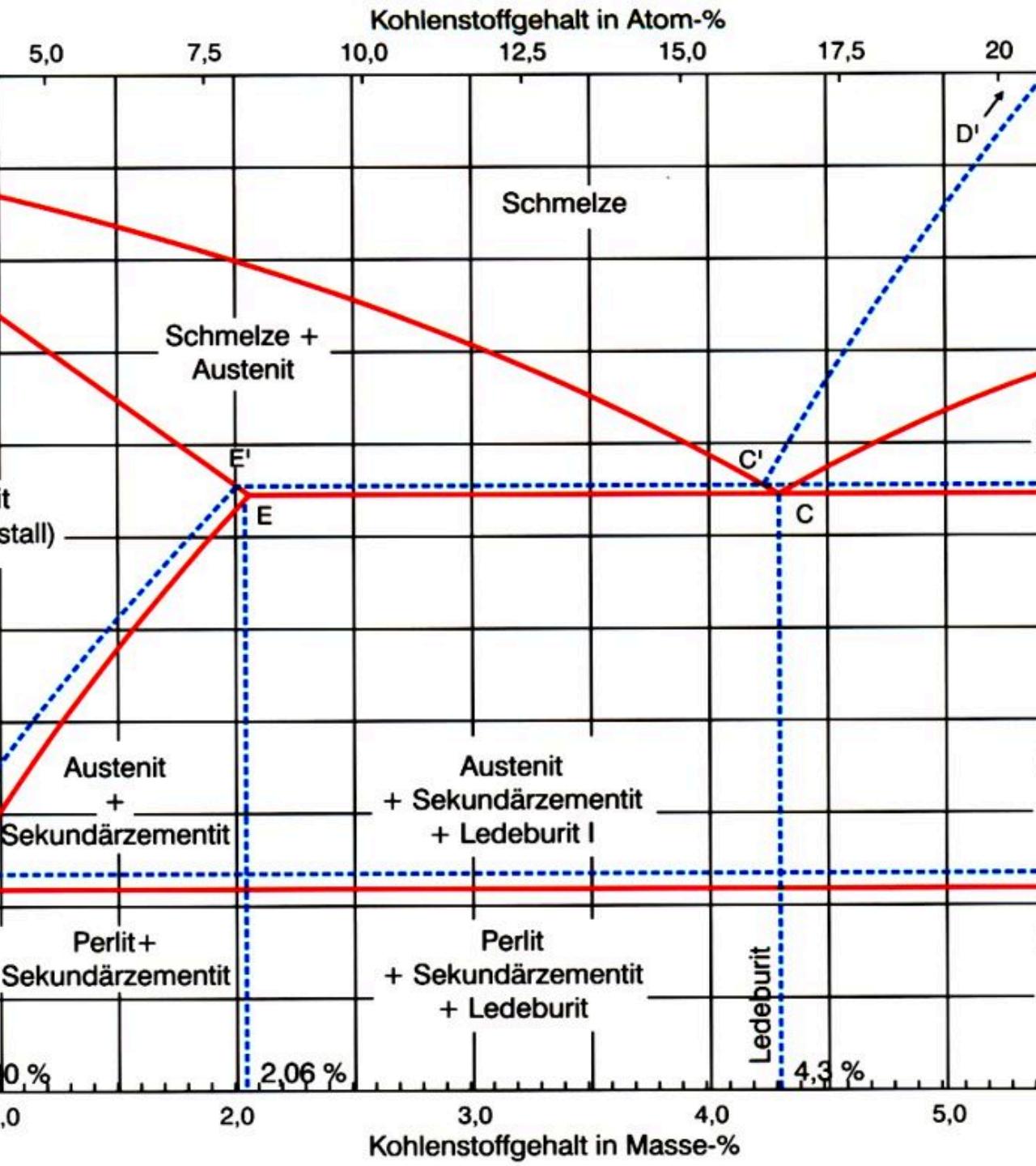


Vorlesung Werkstofftechnik - Phasen- und Gefüge im System-Eisen-Kohlenstoff

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{id}

Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de



Realdiagramme

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.

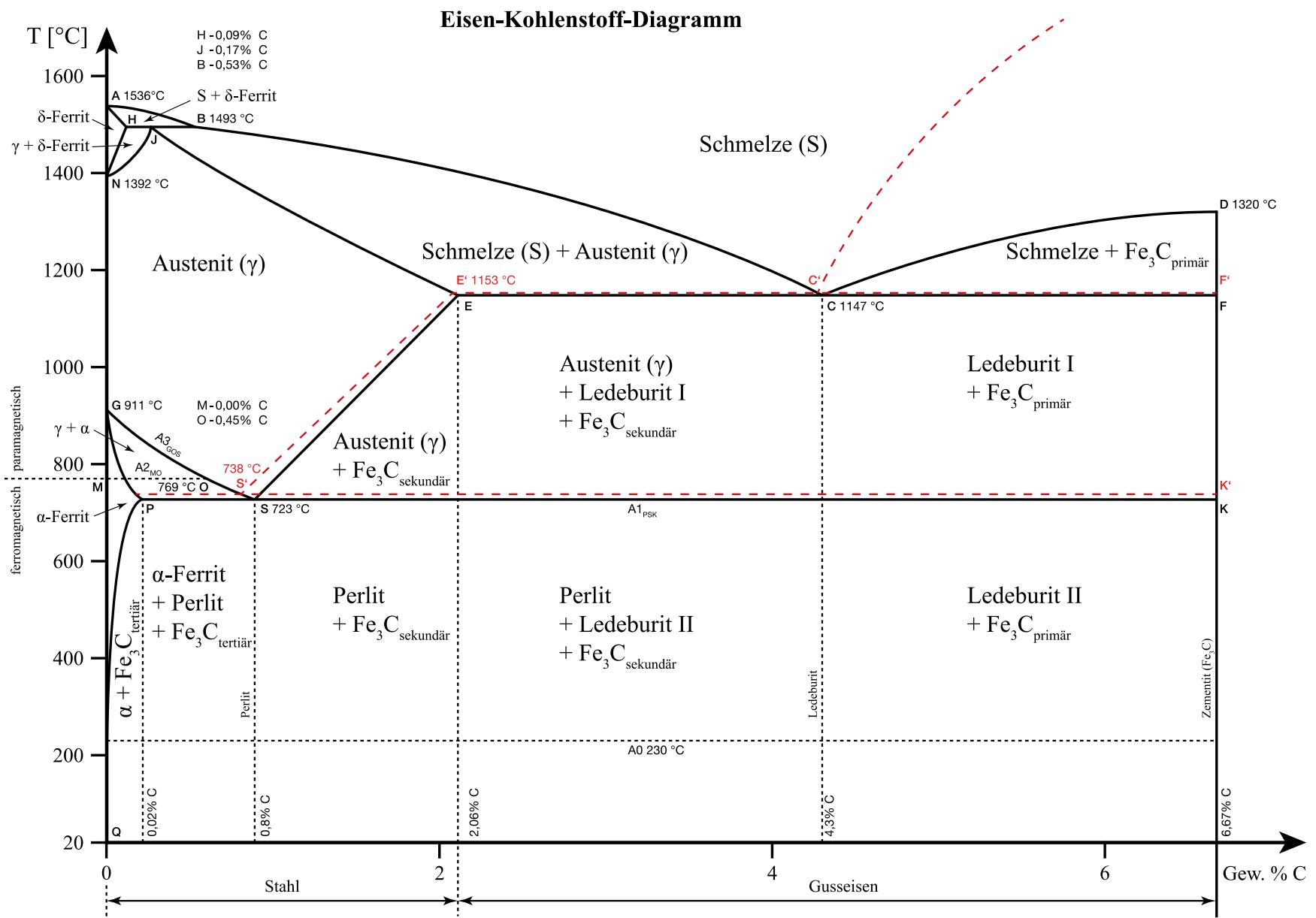
Eisen-Kohlenstoffdiagramm (EKD)

- 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

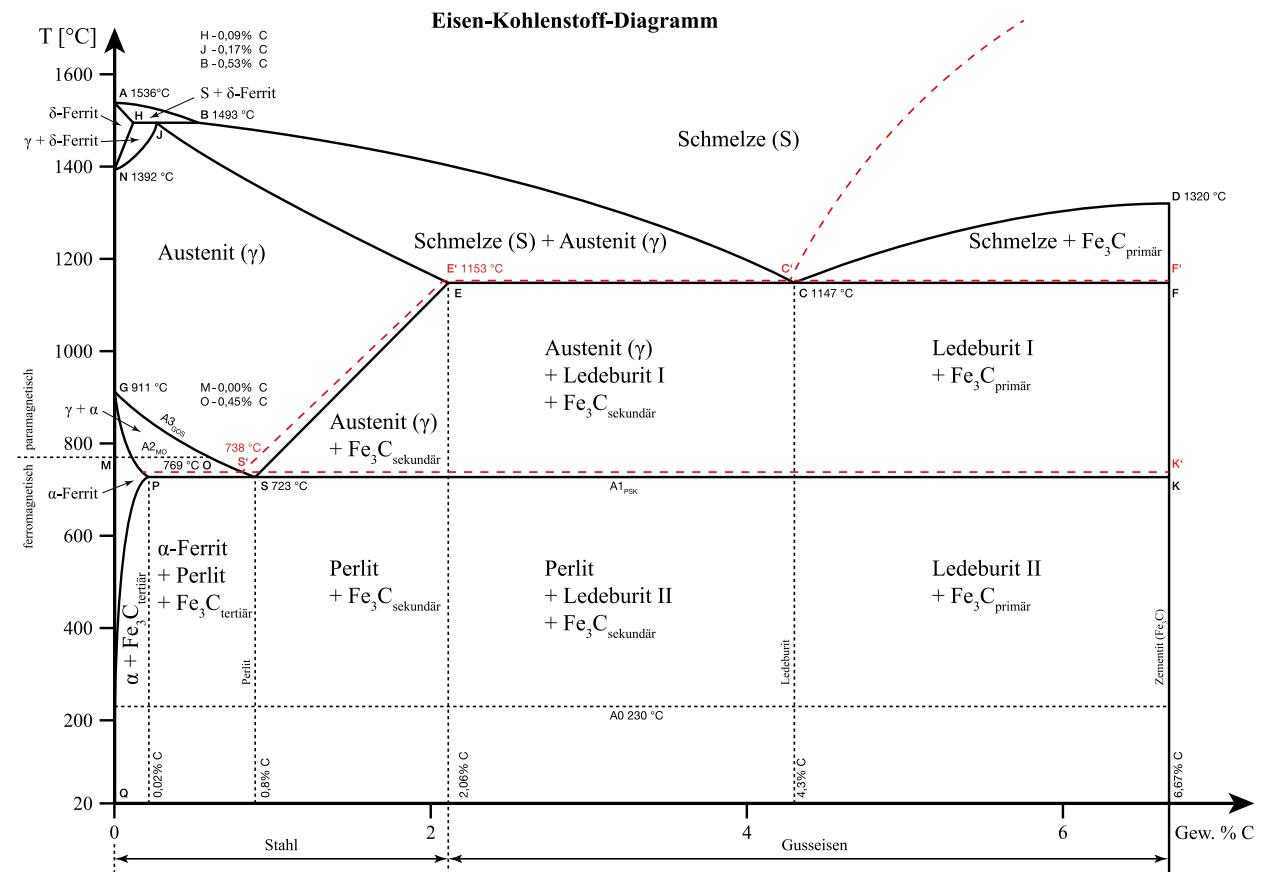
AHIECF Soliduslinie

ECF Eutektikale

PSK Eutektoid

ES, PQ Sättigungslien MOSK Curie-Linie

QPSECD Bildung/Auflösung Fe₃C



Punkte im Zustandsdiagramm

S - eutektoider Punkt

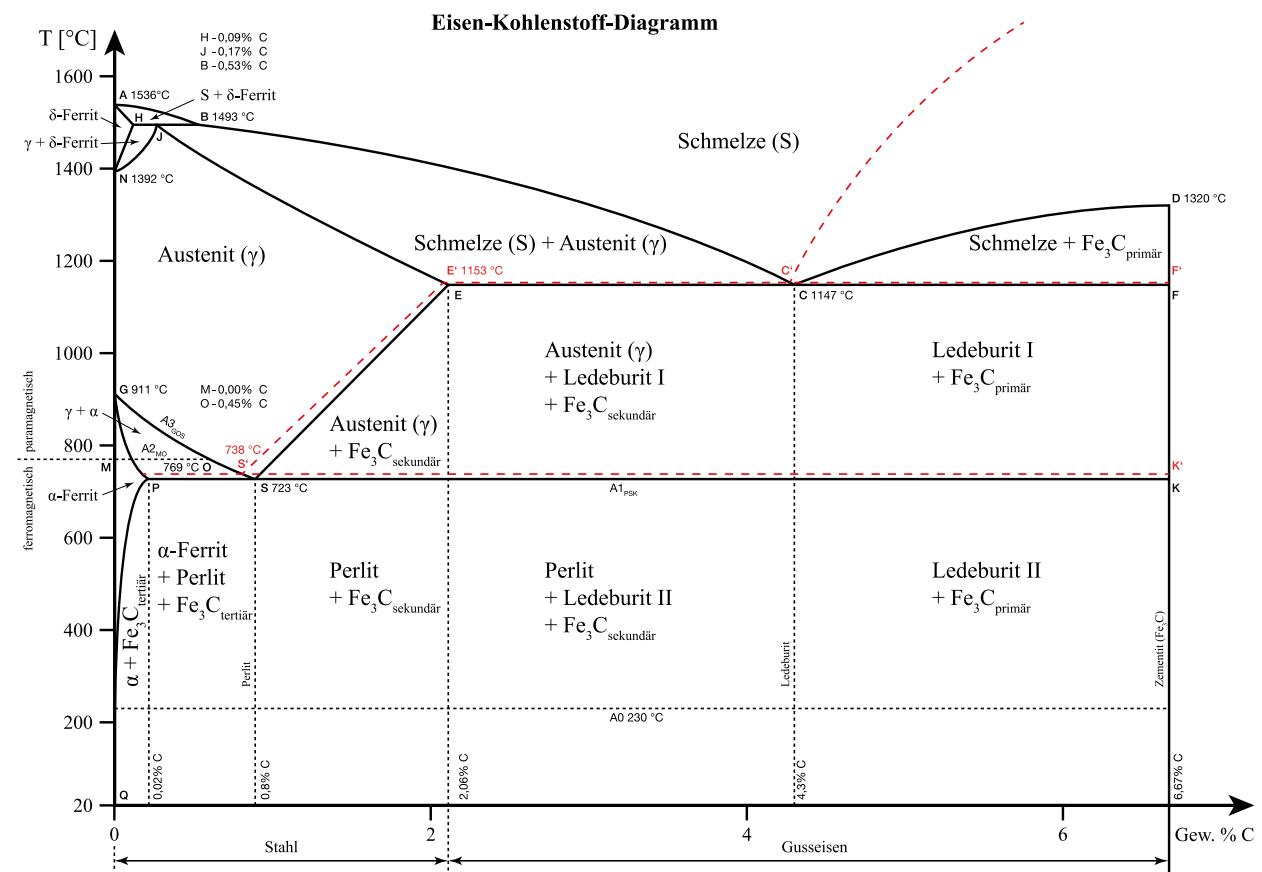
C - eutektischer Punkt

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)

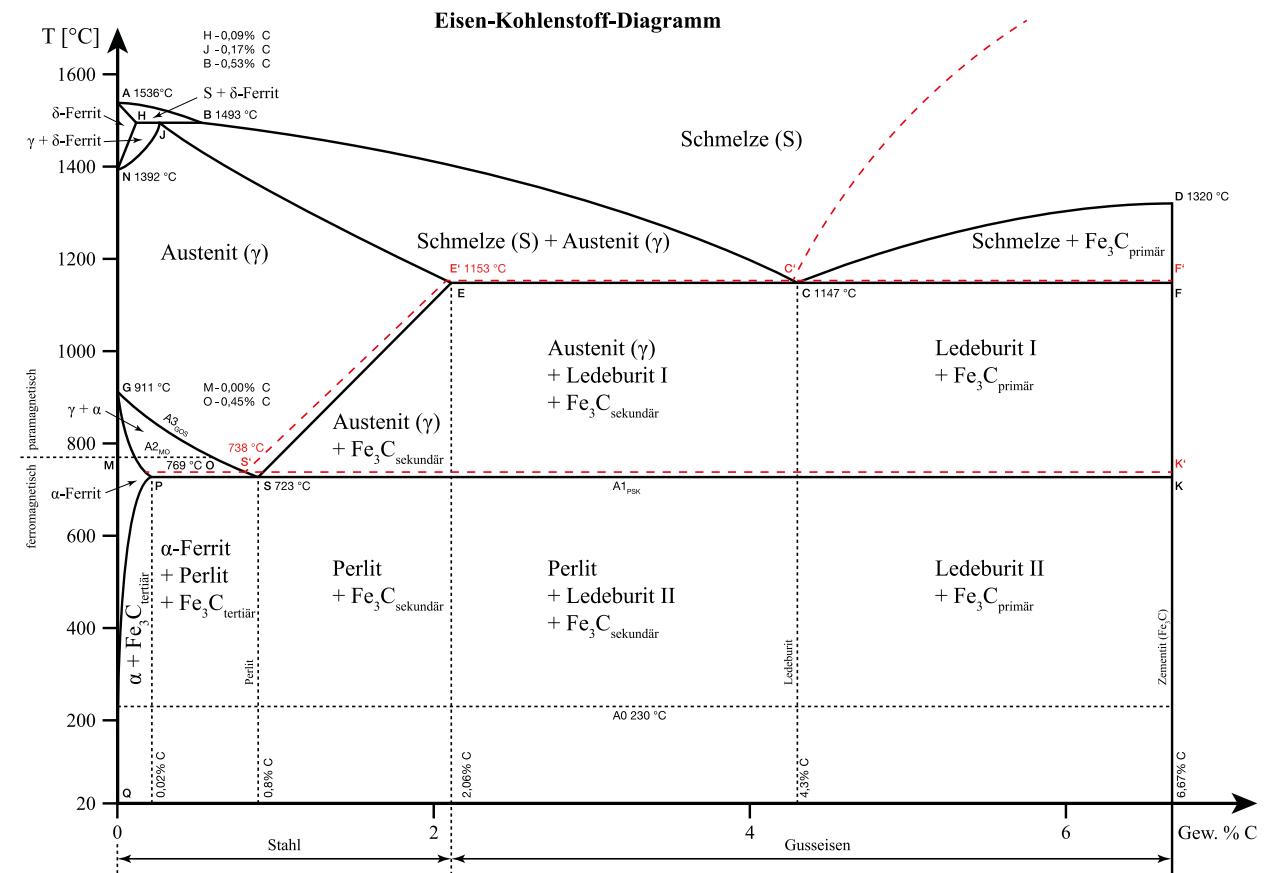
Ac1: 723°C

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}

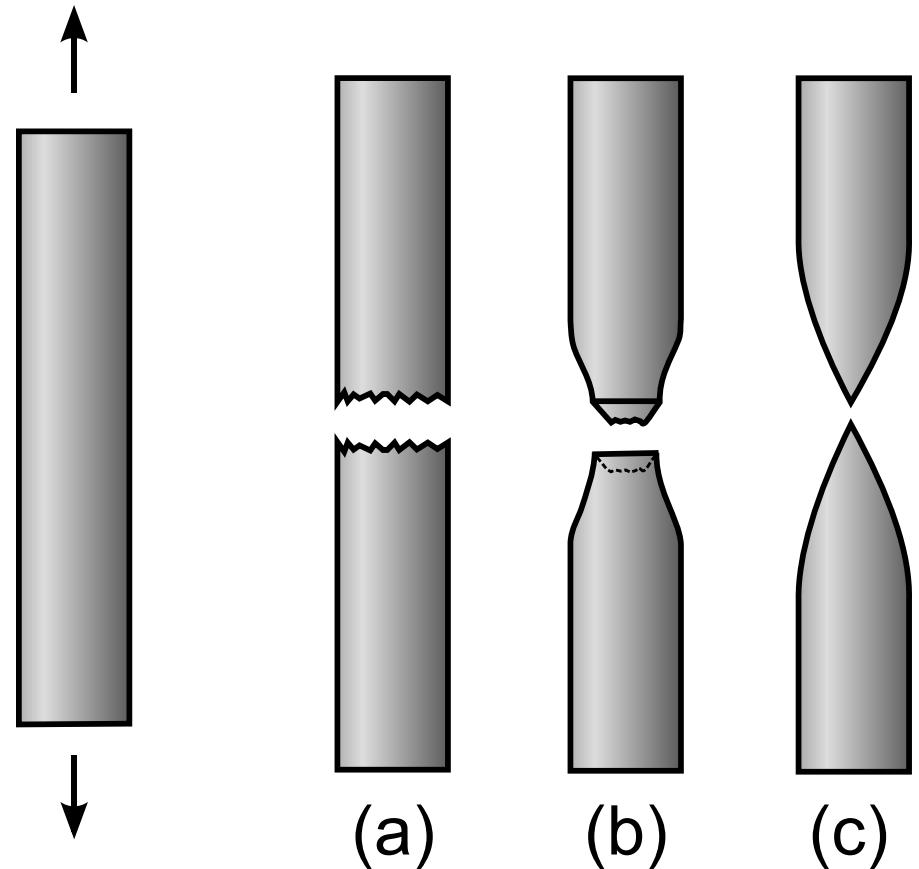
Phasen- und Gefüge im System-Eisen-Kohlenstoff

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 %



Härte / Festigkeit

Festigkeit

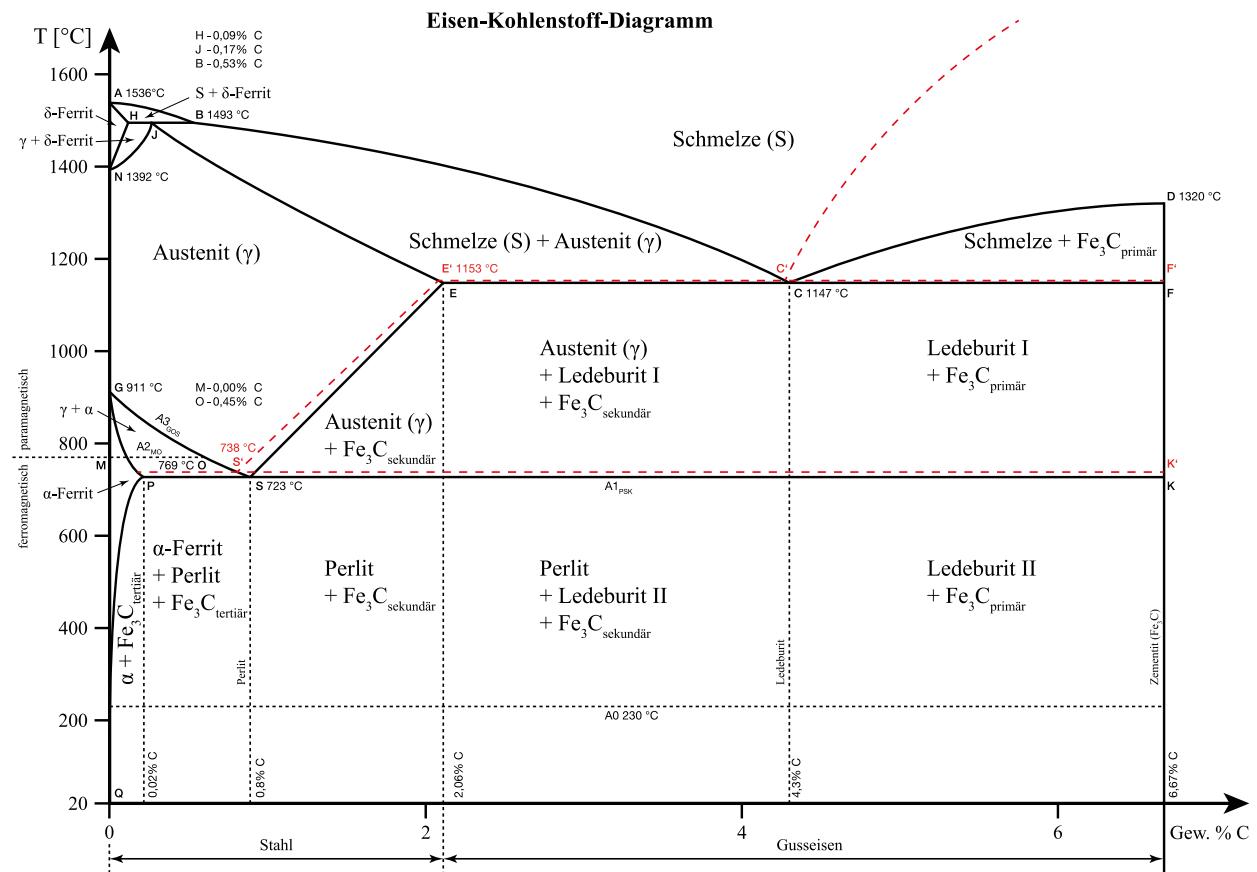
- Maß der maximalen Beanspruchbarkeit bis Versagen
- Kraft pro Querschnittsfläche

Härte

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

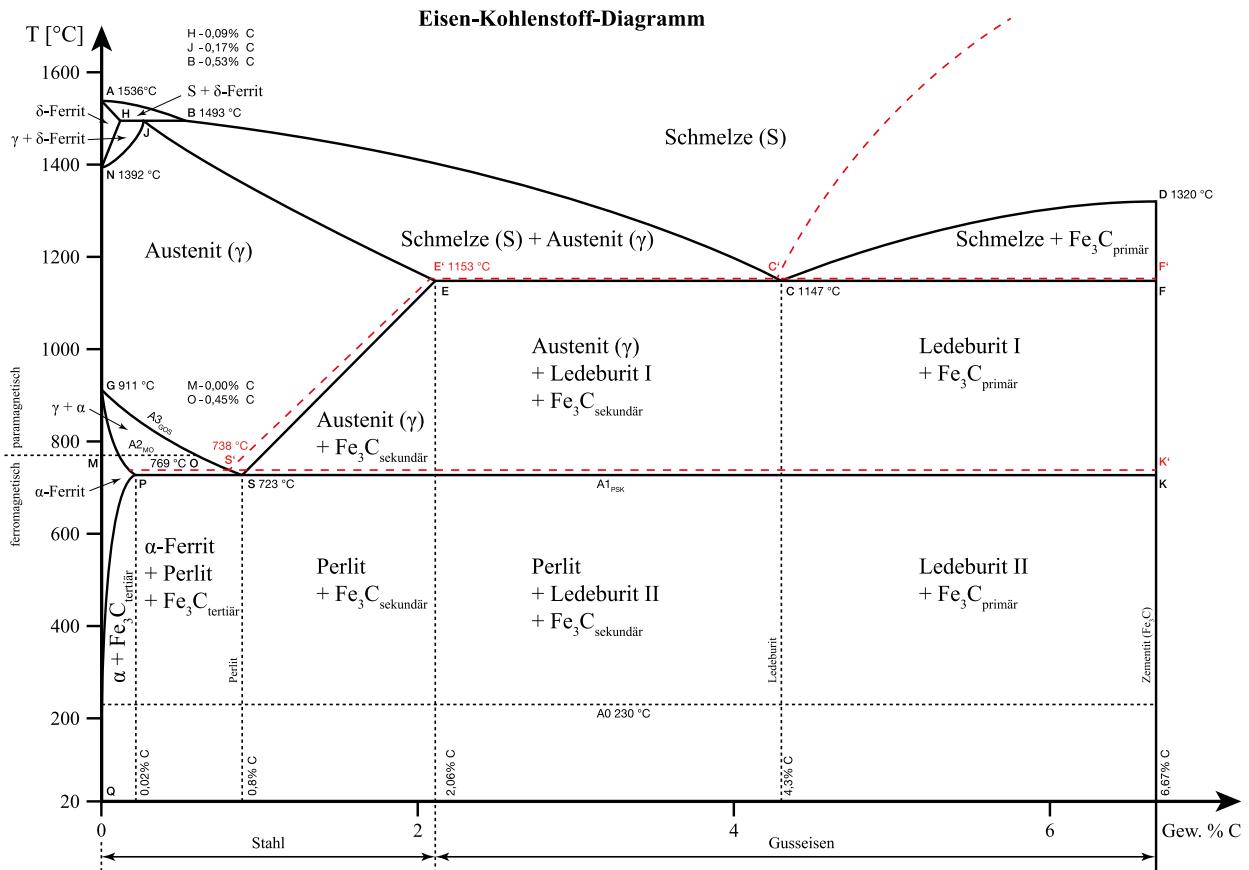
δ -Mischkristall (krz)

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

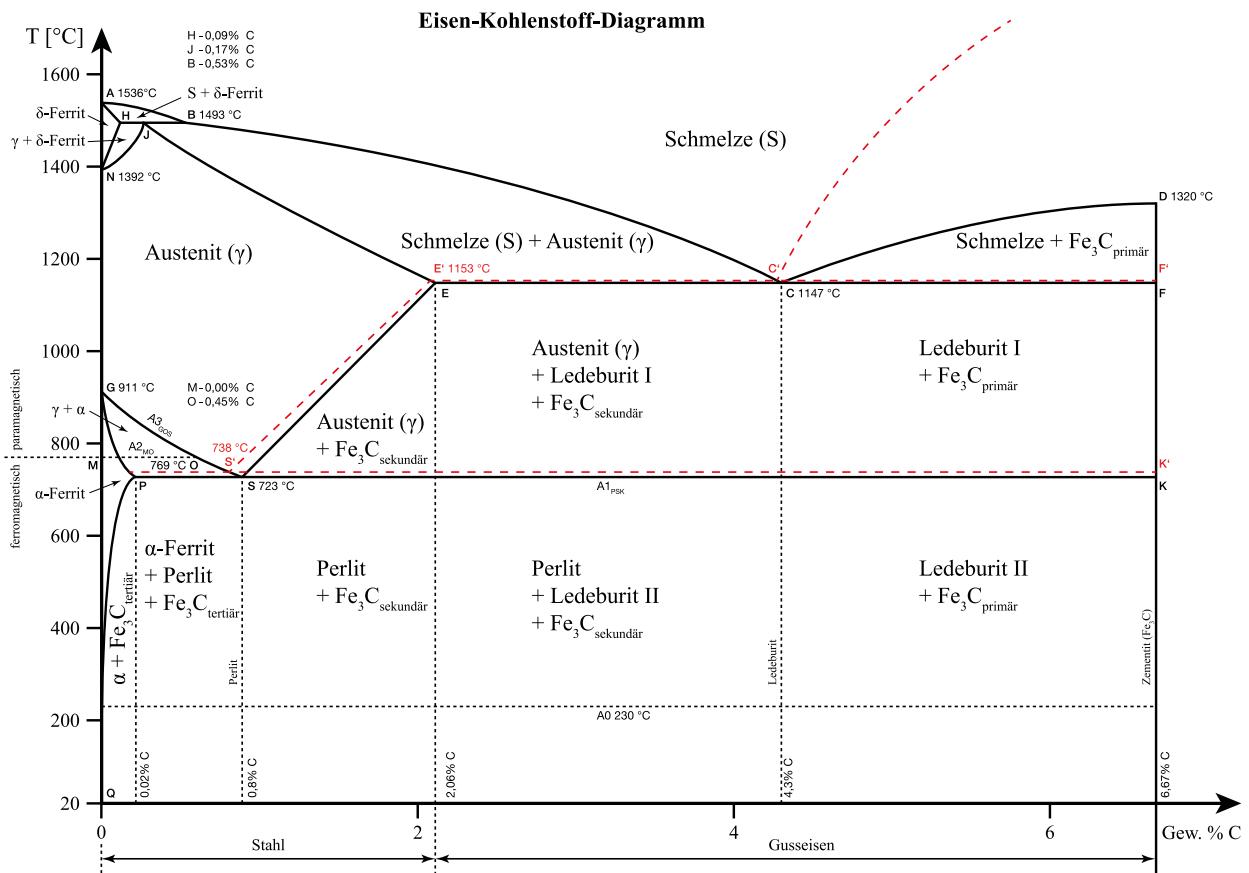


γ -Mischkristall (kfz)

- 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 %

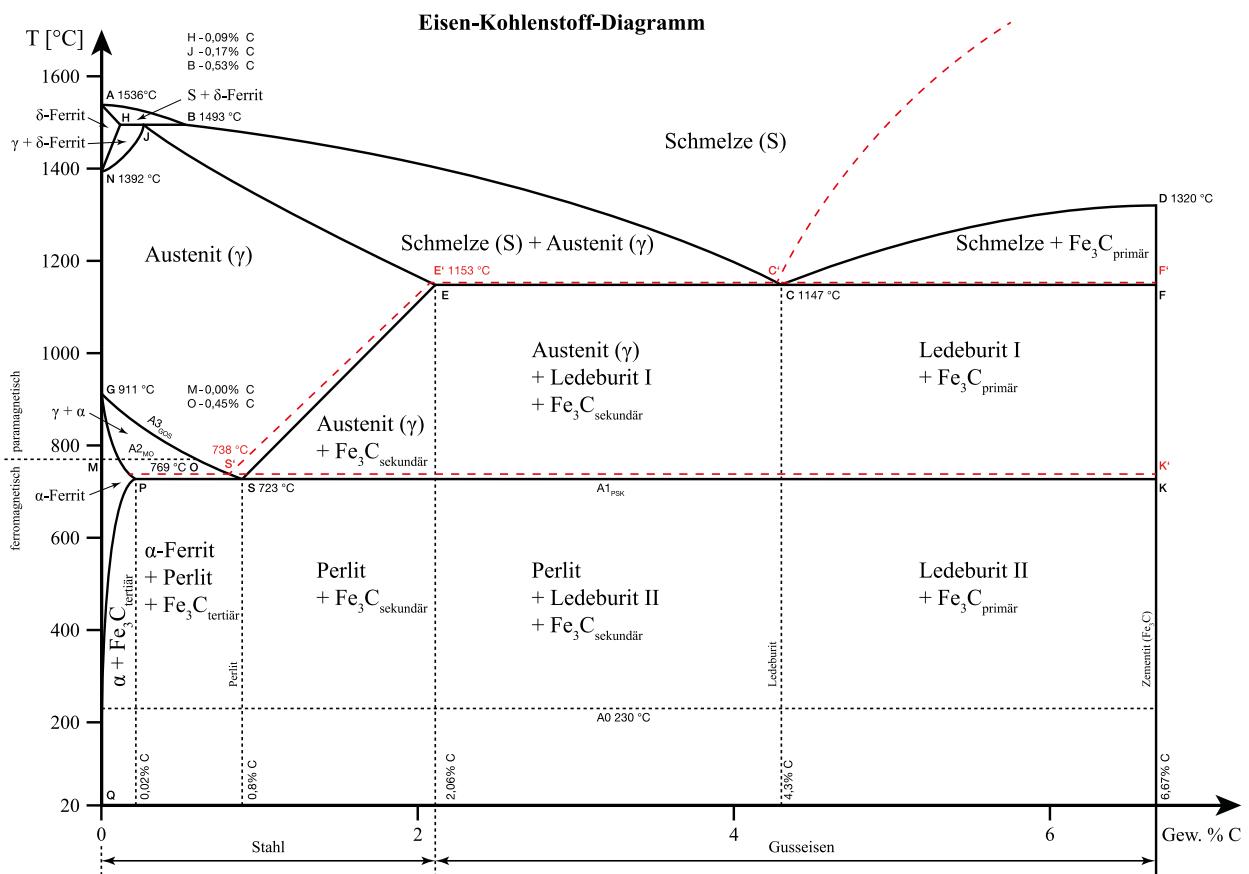


Intermediäre Phase

Zementit (Eisencarbid Fe_3C); 6.67

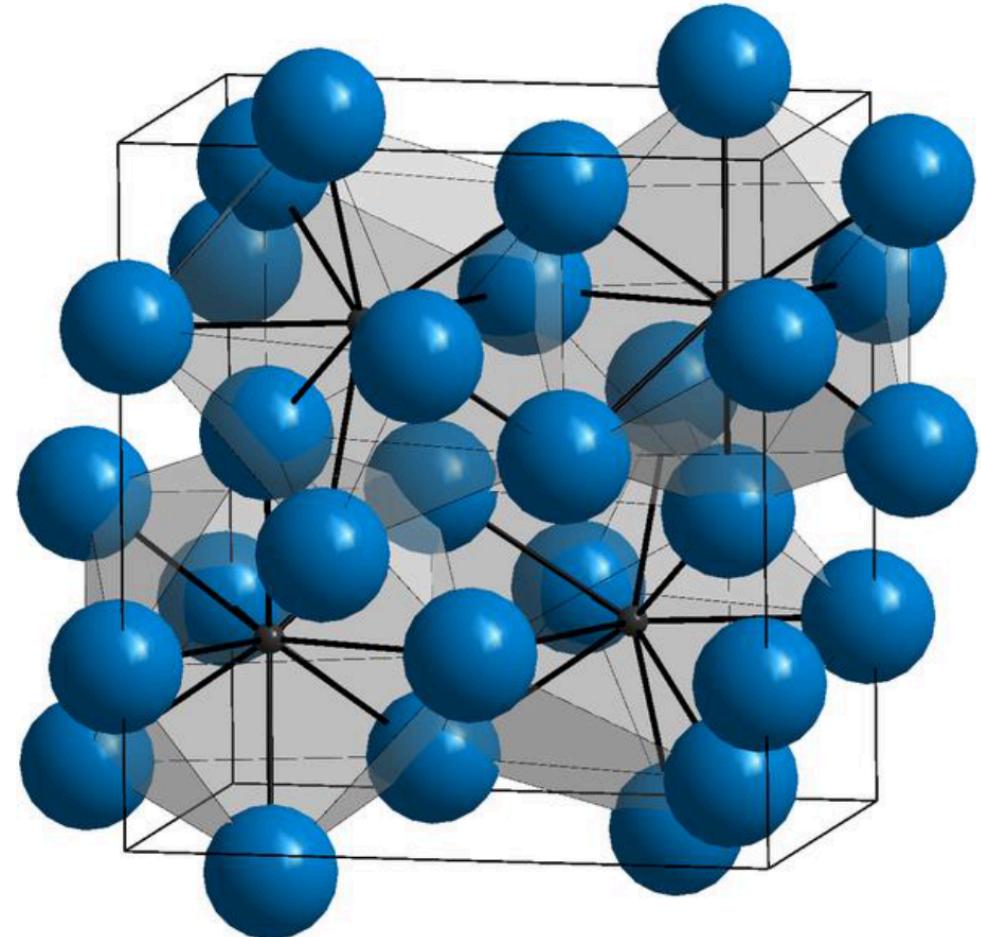
Masse-% C-Gehalt

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

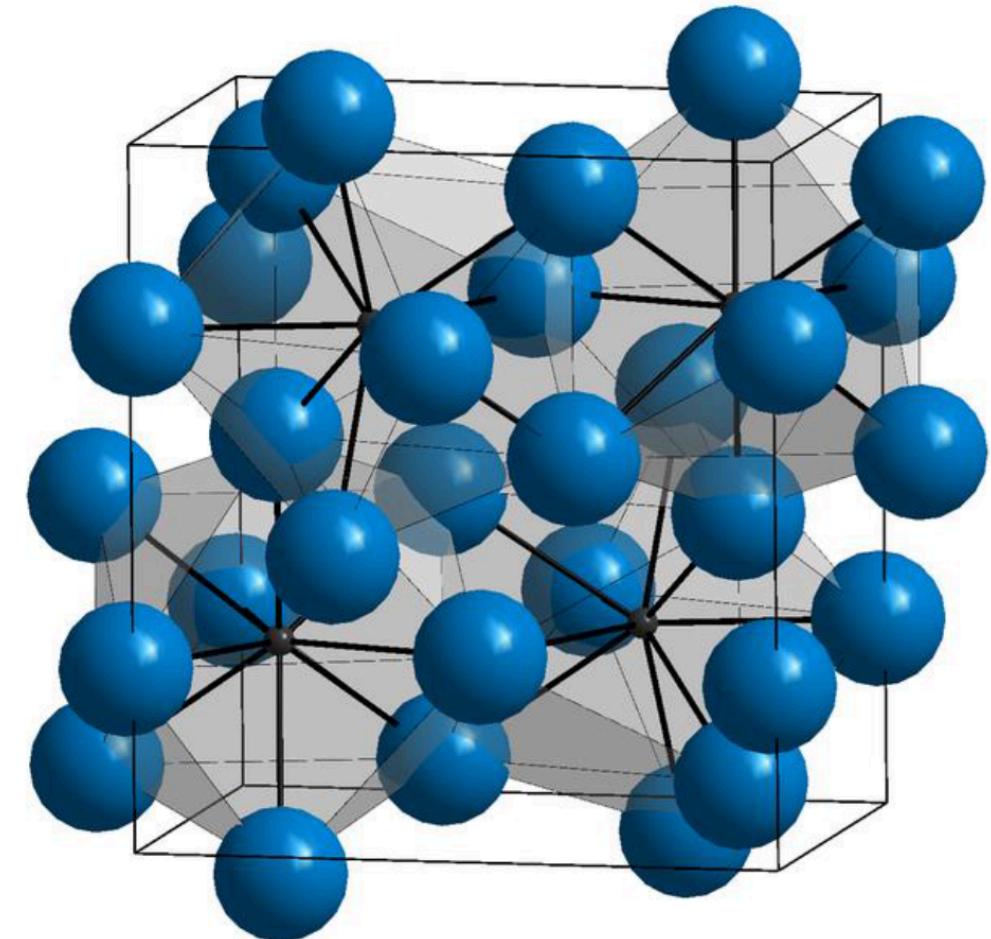


Kristallstruktur

- 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

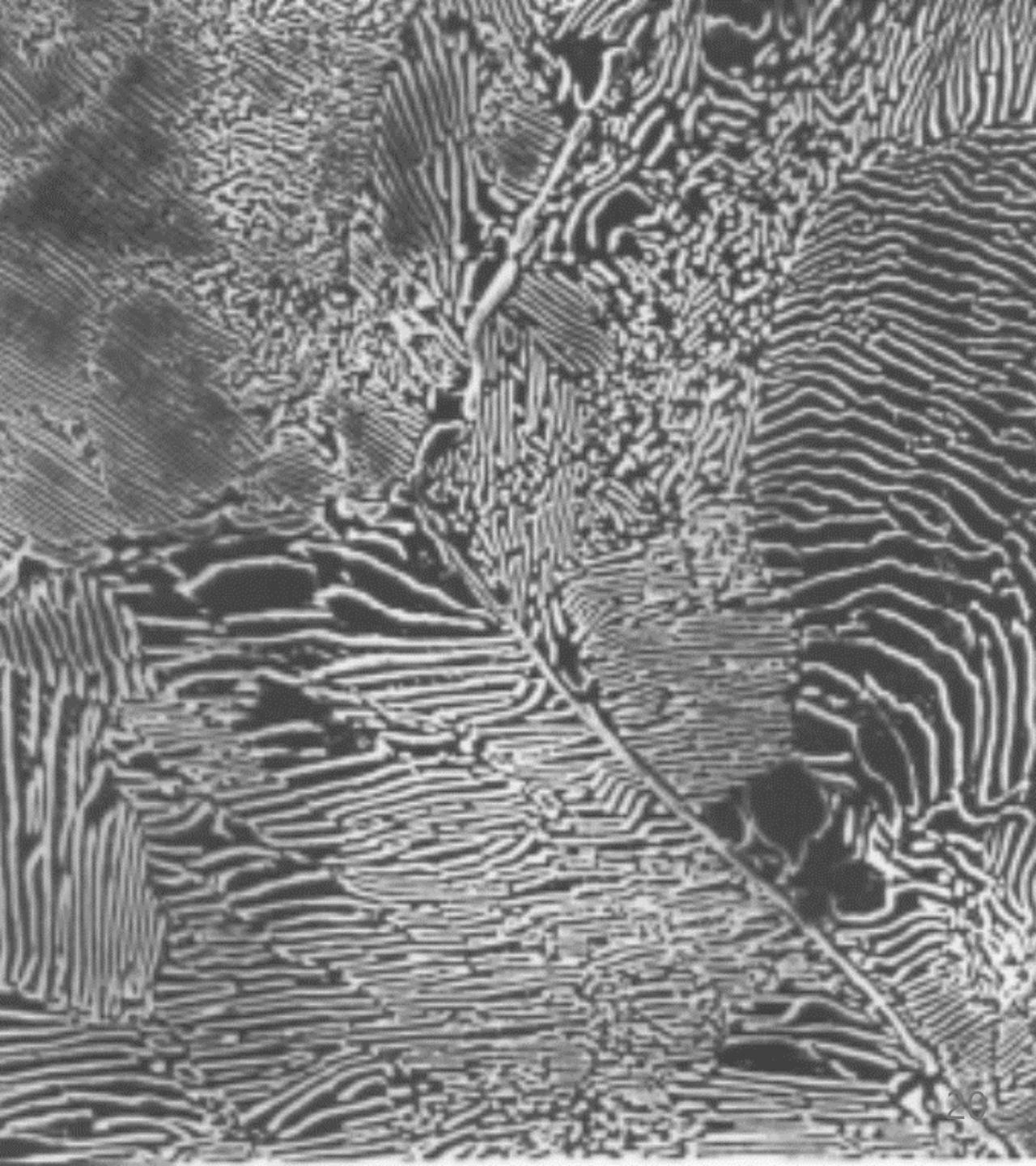


Phasengemische/Gemische von Mischkristallen

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

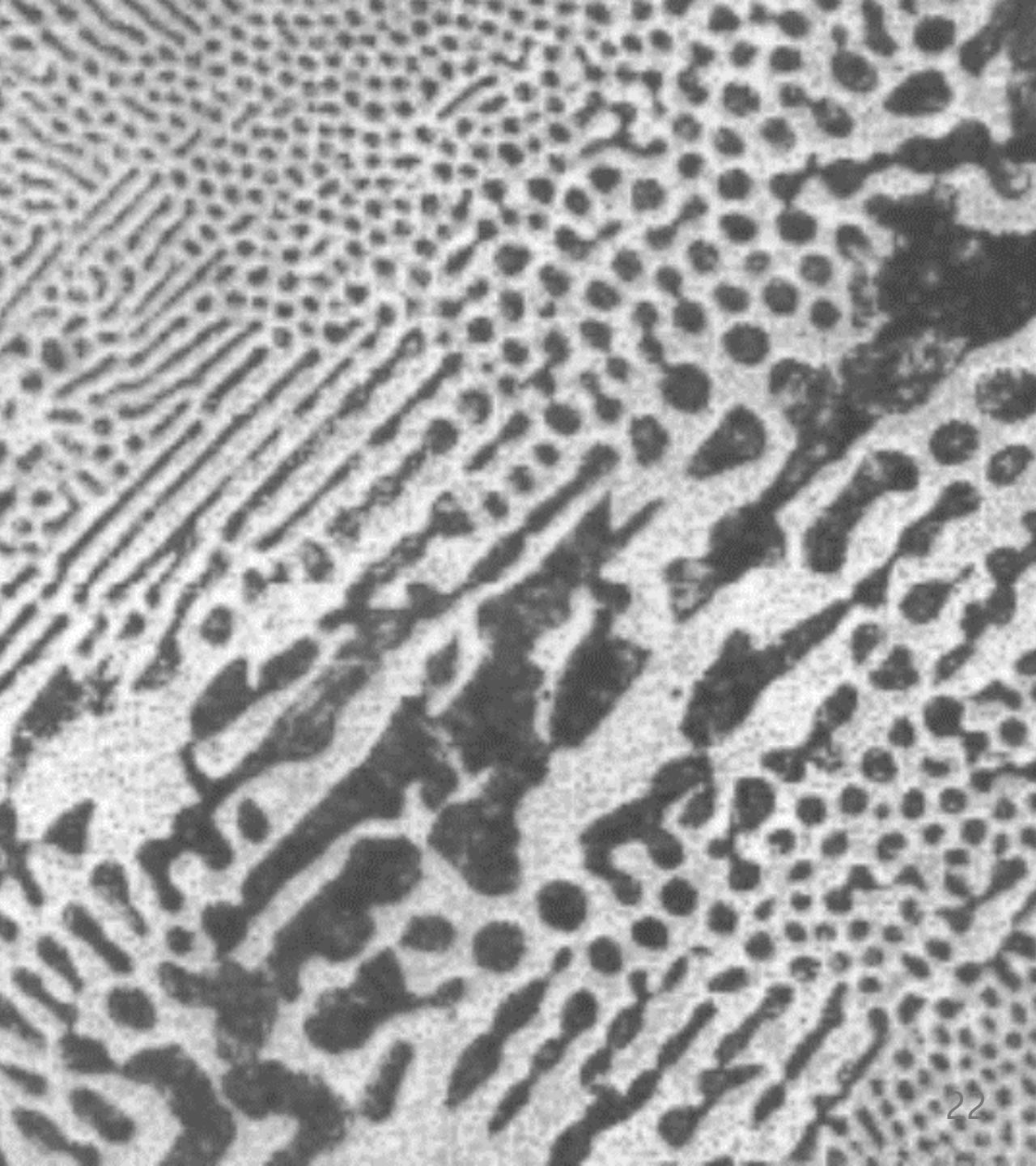
- lamellenartiger Aufbau
(Schichten von α -Mk und Fe₃C-Kristallen).
- häufig spricht man von einer "Perlitstufe", die - gemessen am Lamellenabstand - in Perlit, feinstreifigen und feinststreifigen Perlit unterteilt wird.



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.



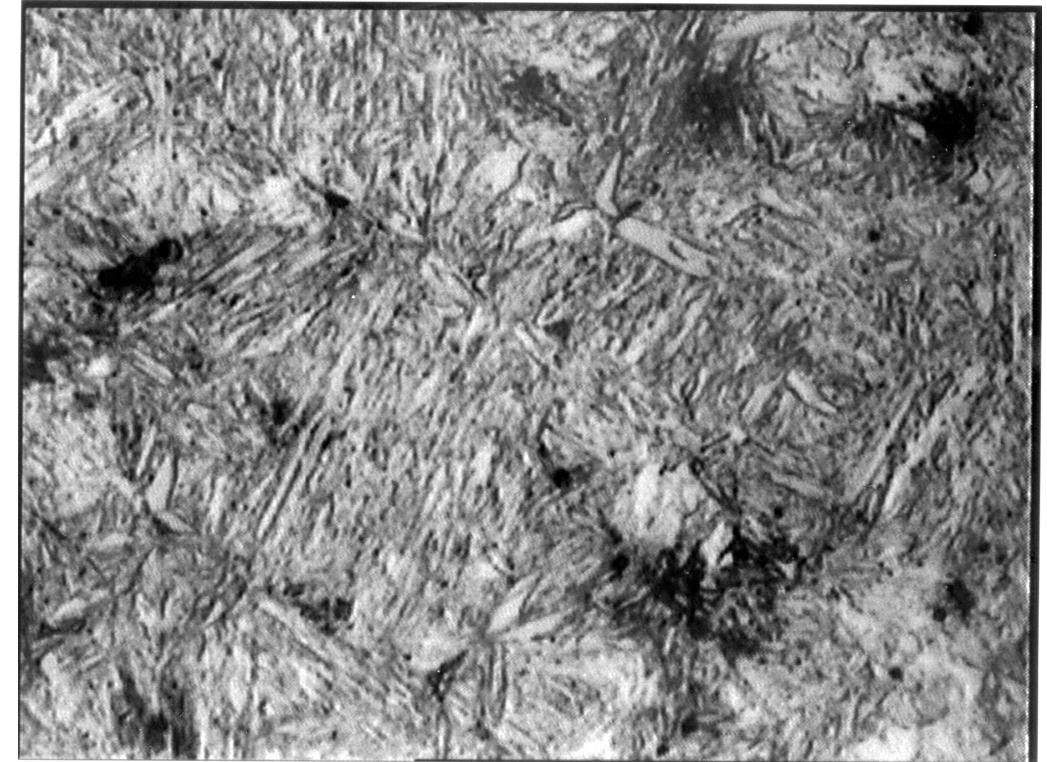
Die Eigenschaften der Legierung (z.B. Stahl, Gusseisen) wird durch die Art der beteiligten Phasen (z.B. α -Mk, Fe₃C), ihren mengenmäßigen Anteil (z. B. abhängig vom C-Gehalt) und die Art ihrer Verteilung im Gefüge bestimmt.

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

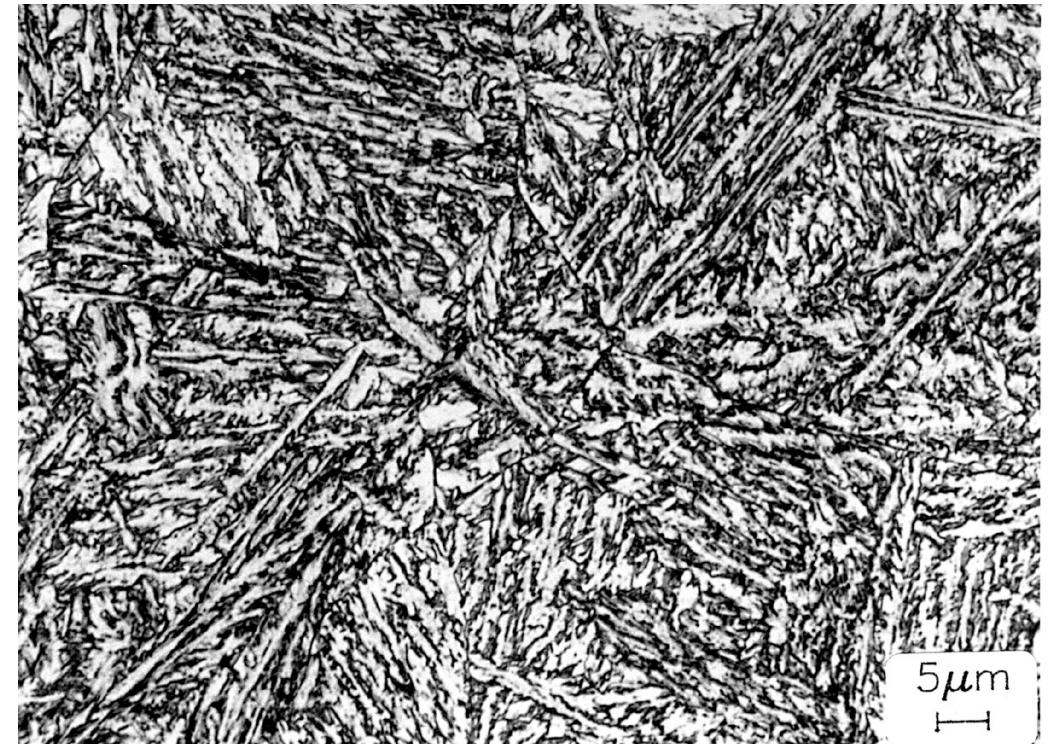
Martensit

- 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“).



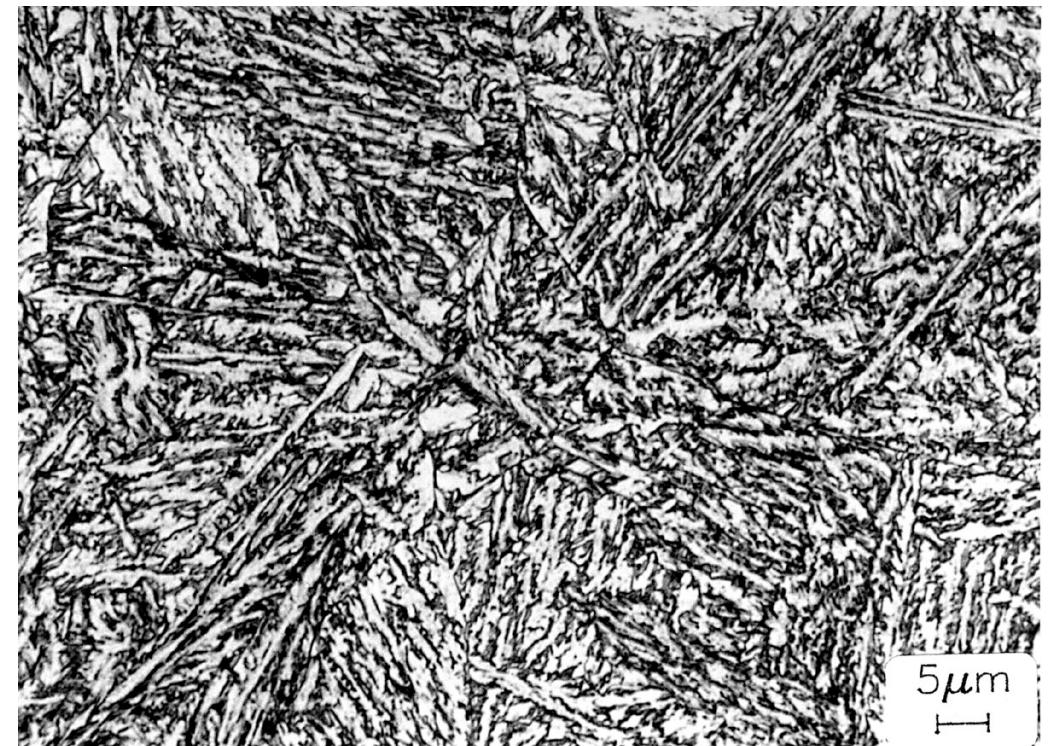
Bainit

- 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)

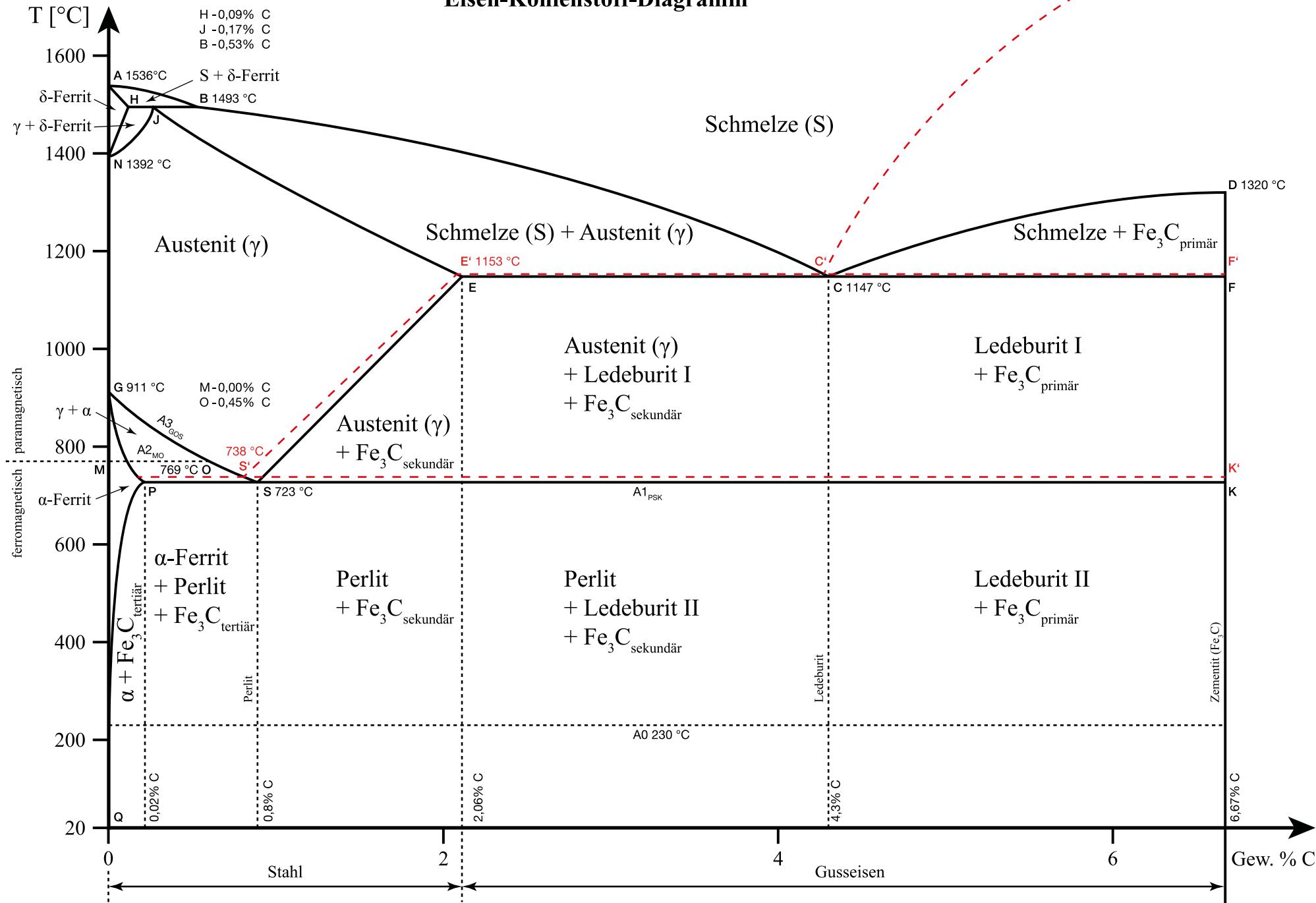


Bainit

- 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.

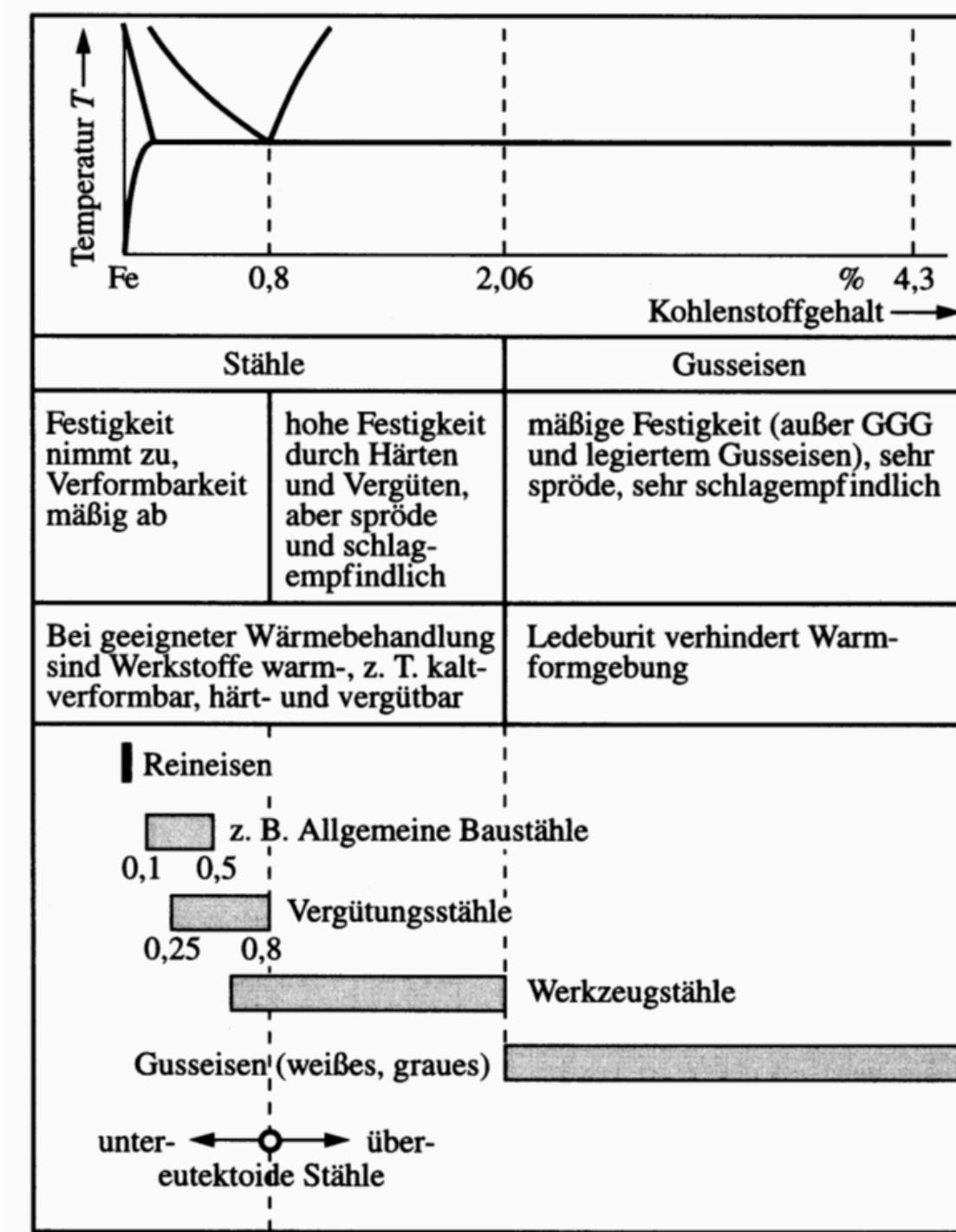


Eisen-Kohlenstoff-Diagramm



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

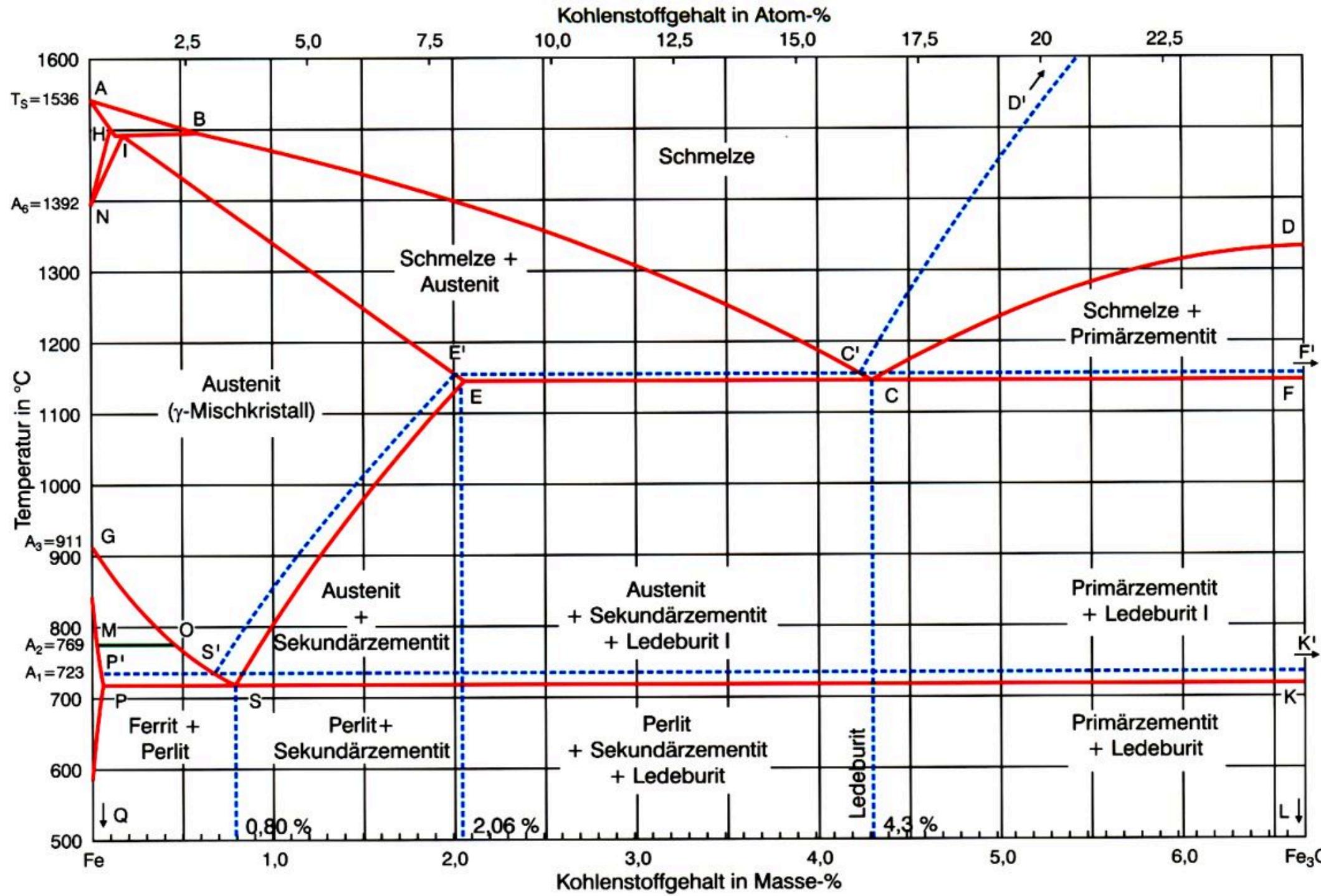
Stahl

Normen

Eigenschaften

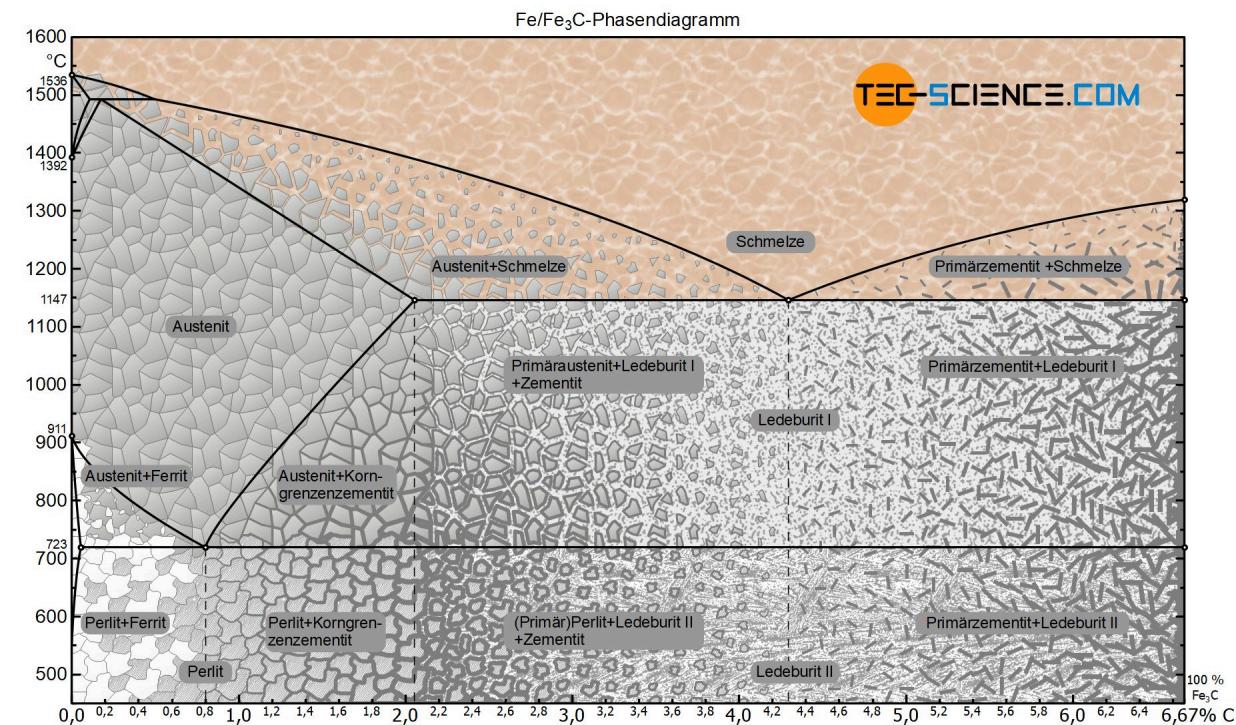
Gusseisen

- Massenanteil über 2.06 %
- gute Gießbarkeit auf (geringer Schmelzpunkt, dünnflüssige Schmelze, ...)
- hart und spröde ist
- Die Zerspanbarkeit von Gusseisen hängt von der genauen Sorte ab;
 - bei Gusseisen mit Lamellengraphit – der häufigsten Sorte – ist sie gut
 - Festigkeit ist geringer als die von Stahlguss, die Dämpfung ist höher
- Viele Sorten enthalten zusätzlich noch Silicium, das die Gießbarkeit verbessert, sowie weitere Legierungsanteile wie Mangan, Chrom oder Nickel



Es wird unterschieden zwischen:

- grauem Gusseisen (Grauguss), in dem der Kohlenstoff in Form von Graphit vorkommt. *Die Bruchflächen erscheinen grau*
- weißem Gusseisen, in dem der Kohlenstoff als Carbid in Form von Zementit (Fe_3C) vorkommt. *Die Bruchflächen sind weiß*



Vergleich Gusseisen und Stahl

Qualitativ zum Lesen

- Dichte $7.2 \frac{g}{cm^3}$ vs. $7.85 \frac{g}{cm^3}$
- Schmelztemperatur $1150^\circ C$
- korrosionsbeständiger als Stahl
- spröder als Stahl
- Schwindmaß ist nur ca 1%

Quantitativ

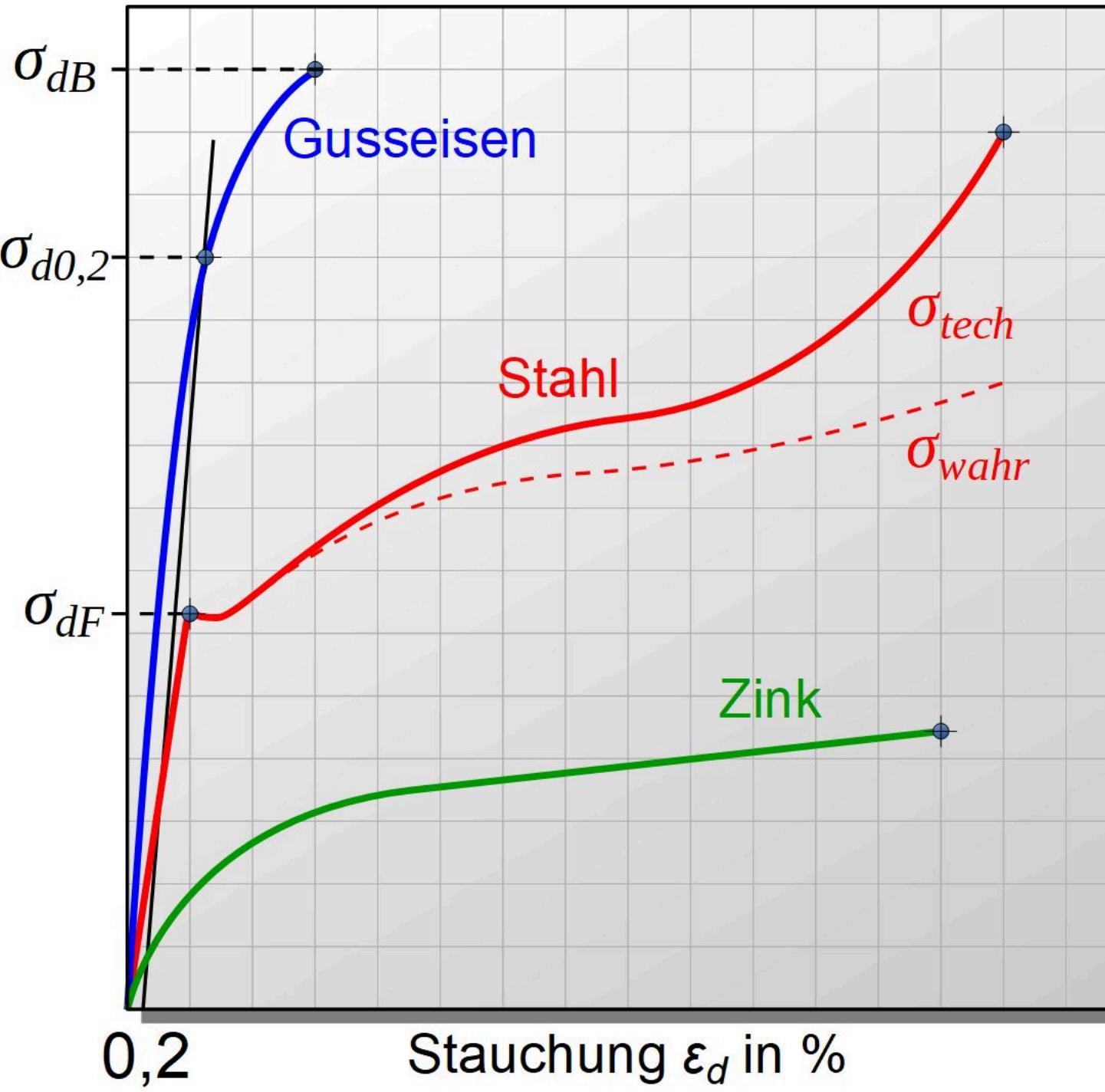
bild 16.3 einfügen aus Werkstofftechnik für dummies

stabile Systeme (nicht gelöster Kohlenstoff in Form von Grafitkristallen) treten umso eher auf

- je höher der Kohlenstoffanteil
- je höher der Siliziumanteil
- je langsamer die Abkühlung

metastabile Systeme in Form von Zementitkristallen (Kohlenstoff ist nicht gelöst)

Druckspannung σ_d in N/mm²



Einteilung und Eigenschaften

Gusseisen mit Lamellengraphit

- einfachste und häufigste Gusseisen-Sorte ist Gusseisen mit Lamellengraphit
- Graphit liegt in Form von dünnen, unregelmäßig geformten Lamellen vor



Gusseisen mit Lamellengraphit

- Lamellen wirken bei Zugbelastung als Kerben, daher ist die Zugfestigkeit infolge der Kerbwirkung relativ gering
- Druckfestigkeit liegt etwa um den Faktor 4 höher als die Zugfestigkeit

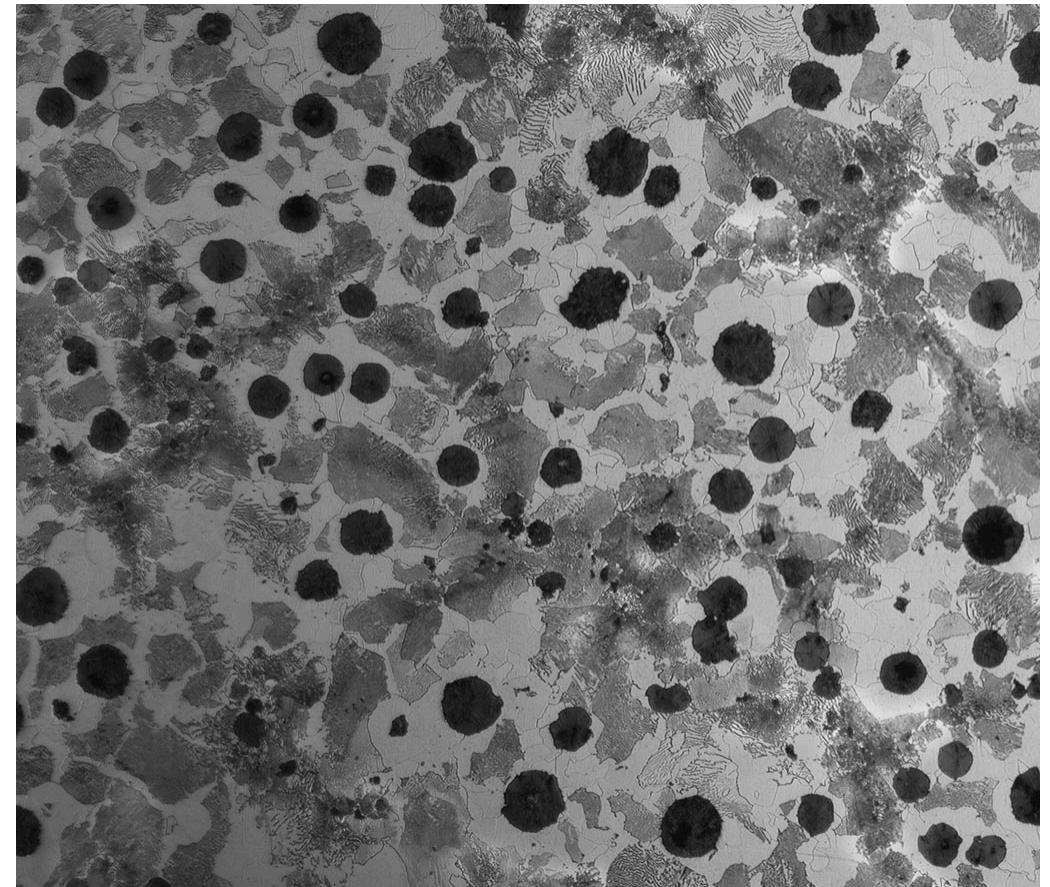


- spröder Werkstoff
- gute Wärmeleitfähigkeit
- vorteilhafte Selbstschmiereigenschaften
- wenn durch Bearbeitung die Lamellen angeschnitten und der Graphit selbst oder an dessen Stelle andere Schmiermittel in den Hohlräumen „bevorratet“ werden können.



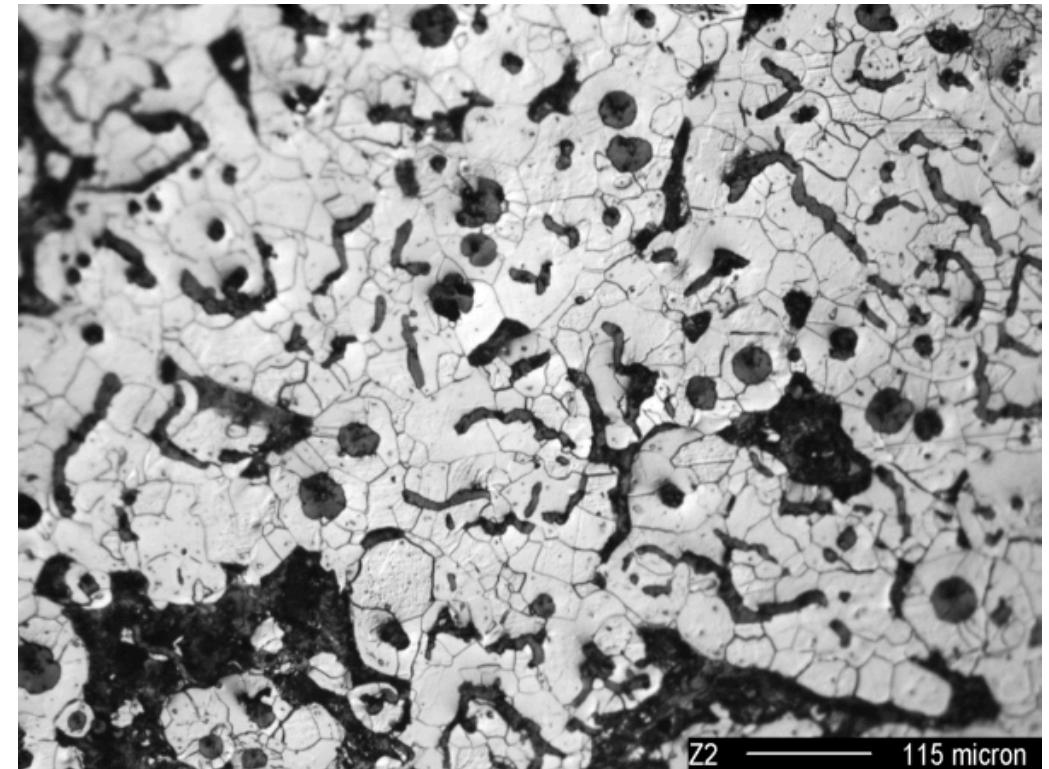
Gusseisen mit Kugelgraphit

- Bessere mechanische Eigenschaften als Gusseisen mit Lamellengraphit
- zeigt duktiles Verhalten



Gusseisen mit Vermiculargraphit

- Eigenschaften zwischen Gusseisen mit Lamellengraphit und denen des Gusseisens mit Kugelgraphit
- Herstellung ist jedoch schwieriger und erfordert eine in engen Toleranzen geführte Schmelzbehandlung



- höhere Festigkeit und Bruchdehnung und Bruchzähigkeit
 - geringere Wanddickenabhängigkeit der Eigenschaften
- Gusseisen mit Vermiculargrafit zeichnet sich gegenüber Gusseisen mit Lamellengrafit durch folgende Eigenschaften aus:
- höhere Festigkeit und Bruchdehnung
 - höhere Bruchzähigkeit
 - geringere Wanddickenabhängigkeit der Eigenschaften

Gegenüber Gusseisen mit Kugelgrafit bietet Gusseisen mit Vermiculargrafit folgende Vorteile:

- niedrigerer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- höhere Wärmeleitfähigkeit
- niedrigerer E-Modul
- geringeres thermisch induziertes Eigenspannungsniveau
- bessere Temperaturwechselbeständigkeit und geringere Verzugsneigung aufgrund der zuvor genannten Eigenschaften
- besseres Dämpfungsvermögen
- bessere gießtechnische Eigenschaften (geringere Lunkerneigung, besseres Formfüllungs- und Fließvermögen)

