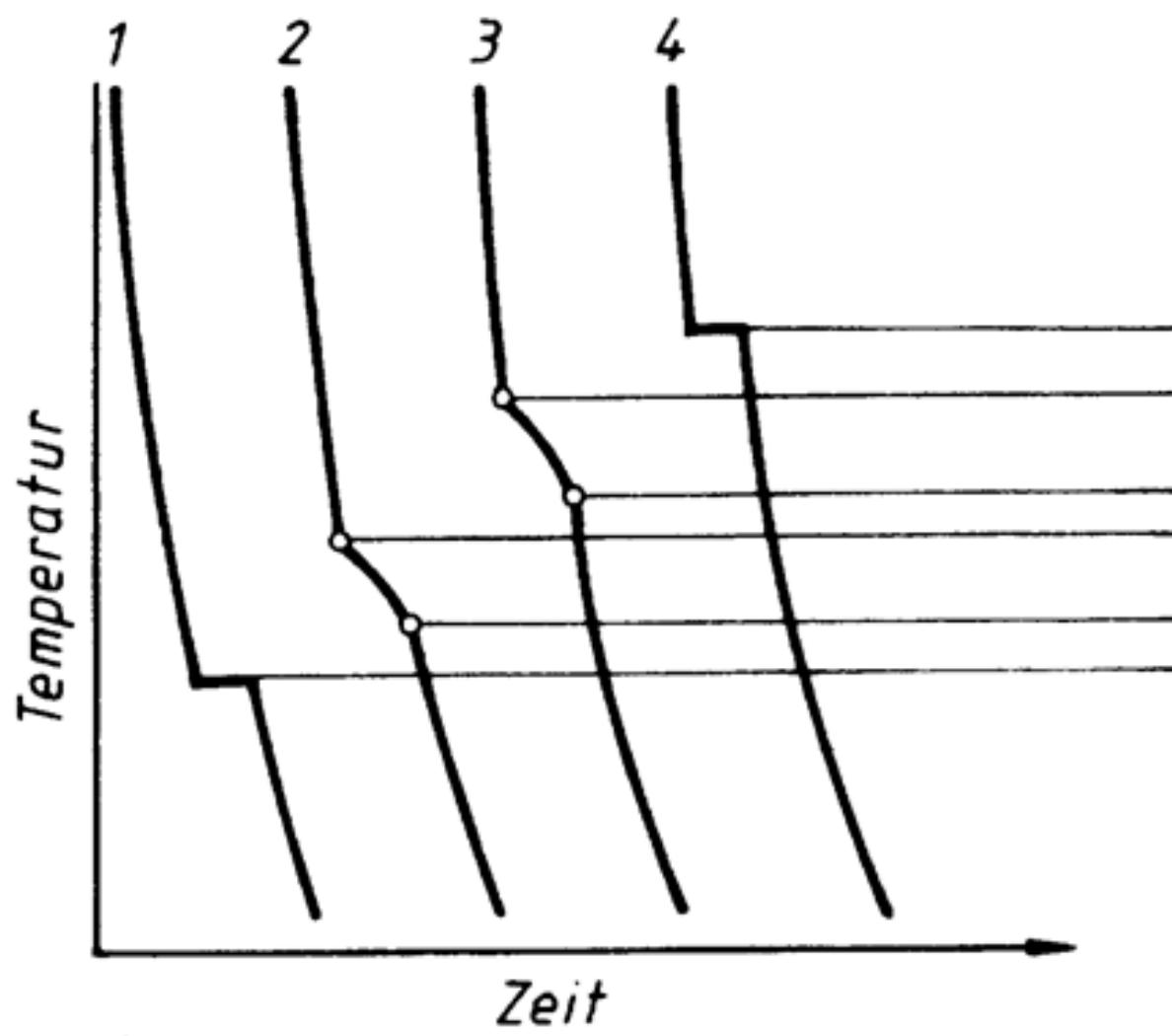
F = 0 ein Haltepunkt und

F = 1 ein Knickpunkt.

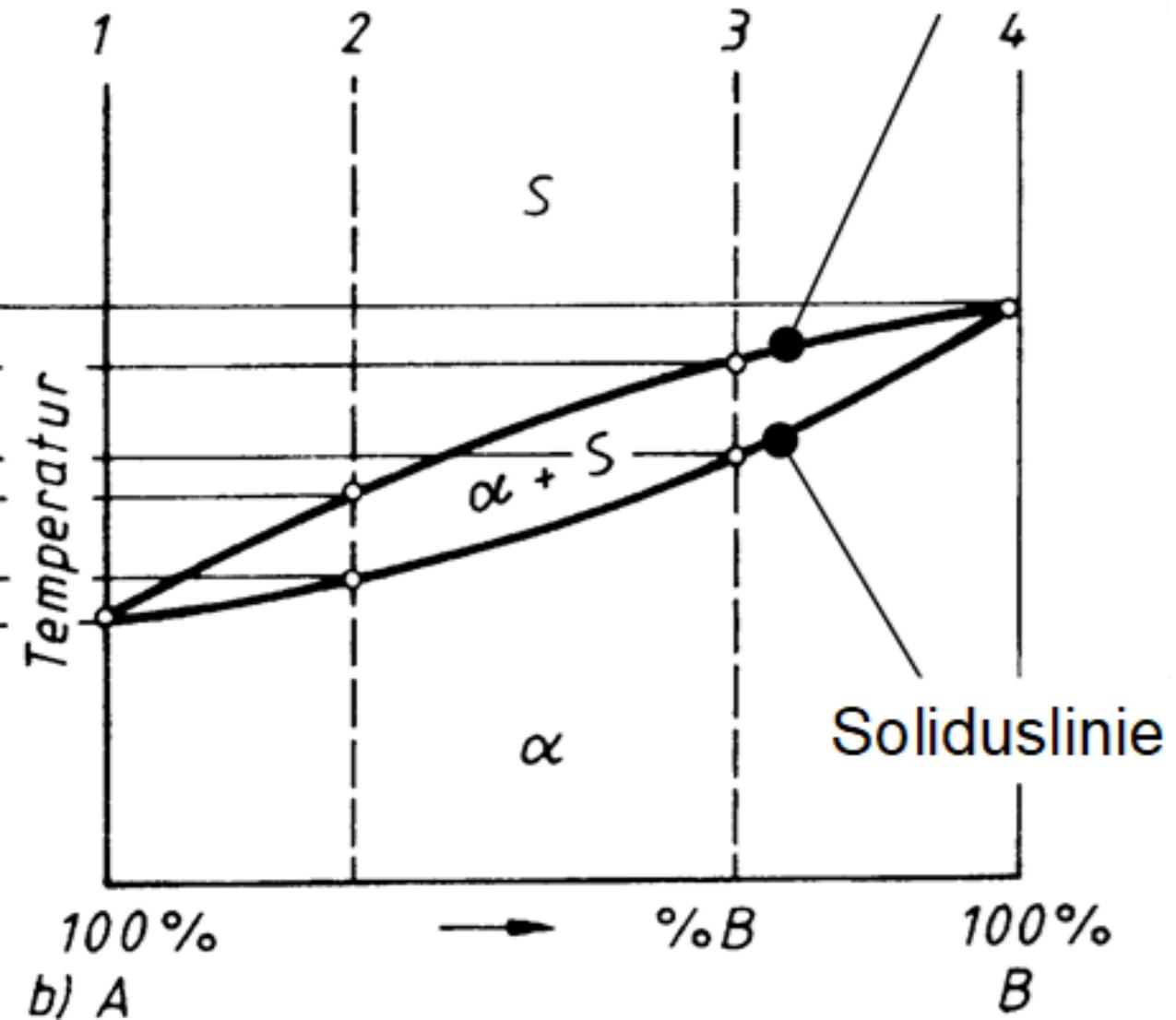




Liquiduslinie

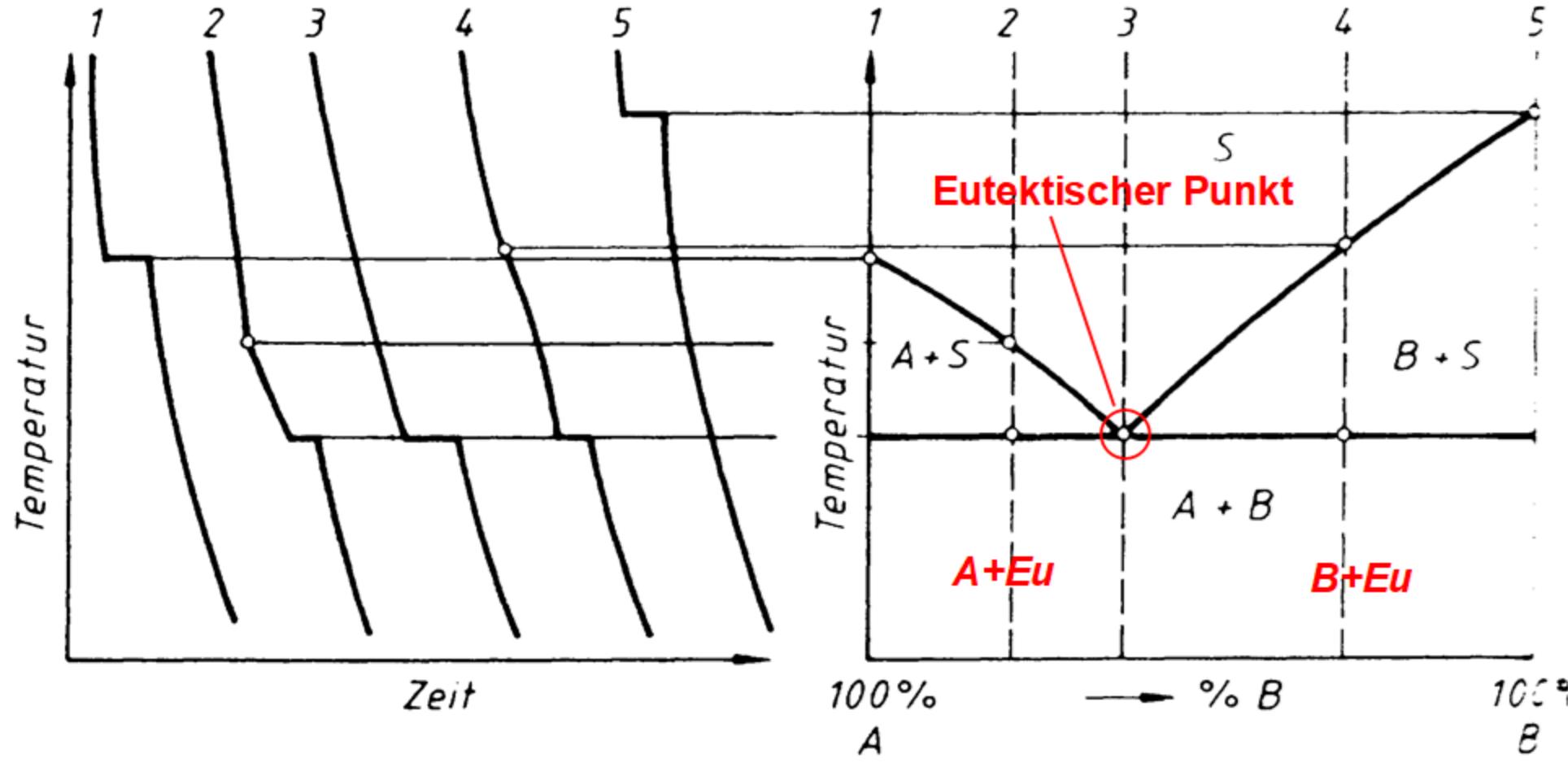


a)



Eutektischer Entmischung

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

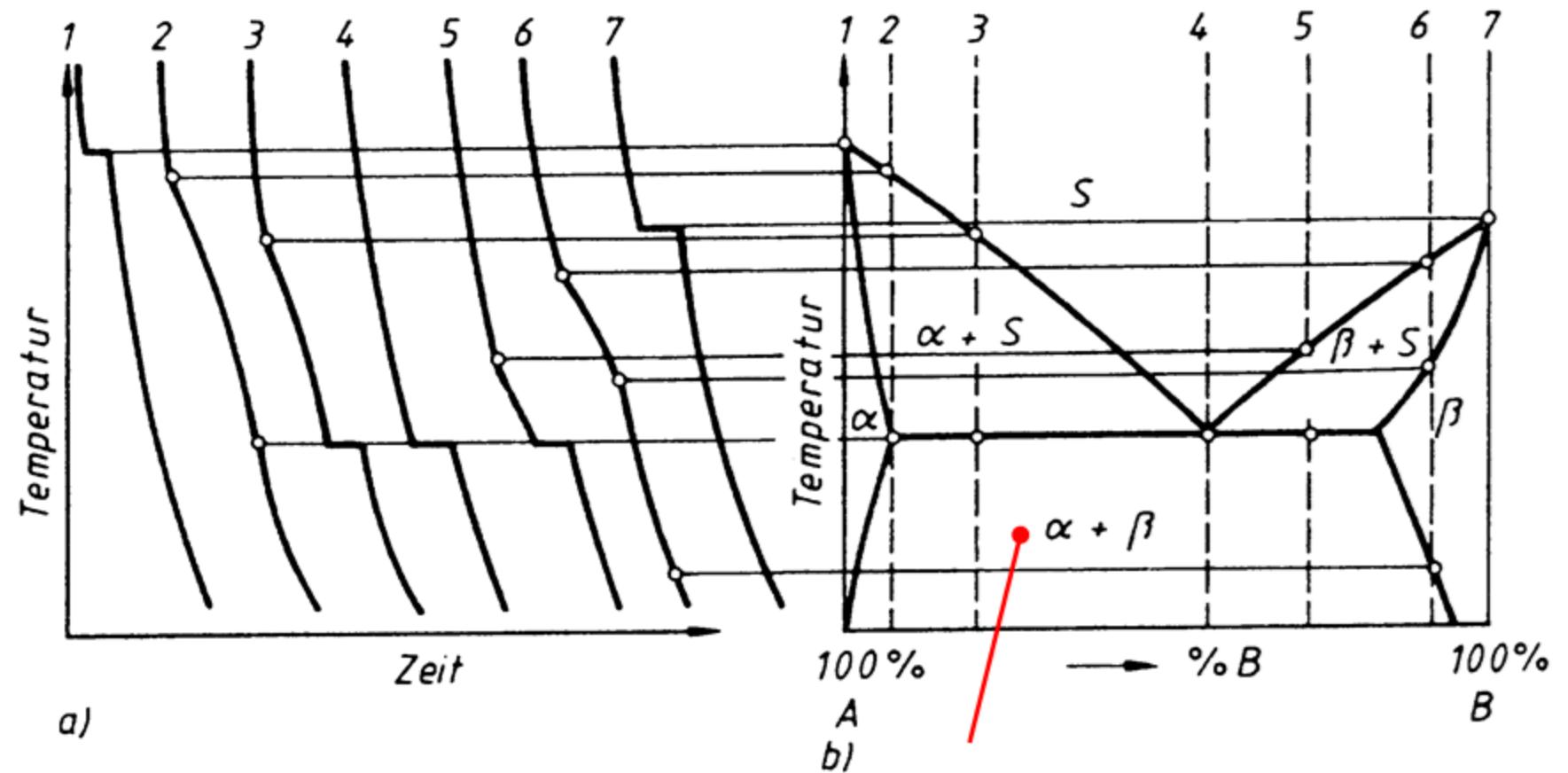


Eutektische Reaktion

- 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



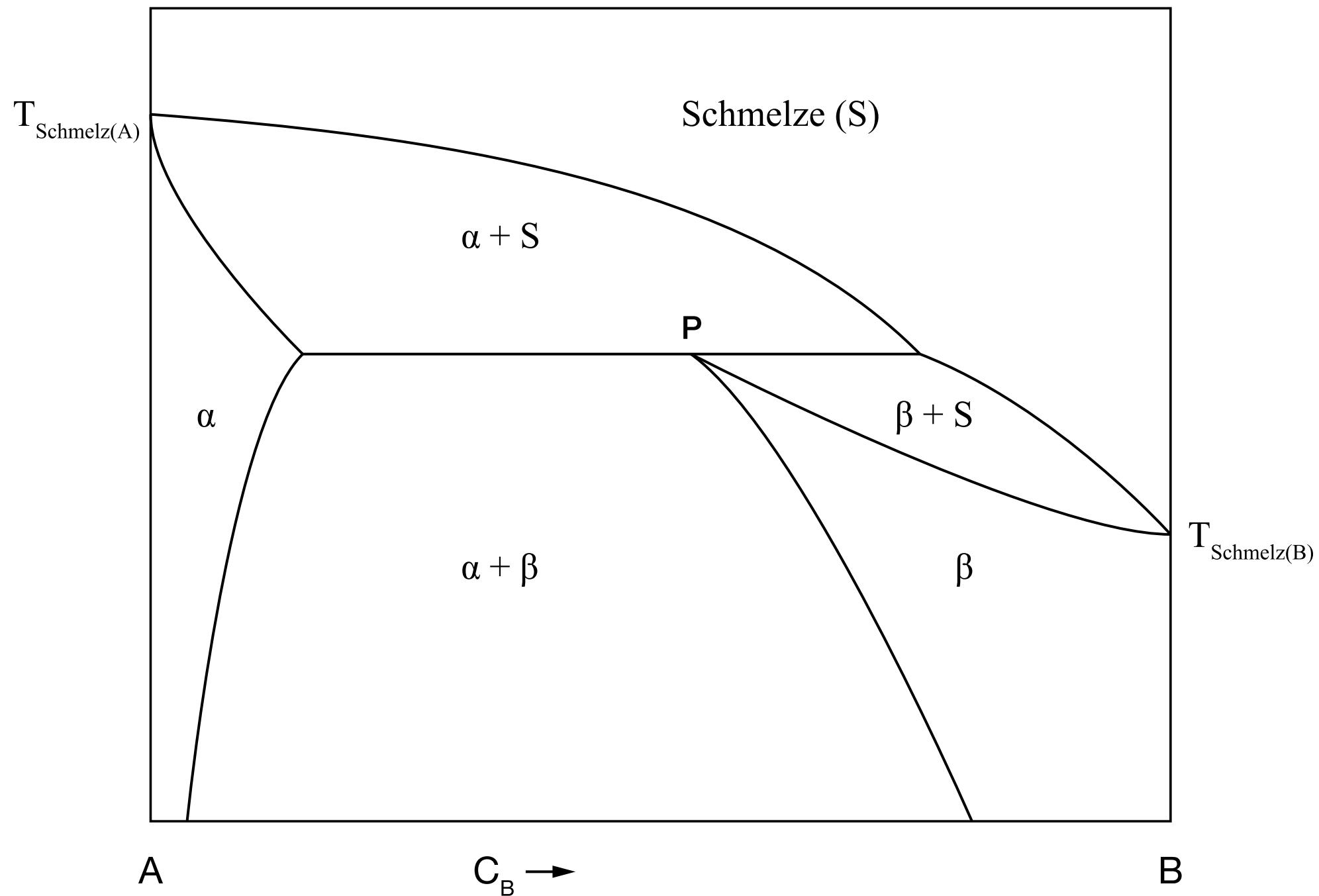
Kristallgemisch aus Mischkristallen

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.

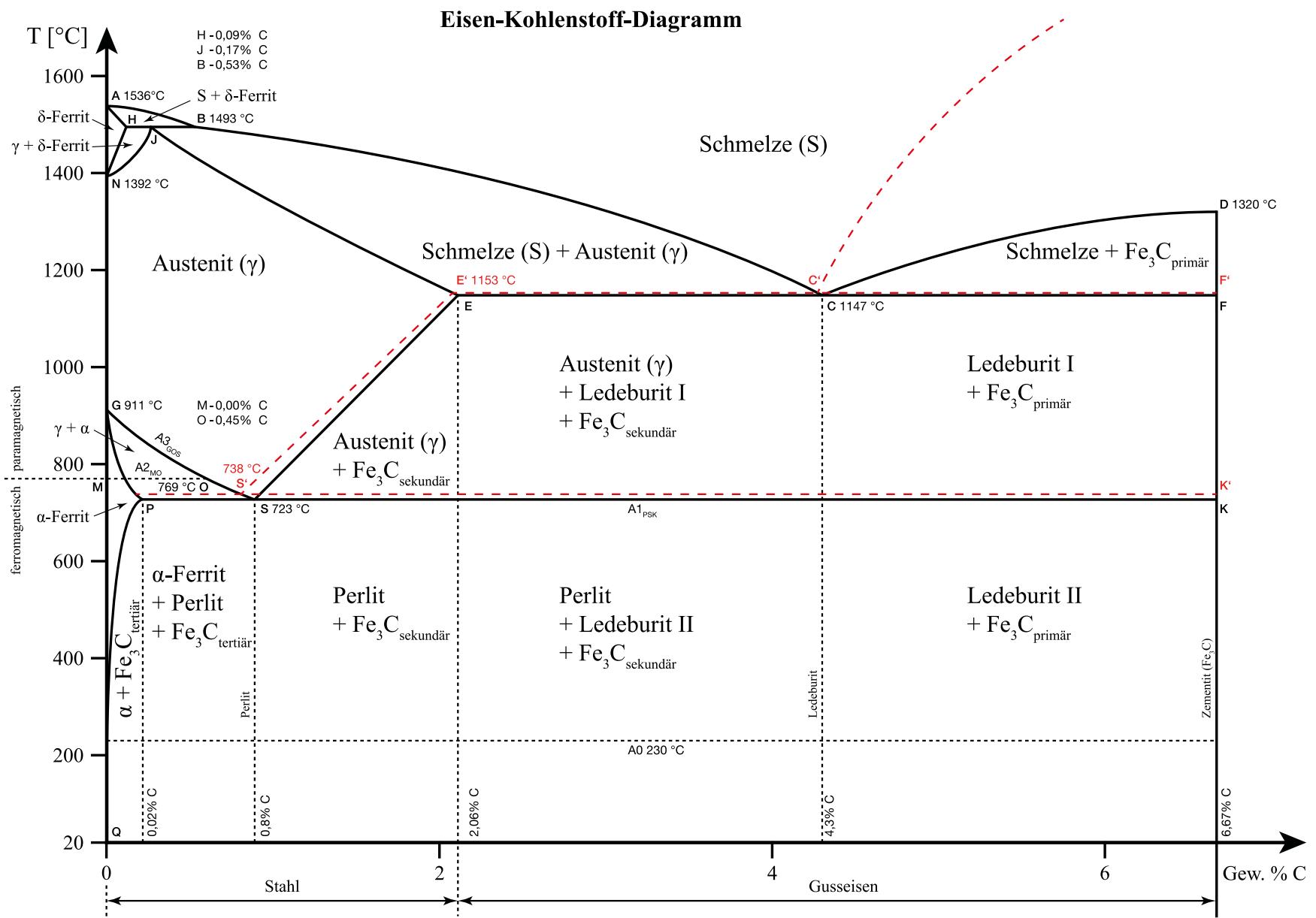
Eisen-Kohlenstoffdiagramm (EKD)

- wichtigstes ZSD
- Eisen ist der wichtigste Werkstoff im Maschinenbau.

Gründe sind

- geringe Kosten
- hohe Festigkeit und elastische Steifigkeit
- Vielzahl von möglichen Legierungen
- Verfügbarkeit
- Gießbarkeit, Schweißbarkeit, etc.

[Erklärvideo für das Eisen Kohlenstoff Diagramm](#)



Wichtige Gleichgewichtslinien

ABCD Liquiduslinie

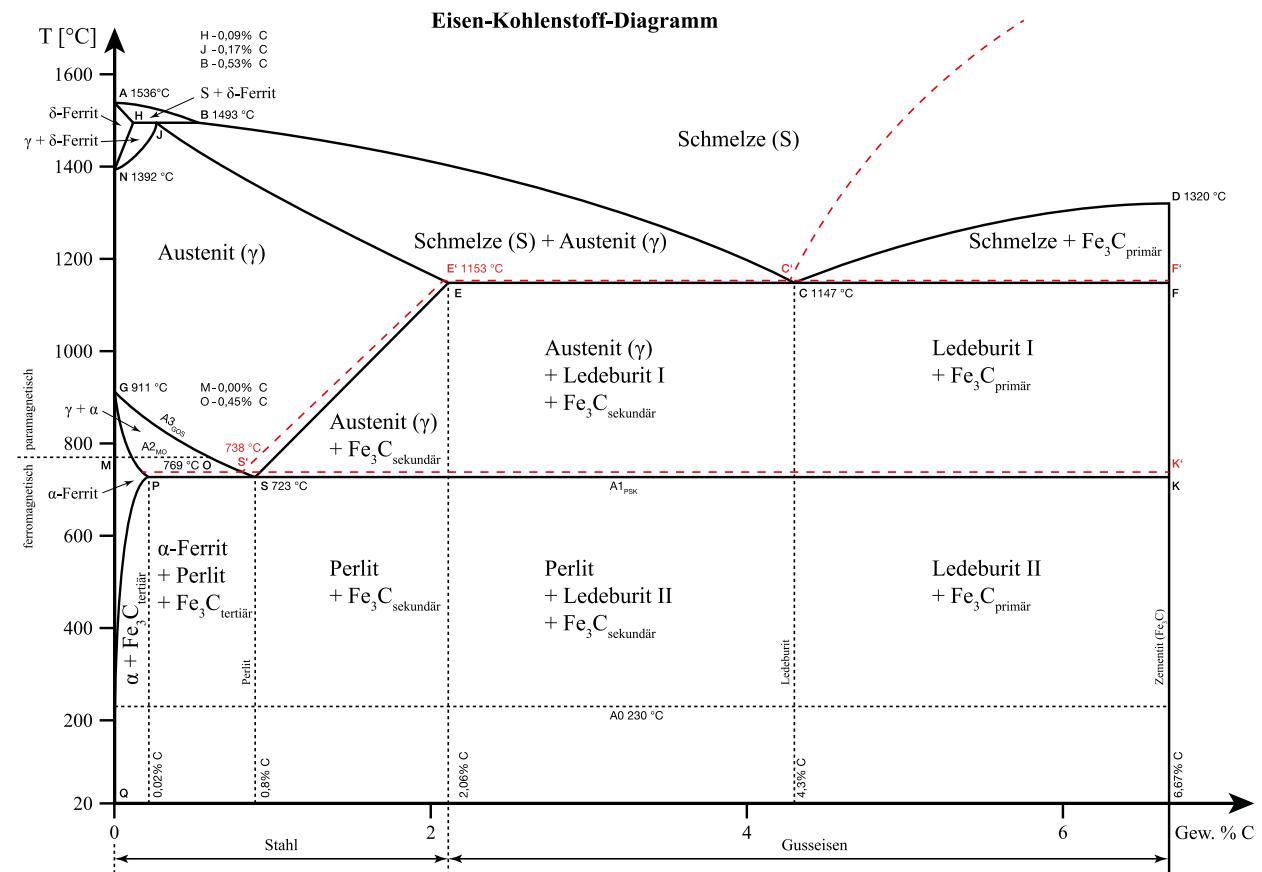
AHIECF Soliduslinie

ECF Eutektikale

PSK Eutektoid

ES, PQ Sättigungslien MOSK Curie-Linie

QPSECD Bildung/Auflösung Fe₃C



Punkte im Zustandsdiagramm

S - eutektoider Punkt

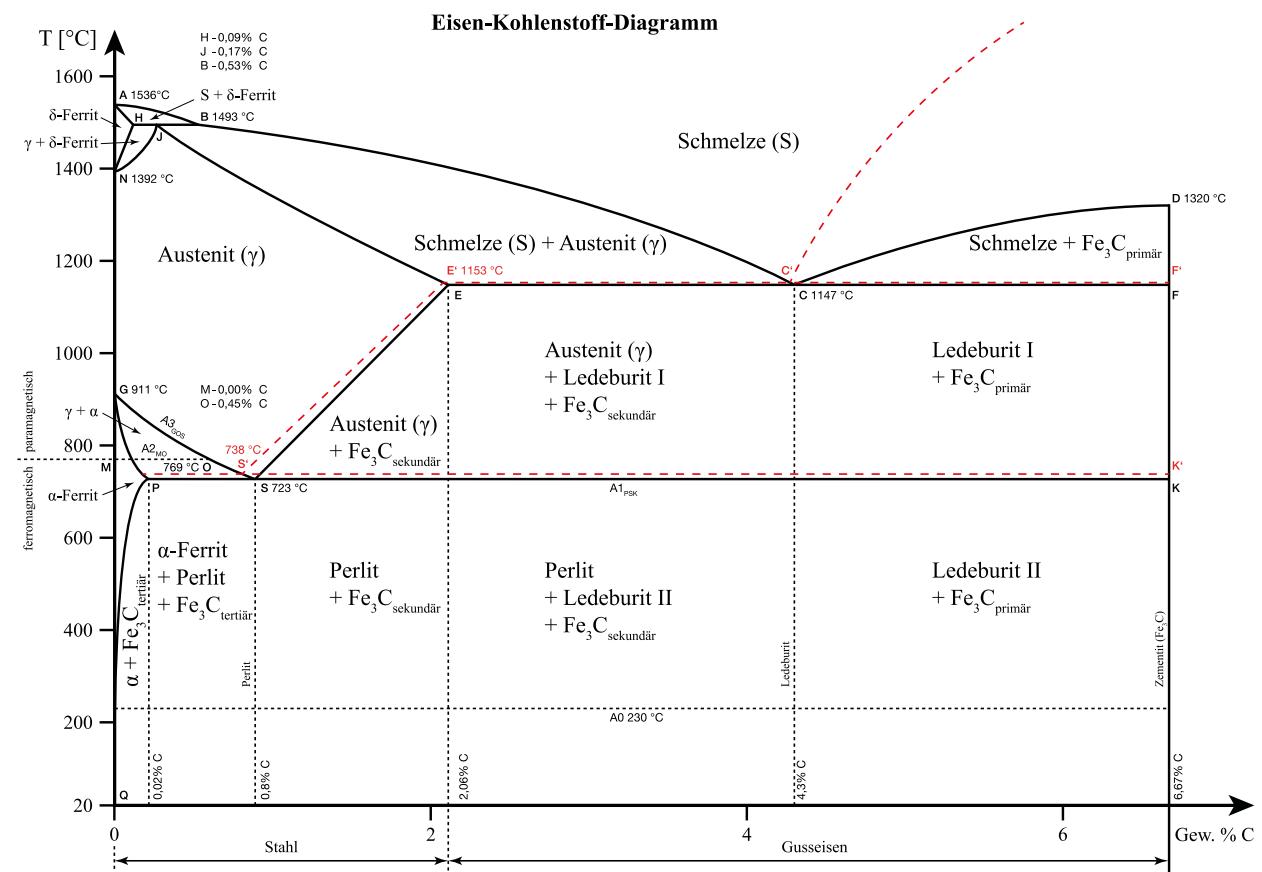
C - eutektischer Punkt

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

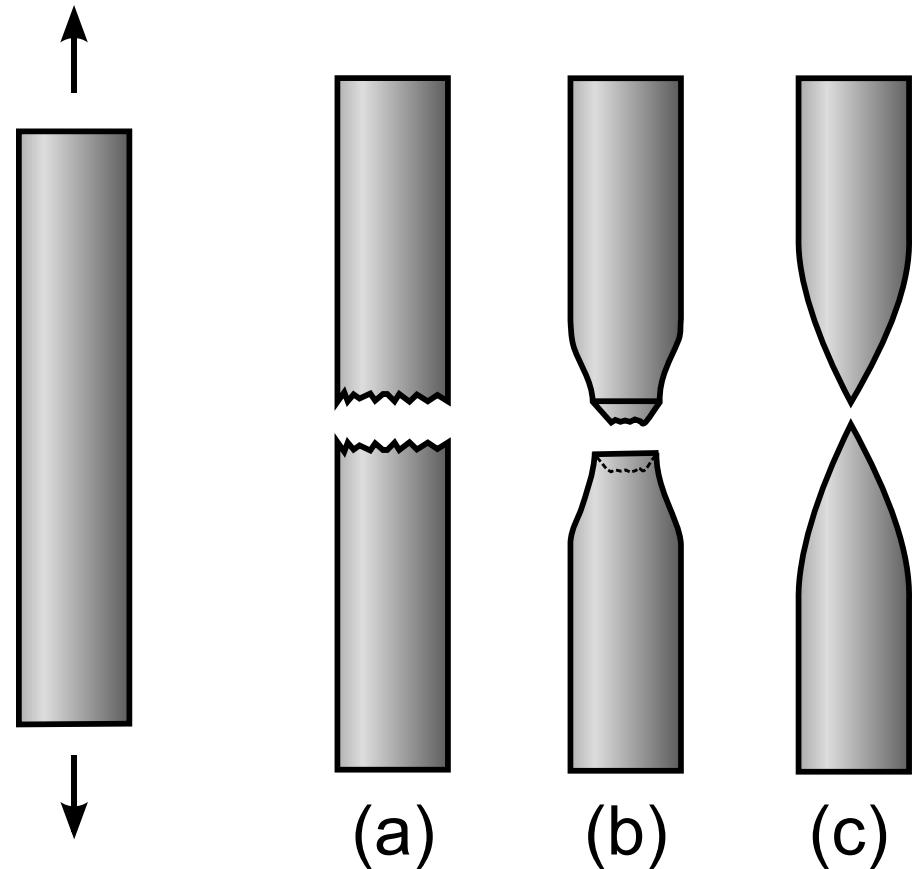
Ac3: abhängig vom C-Gehalt

Grenzlinie im Fe-C-Diagramm	...begrenzt das Umwandlungs-geschehen	Bezeichnung der Grenzlinien-temperaturen, ermittelt		
		im Gleichgewicht	beim Abkühlen	beim Erwärmen
PSK	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \leftrightarrow \gamma$	A_{e1}	A_{r1}	A_{c1}
GS	$\alpha + \gamma \leftrightarrow \gamma$	A_{e3}	A_{r3}	A_{c3}
SE	$\gamma + \text{Fe}_3\text{C} \leftrightarrow \gamma$	$\text{A}_{e\text{ cm}}$	$\text{A}_{r\text{ cm}}$	$\text{A}_{c\text{ cm}}$
NI	$\gamma + \delta \leftrightarrow \gamma$	A_{e4}	A_{r4}	A_{c4}

Phasen- und Gefüge im System-Eisen-Kohlenstoff Mischkristalle

α -Mischkristall (krz)

- Gefügebezeichnung Ferrit (α -Ferrit)
- rein ferritisches Gefüge besitzt geringe Härte/Festigkeit, aber hohe Duktilität (Zähigkeit)
- Max. C-Löslichkeit: nur 0,02 %



Exkurs Härte / Festigkeit

Im Detail kommt das später.

Festigkeit

- Maß der maximalen Beanspruchbarkeit bis Versagen
- Kraft pro Querschnittsfläche

Härte

- mechanischer Widerstand gegen mechanisches Eindringung eines anderen Körpers
- Maß für die Verschleißbeständigkeit

δ -Mischkristall (krz)

- δ -Ferrit ist nur oberhalb von 1392°C stabil
- technisch von untergeordneter Bedeutung
- Max. C-Löslichkeit: 0.12 %

γ -Mischkristall (kfz)

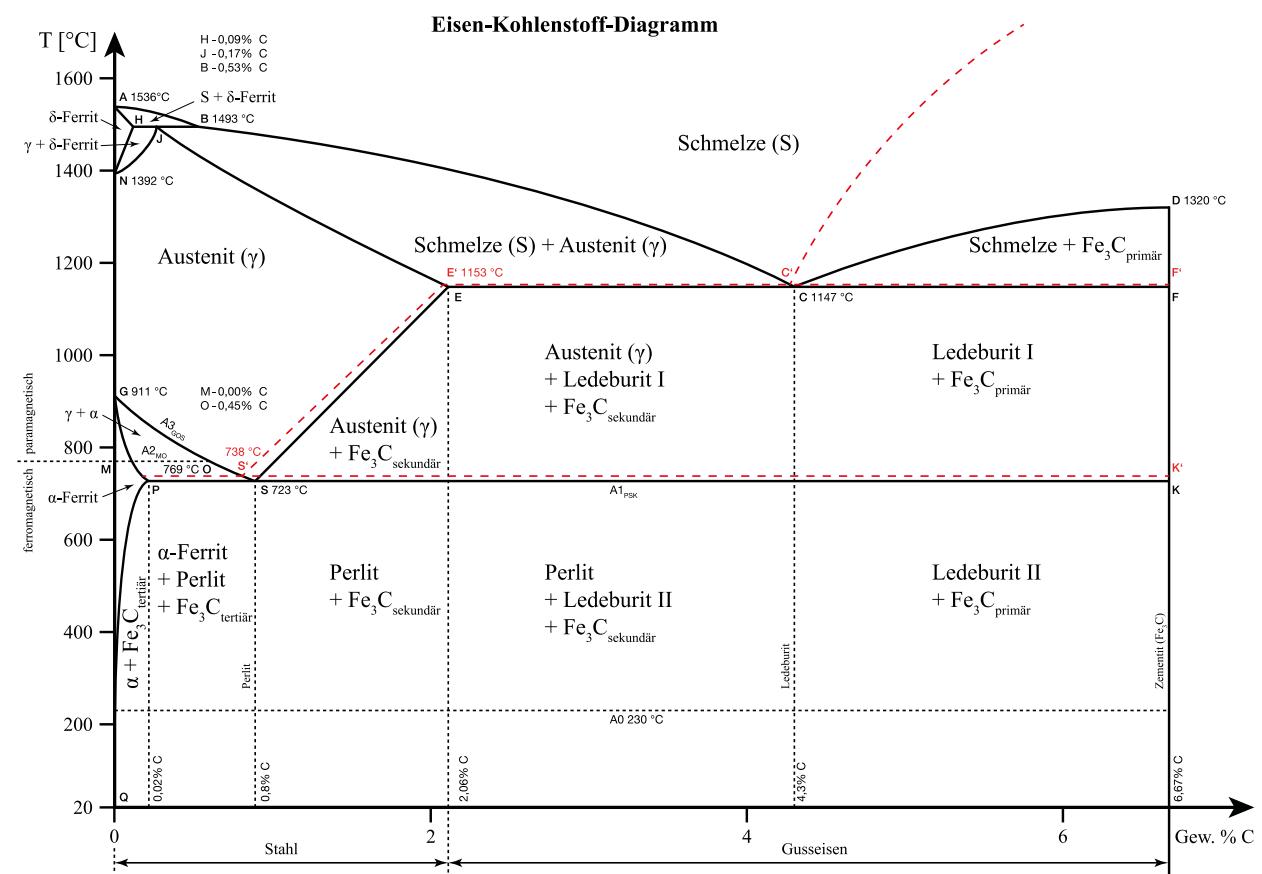
- Gefügebezeichnung Austenit
- scheidet sich oberhalb der G-S-E-Linie aus;
 - durch Legierungszusätze (Ni, Mn) und Abschrecken auch bei Raumtemperatur beständig (austenitische Stähle)
- unmagnetisch, zäh und durch Kaltverfestigung härtbar (Mangan-, Nickel-, Chrom-Nickel-Stähle)
- hohe Warmfestigkeit, gute Korrosions- und Zunderbeständigkeit
- Max. C-Löslichkeit: 2.06 %

Intermediäre Phase

Zementit (Eisencarbid Fe_3C); 6.67

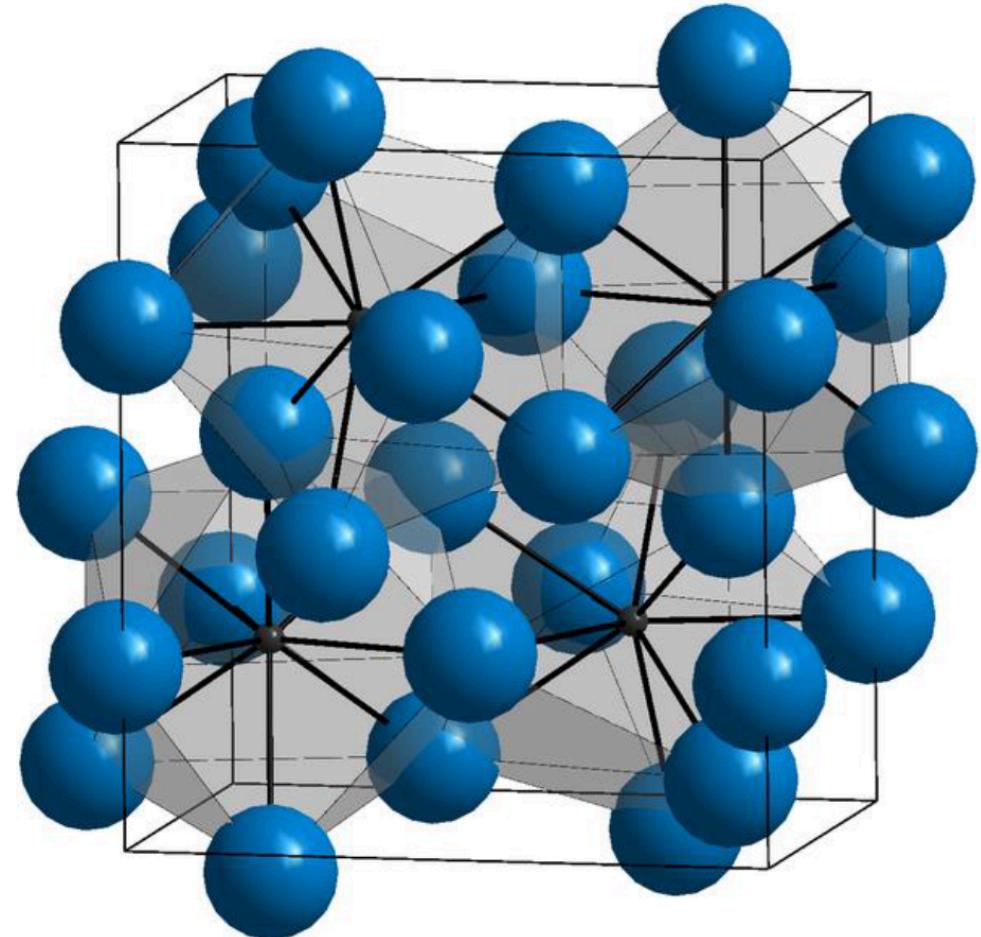
Masse-% C-Gehalt

- Primärzementit:
primäre Kristallisation aus der Schmelze (Linie CD)
- Sekundärzementit:
Ausscheidung aus dem Austenit (Linie ES)
- Tertiärzementit:
Ausscheidung aus dem Ferrit (Linie PQ)

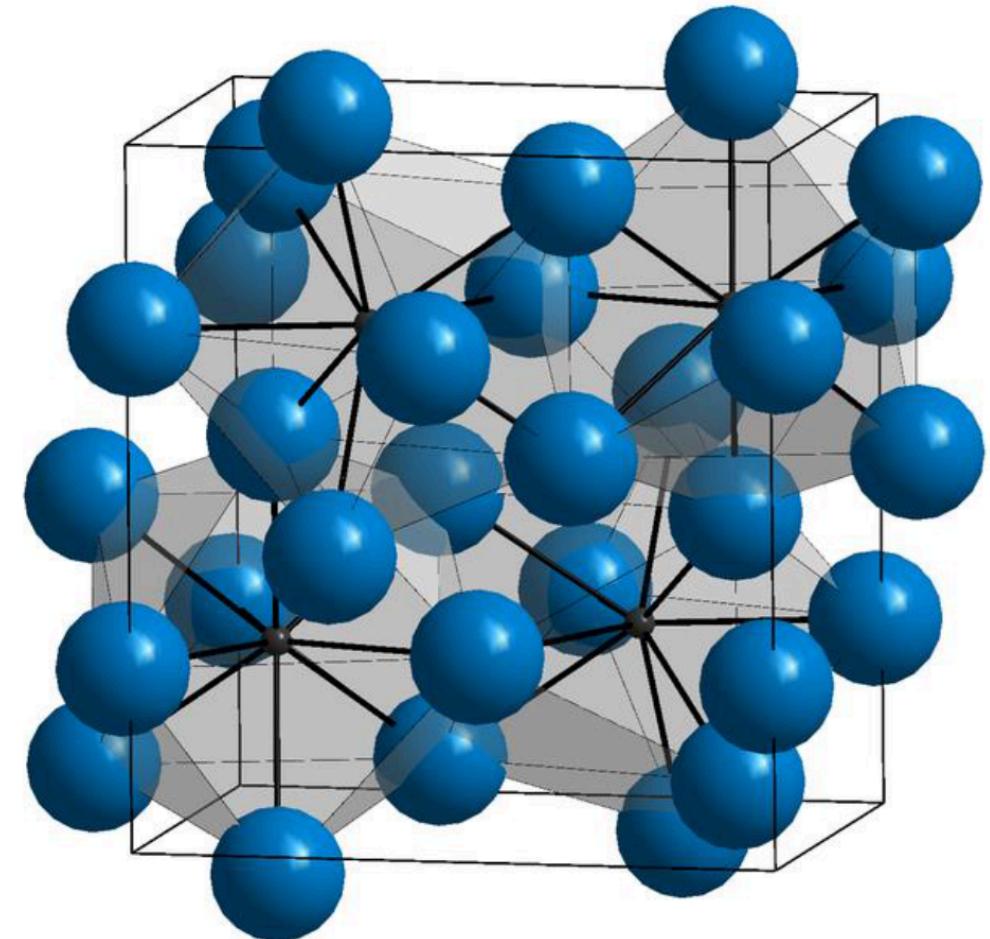


Kristallstruktur

- orthorhombischen Elementarzelle
 - zwölf Eisen- und vier Kohlenstoffatome
 - die Kohlenstoffatome sind relativ unregelmäßig (zweifach überkappt trigonal-prismatisch) von acht Eisenatomen umgeben



- Zementit ist hart und spröde
- überwiegende Zahl der technischen Eisen-Kohlenstoff-Legierungen erstarrt unter Bildung von Zementit

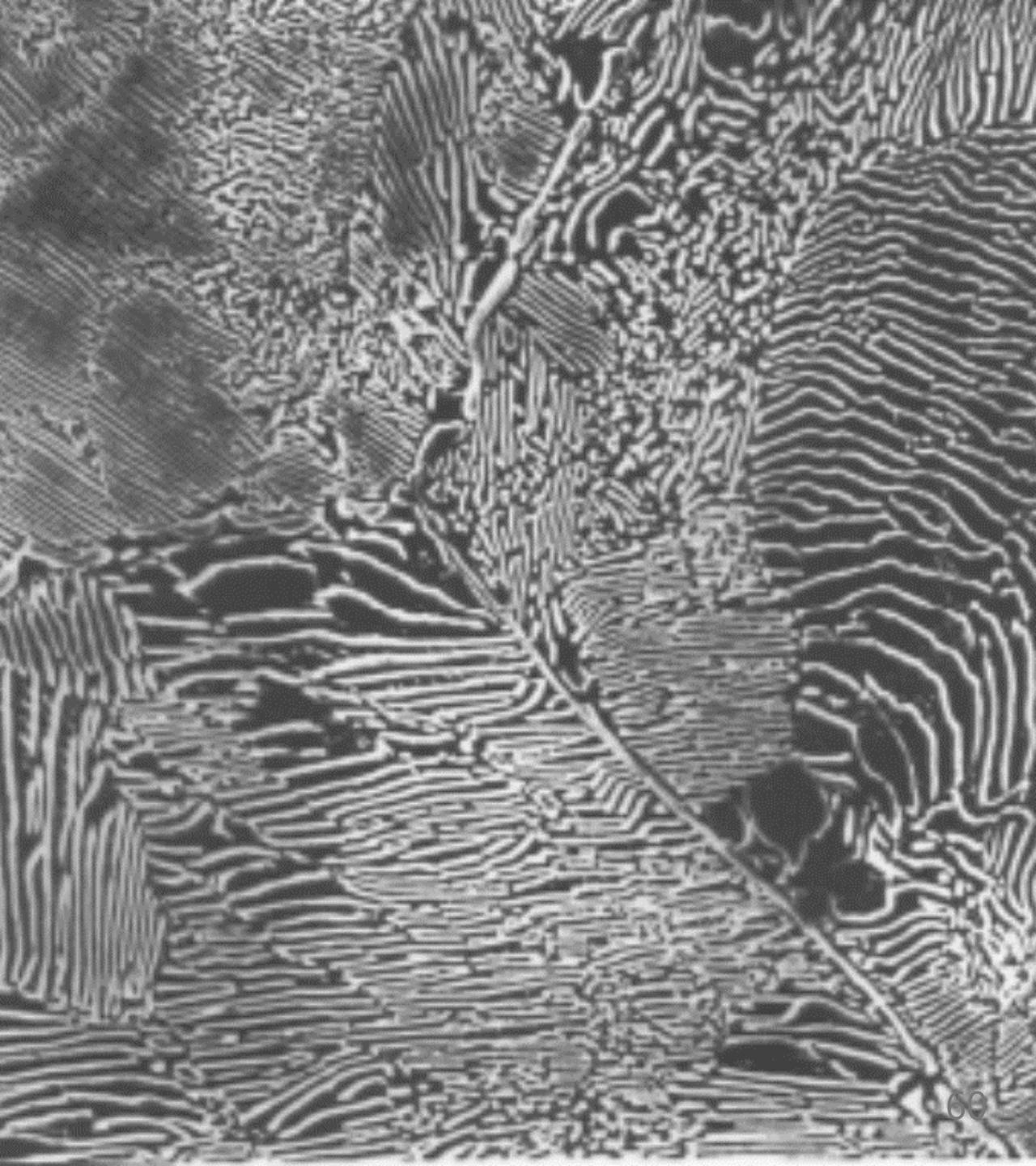


Phasengemische/Gemische von Mischkristallen

Perlit (Eutektoid)

- Gefüge aus Zementit und Ferrit (= Phasengemisch)
- entsteht durch den "eutektoiden" Zerfall des Austenits (γ -Mischkristall) mit 0.8% C bei 723°C
- eutektoider Punkt S: hier liegen 100% Perlit vor
- relativ hohe Härte, relativ hohe Festigkeit, schlechte Umformbarkeit, geringe Zähigkeit

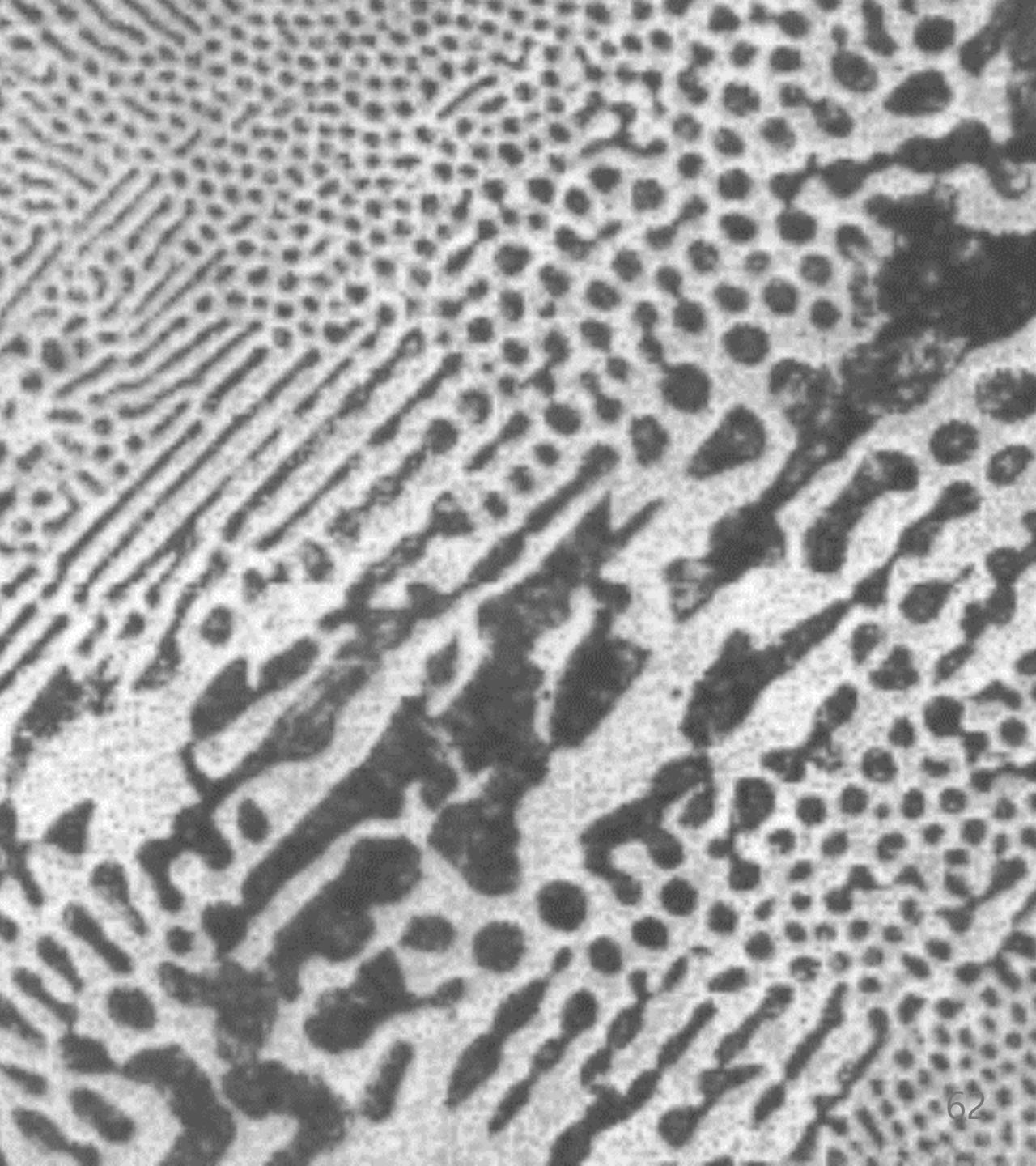
- lamellenartiger Aufbau
(Schichten von α -Mk und Fe₃C-Kristallen) .
- häufig spricht man von einer "Perlitstufe", die - gemessen am Lamellenabstand - in Perlit, feinstreifigen und feinststreifigen Perlit unterteilt wird.



Ledeburit (Eutektikum)

- Gefüge aus Austenit und Zementit bzw. „zerfallenem“ Austenit und Zementit (= Phasengemisch), Kohlenstoffgehalt 4,3 %, Schmelztemperatur 1147°C
- Eutektischer Punkt C: hier liegen 100% Ledeburit vor
- Unterscheidung zwischen Ledeburit I (dicht unterhalb 1.147 °C)
 - um ein Gefüge aus Austenit und Zementit handelt
- Ledeburit II (Raumtemperatur)
 - aus Zementit I mit ankristallisiertem 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 schnellerer Abkühlung kann anstelle des Perlit auch Bainit bzw. bei sehr schneller Abkühlung Martensit vorliegen.
- Ledeburit ist schlecht umformbar, hat sehr geringe Duktilität.
- bei Raumtemperatur feines Gemenge von Fe₃C-Kristalliten und Perlitbereichen im Auflichtmikroskop als charakteristische Pantherfellstruktur sichtbar.



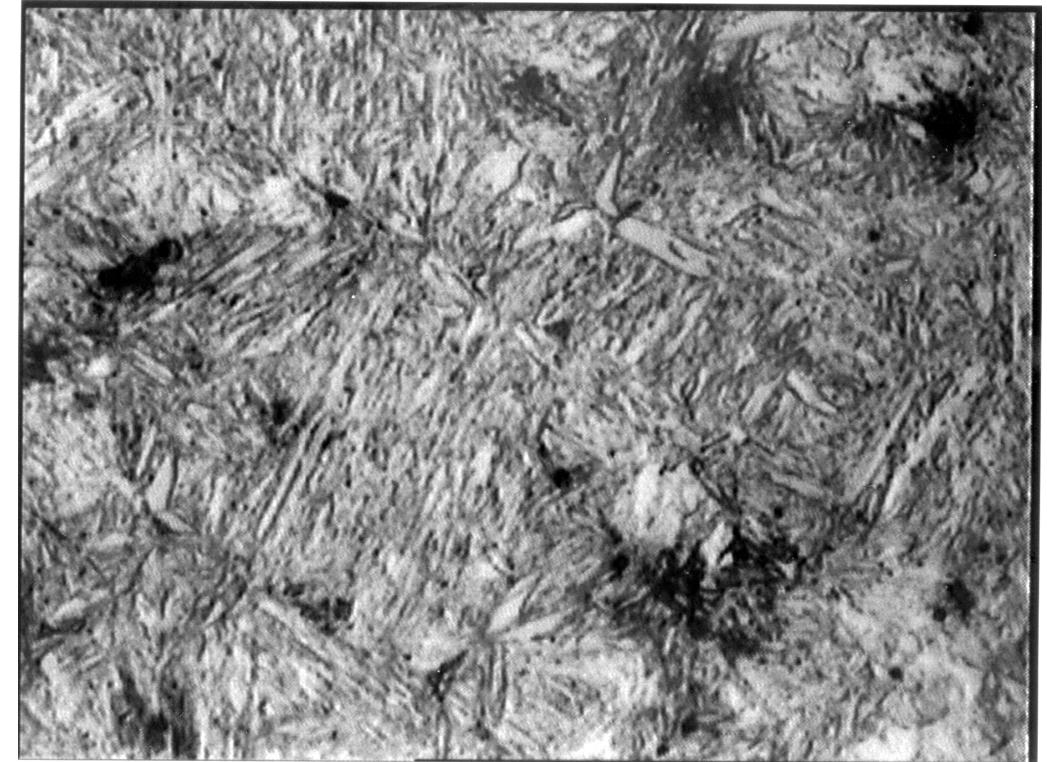
Die Eigenschaften der Legierung (z.B. Stahl, Gusseisen) wird durch die Art der beteiligten Phasen (z.B. α -Mk, Fe₃C), ihren mengenmäßigen Anteil (z. B. abhängig vom C-Gehalt) und die Art ihrer Verteilung im Gefüge bestimmt.

Phasen- und Gefüge im Ungleichgewichtszustand

- Gleichgewichtszustände durch Diffusionsvorgänge dominiert
- bei schnelleren Temperaturänderungen wird die Kohlenstoffdiffusion, die zur Entmischung des Austenits erforderlich ist, behindert
- Dadurch entstehen auch neuartige Gefügebestandteile, die nicht mehr dem Gleichgewichtszustand entsprechen
- führt zu "zwangsgelöstem" Kohlenstoff

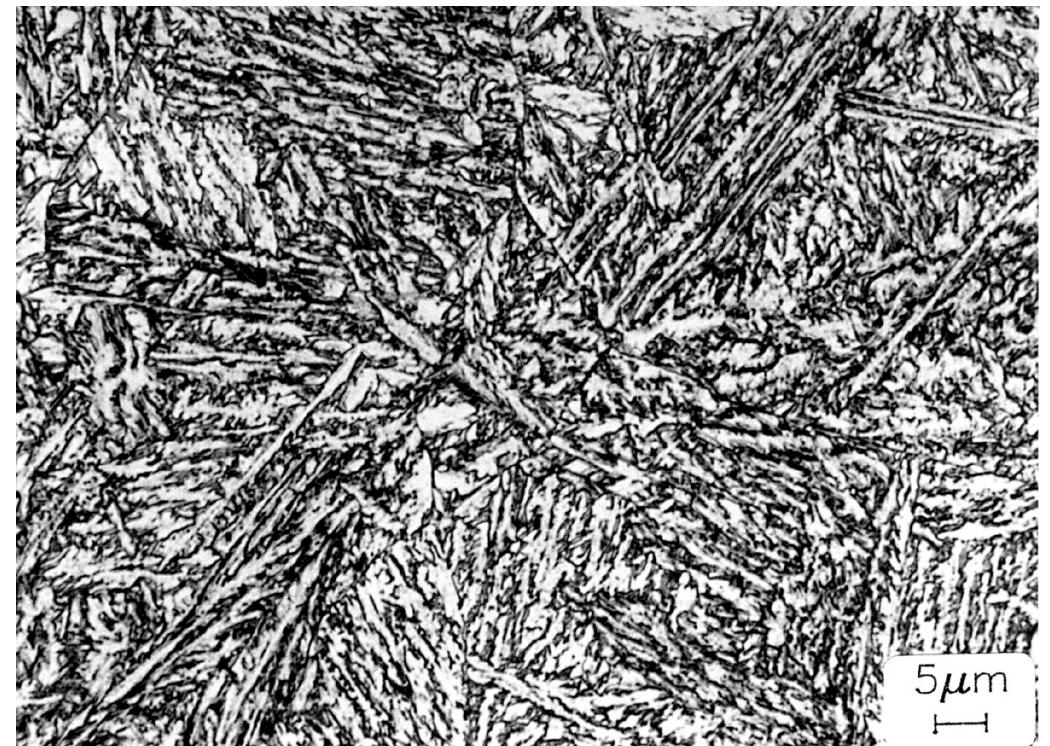
Martensit

- raumzentriertes Gitter tetragonal verzerrt („verspanntes Ferritgitter“)
- meist feinnadeliges, sehr hartes und sprödes Gefüge
- der im krz-Gitter des α -Fe zwangsgelöste Kohlenstoff verzerrt das Gitter und weitet es tetragonal auf („diffusionsloses Umklappen“).



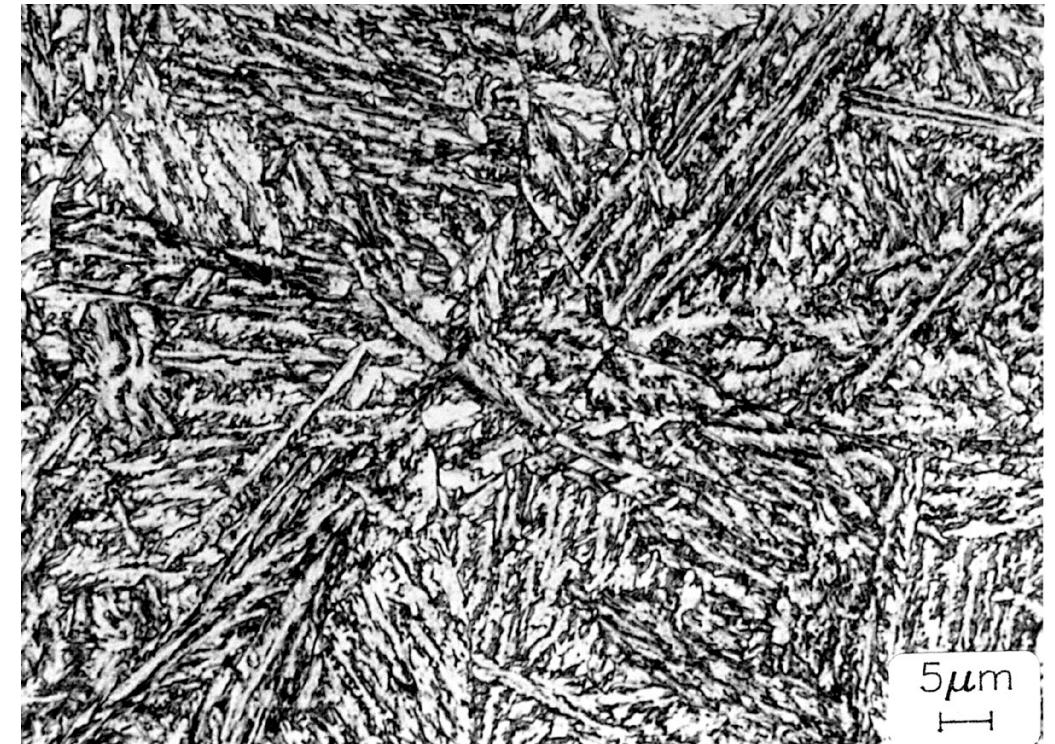
Bainit

- anders als bei der Bildung von Martensit sind hier Umklappvorgänge im Kristallgitter und Diffusionsvorgänge gekoppelt
- bildet sich im Temperaturbereich zwischen der Perlit- und der Martensitstufe bei Abkühlungsgeschwindigkeiten (für Martensitbildung zu niedrig; für die Perlitzbildung zu hoch)



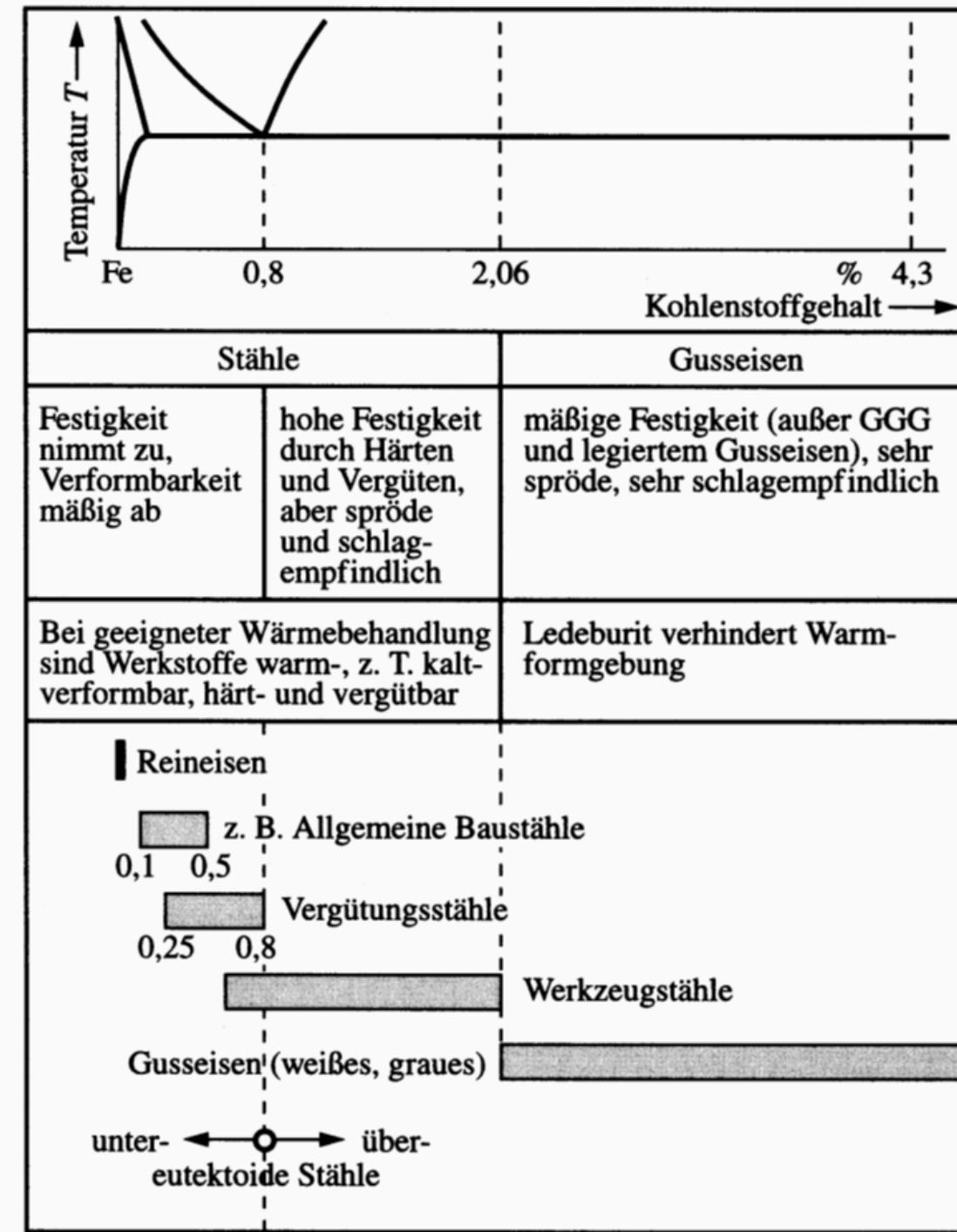
Bainit

- reiner Bainit lässt sich nur durch isotherme Abkühlung, z.B. beim Warmbadhärten, erzielen.
- Vorteilhaft, wo bei einer Vergütung durch Abschrecken und Anlassen eine Härterissgefahr besteht.
- Es hat sehr gute Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften.



Eisen-Kohlenstoff-Legierungsbezeichnungen

Kohlenstoffgehalt (Masse-%)	Bezeichnung	Typ
$0.02 < C < 0.8$	(Kohlenstoff-) Stahl	untereutektische Stähle
$C = 0.8$	(Kohlenstoff-) Stahl	eutektische Stähle
$0.8 < C < 2.06$	(Kohlenstoff-) Stahl	übereutektische Stähle
$2.06 < C < 4.3$	Gusseisen	untereutektische Gusseisen
$C = 4.3$	Gusseisen	eutektische Gusseisen
$4.3 < C < 6.67$	Gusseisen	übereutektische Gusseisen



- Weiterhin wird unterschieden zwischen dem schwarzen Gusseisen (Grauguss), in dem der überschüssige Kohlenstoff in Form von Graphit, und dem weißen Gusseisen, in dem der Kohlenstoff in Form von Zementit vorkommt
- Mit zunehmendem C-Gehalt steigen die Festigkeit und Härtbarkeit des Stahles, wogegen seine Dehnung, Schmiedbarkeit, Schweißbarkeit und Bearbeitbarkeit (durch spanabhebende Werkzeuge) verringert werden
- Der Korrosionswiderstand gegenüber Wasser, Säuren und heißen Gasen wird durch den Kohlenstoff praktisch nicht beeinflusst.
- Für Kohlenstoffgehalte unter 0.25 Masse-% sind Stähle gut schweißbar

Referenzen

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

[Grundlagen der Metallkunde](#)