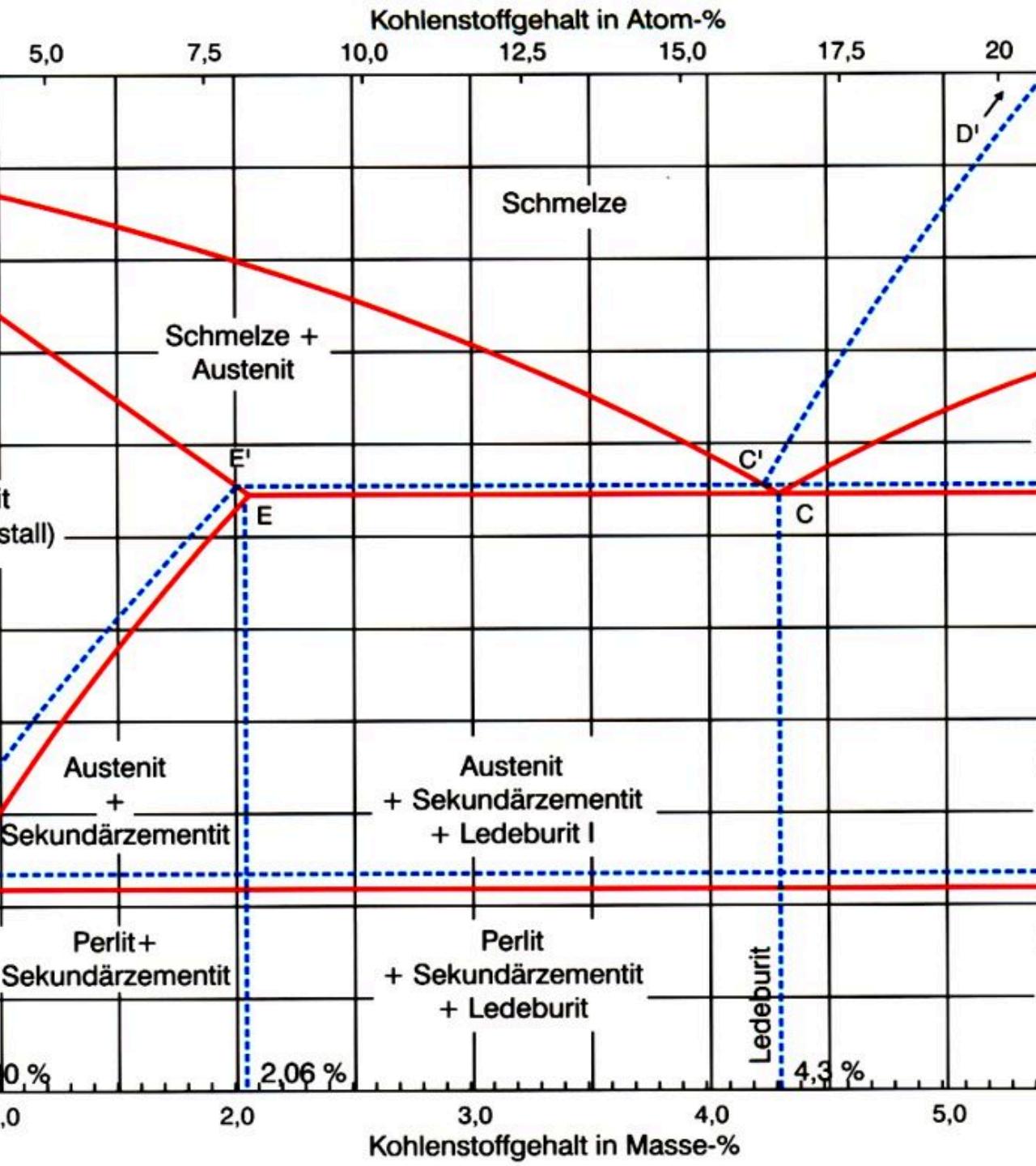


# Vorlesung Werkstofftechnik - Phasen- und Gefüge im System-Eisen-Kohlenstoff

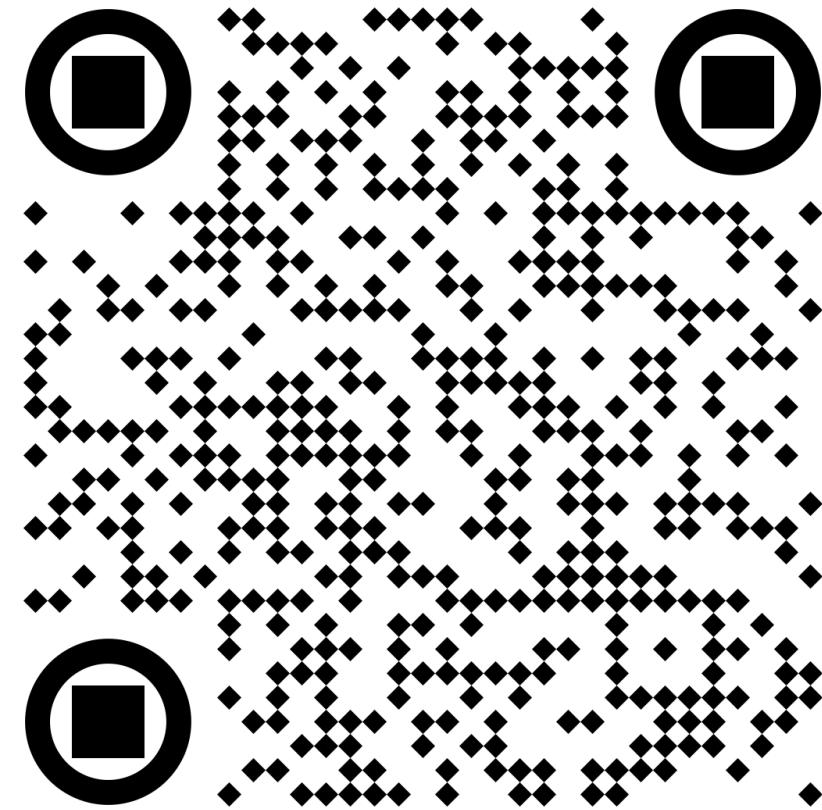
Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg<sup>id</sup>

Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: [christian.willberg@h2.de](mailto:christian.willberg@h2.de)



## Molekulardynamische Simulation



# 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

# Eisen-Kohlenstoffdiagramm (EKD)

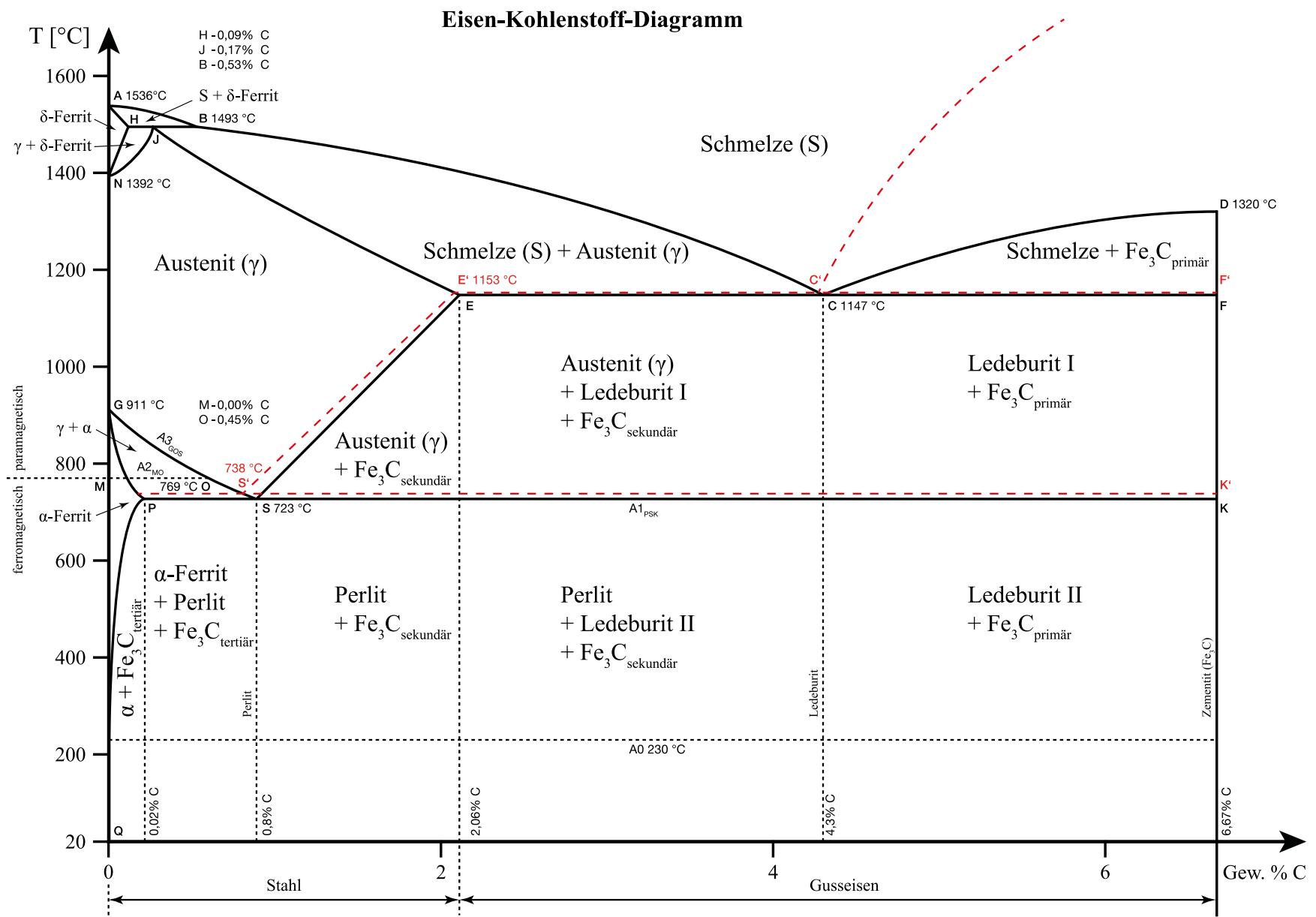
- wichtigstes ZSD
- Eisen ist der wichtigste Werkstoff im Maschinenbau.

Gründe sind

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

[Erklärvideo für das Eisen Kohlenstoff Diagramm](#)

- Man kann je nach Erscheinungsform des Kohlenstoffs zwischen dem stabilen System Fe-C, in dem Kohlenstoff als Graphit, und dem metastabilen System Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , in dem Kohlenstoff gebunden als  $\text{Fe}_3\text{C}$  (intermediäre Phase Zementit) vorliegt, unterscheiden



# Wichtige Gleichgewichtslinien

ABCD Liquiduslinie

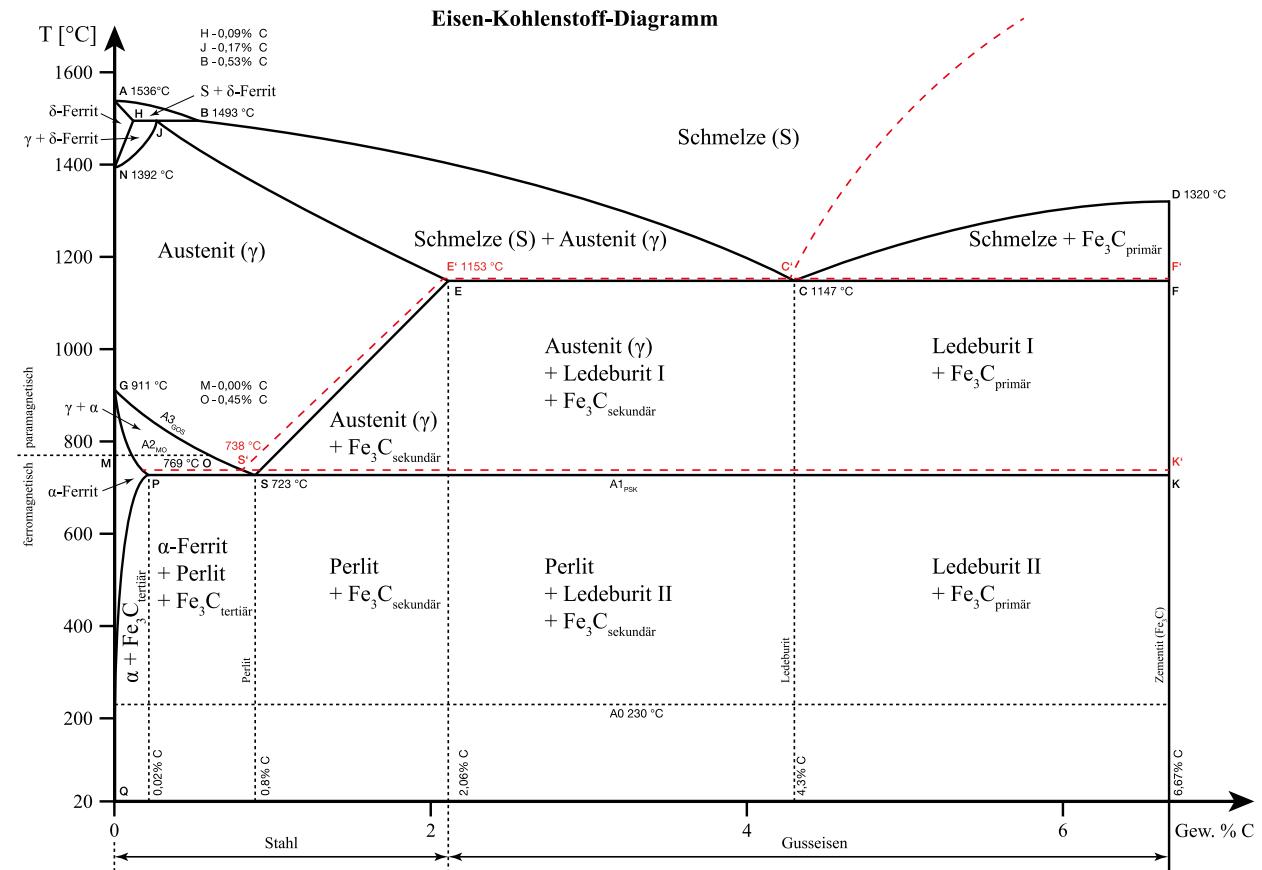
AHJECF Soliduslinie

ECF Eutektikale

PSK Eutektoid

ES, PQ Sättigungslien MOSK Curie-Linie

QPSECD Bildung/Auflösung  $\text{Fe}_3\text{C}$



# Punkte im Zustandsdiagramm

S - eutektoider Punkt

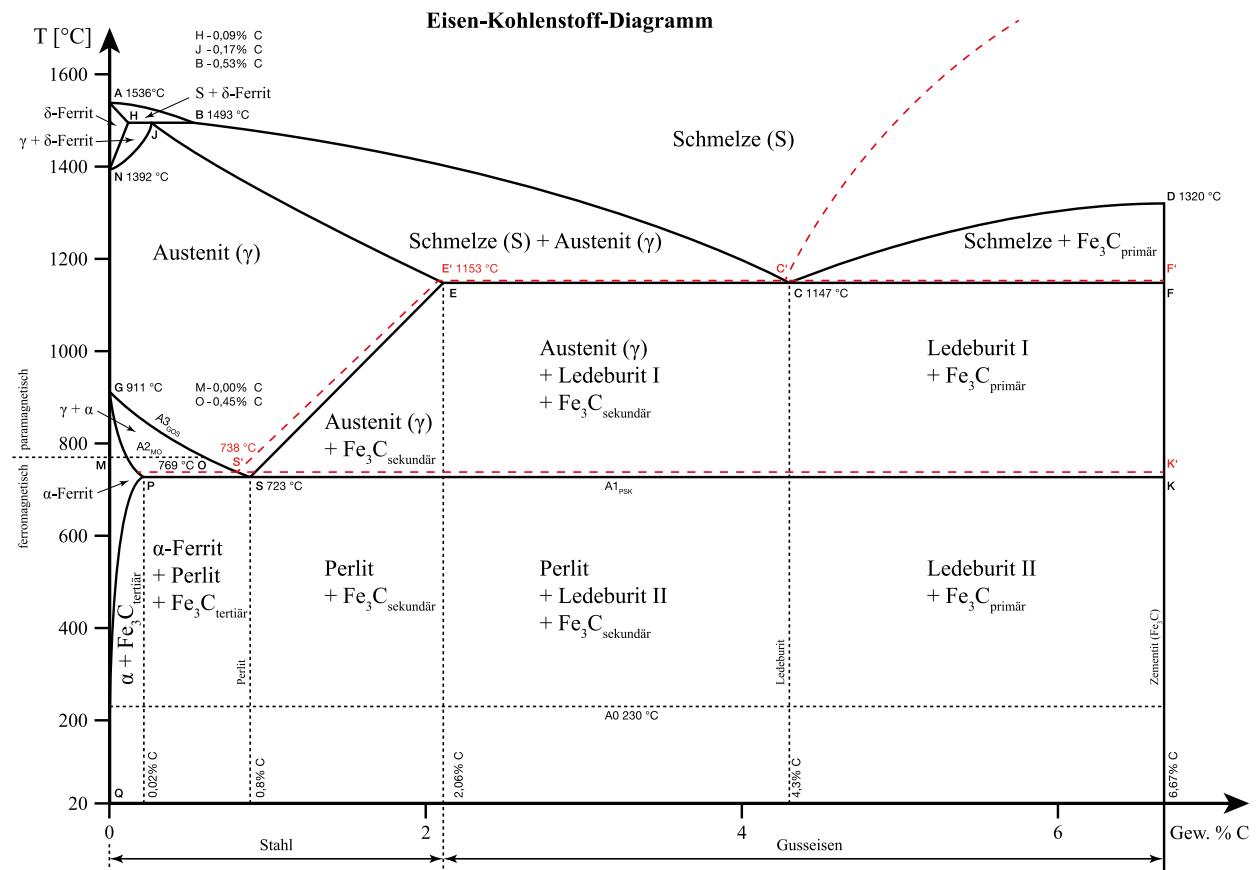
C - eutektischer Punkt

G -  $\alpha / \gamma$  - Umwandlungspunkt des reinen Eisens

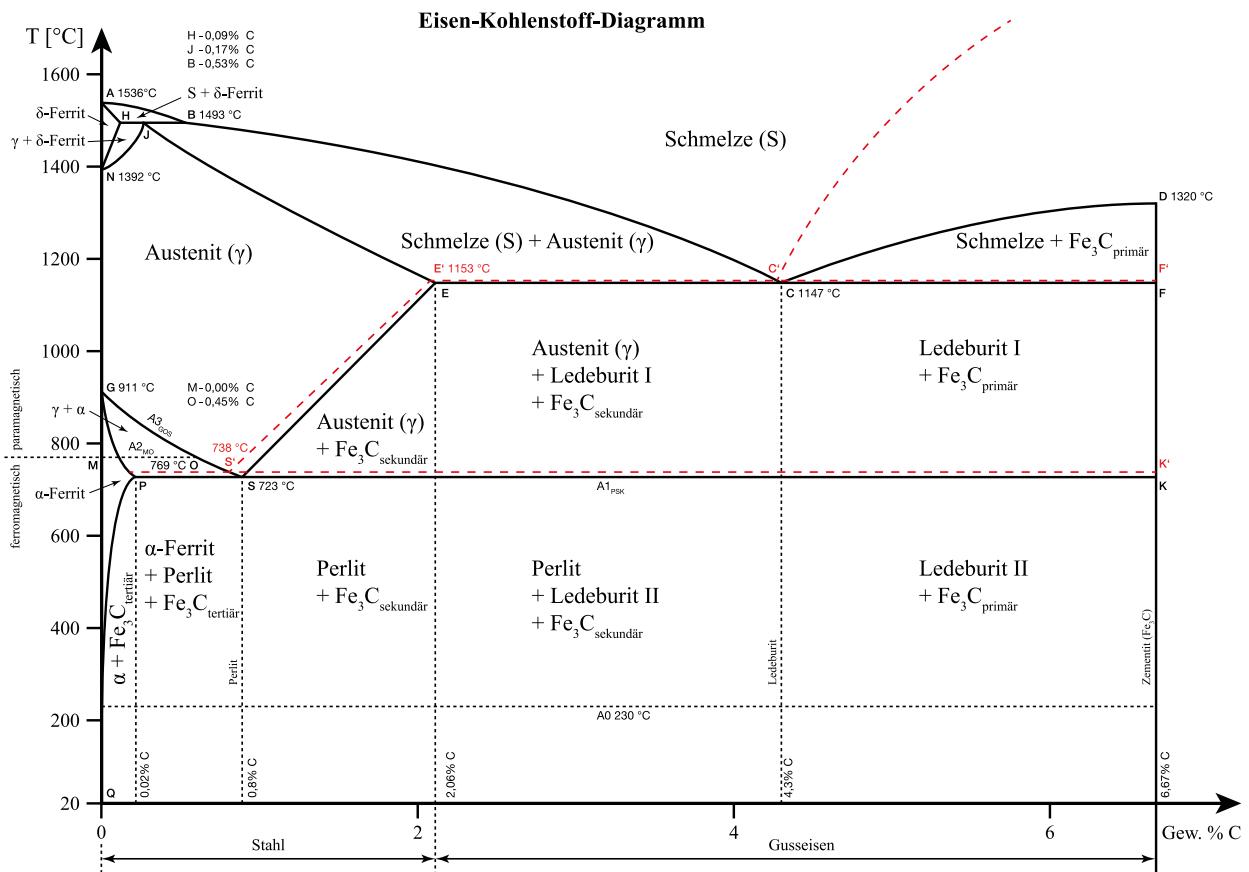
E - Punkt max. C-Löslichkeit im  $\alpha$ -MK

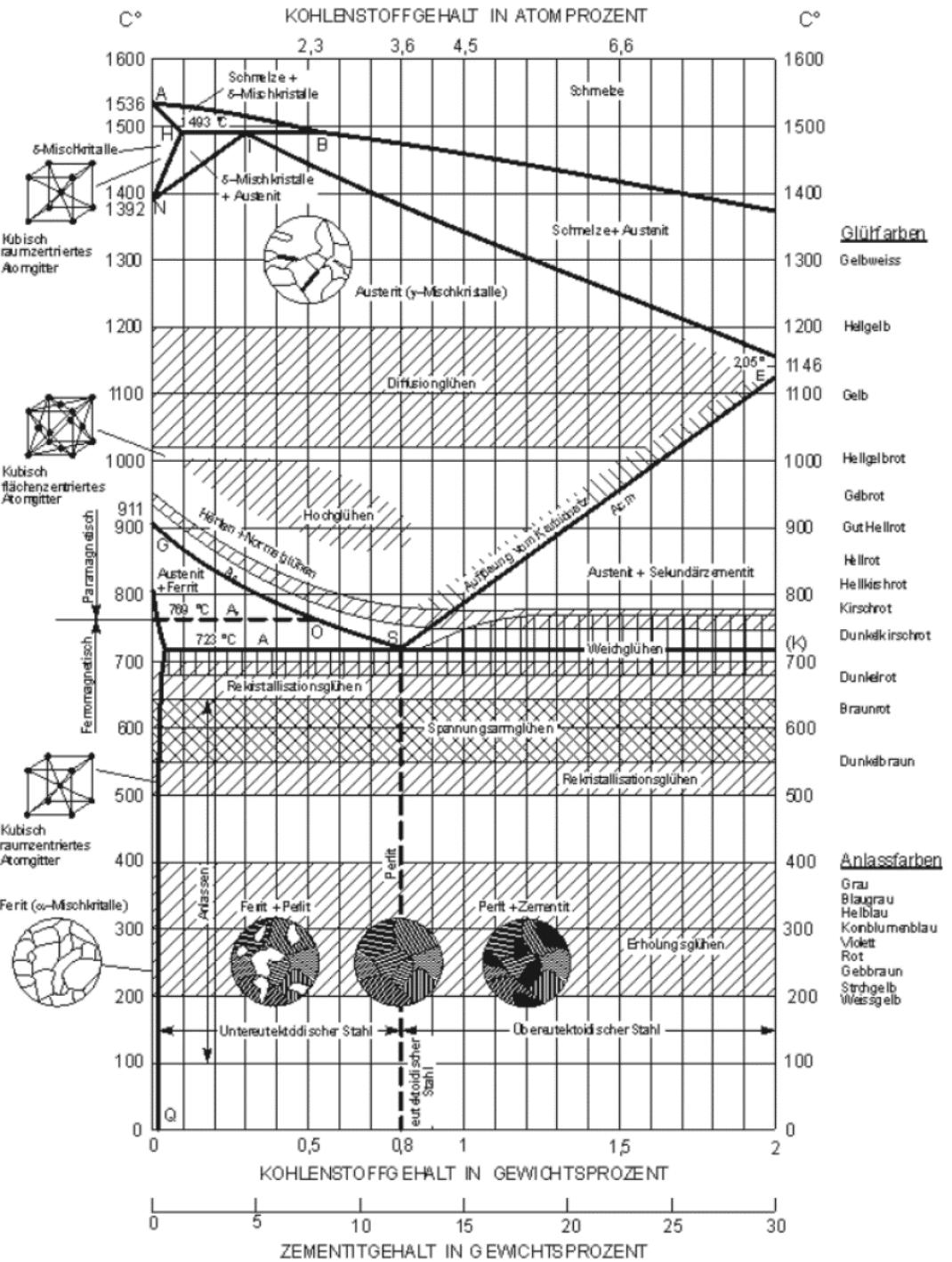
P - Punkt max. C-Löslichkeit im  $\gamma$ -MK

u. a. m. (vgl. Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  - Diagramm)



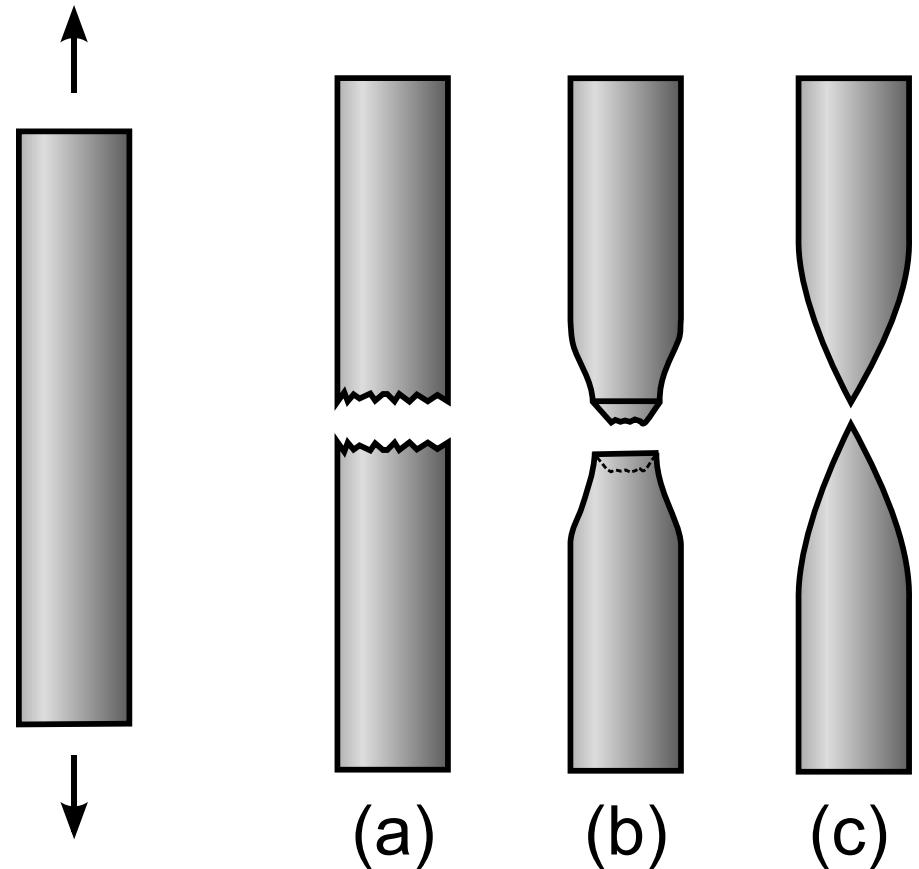
# Phasen- und Gefüge im System-Eisen-Kohlenstoff Mischkristalle





## $\alpha$ -Mischkristall (krz)

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



# Härte / Festigkeit

## Festigkeit

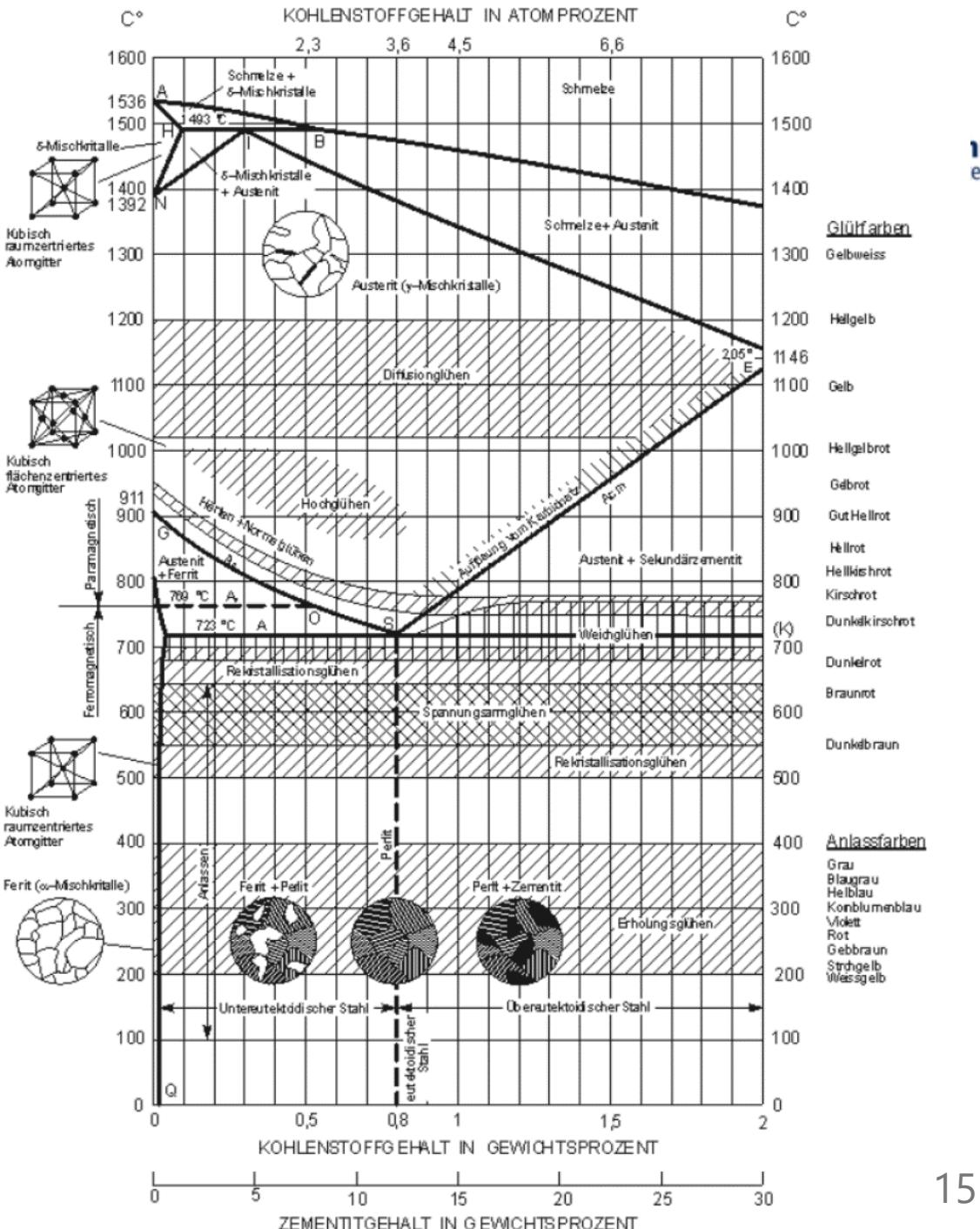
- Maß der maximalen Beanspruchbarkeit bis Versagen
- Kraft pro Querschnittsfläche

## Härte

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

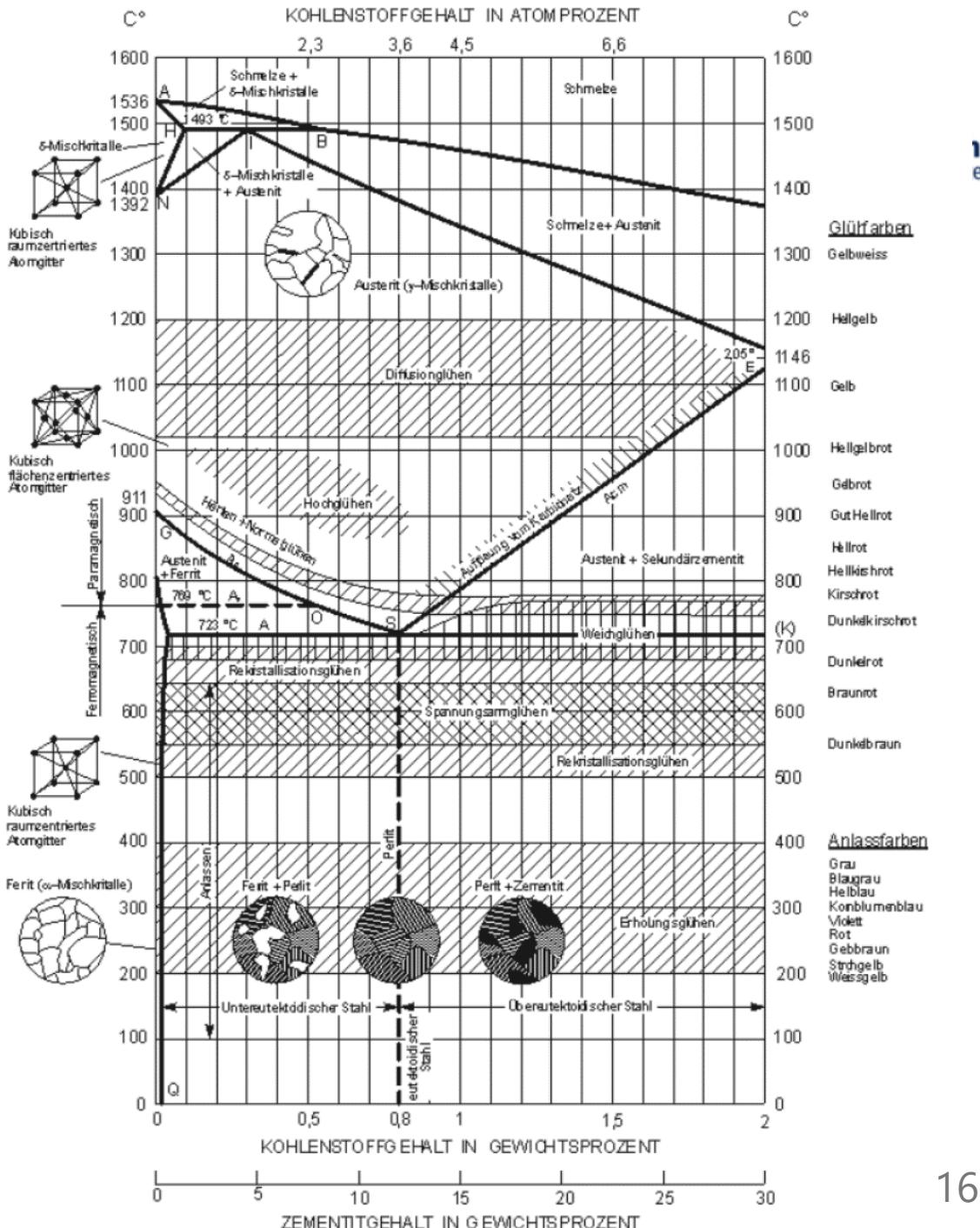
## $\delta$ -Mischkristall (krz)

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

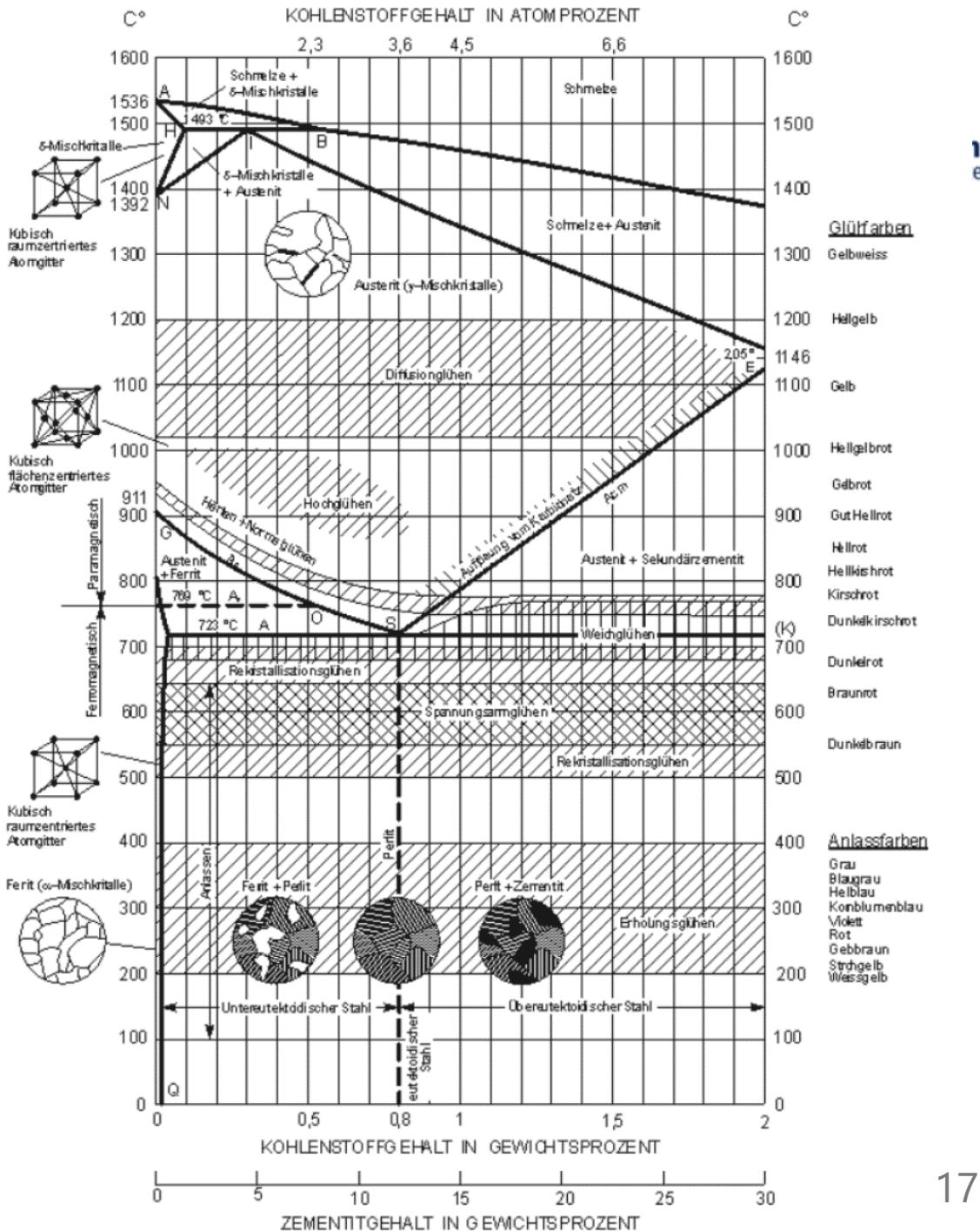


# $\gamma$ -Mischkristall (kfz)

- Gefügebezeichnung Austenit
- scheidet sich oberhalb der G-S-E-Linie aus;
  - durch Legierungszusätze (Ni, Mn) und Abschrecken auch bei Raumtemperatur beständig (austenitische Stähle)

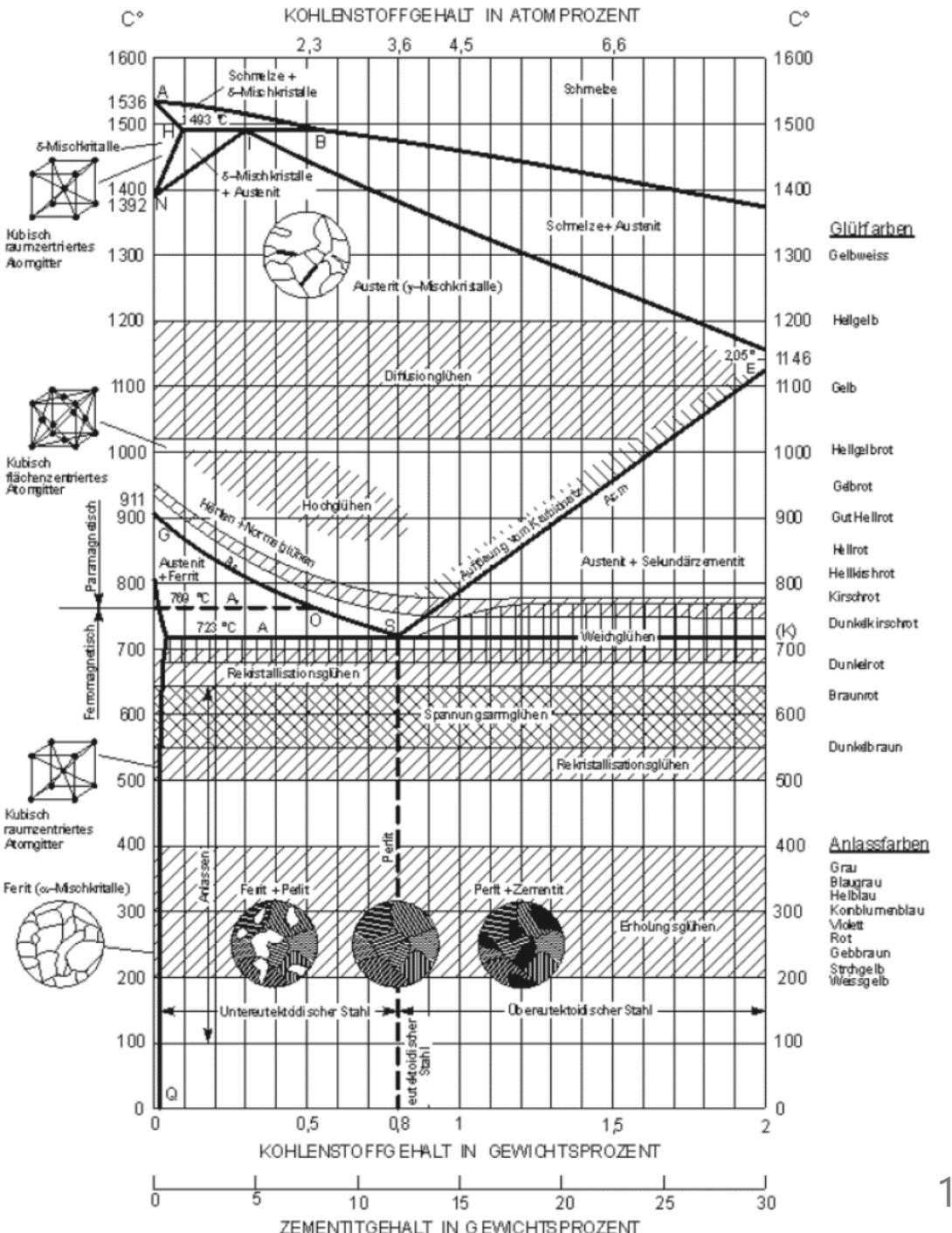


- unmagnetisch, zäh und durch Kaltverfestigung härtbar  
(Mangan-, Nickel-, Chrom-Nickel-Stähle)
- hohe Warmfestigkeit, gute Korrosions- und Zunderbeständigkeit
- Max. C-Löslichkeit: 2.06 %



# Austenit

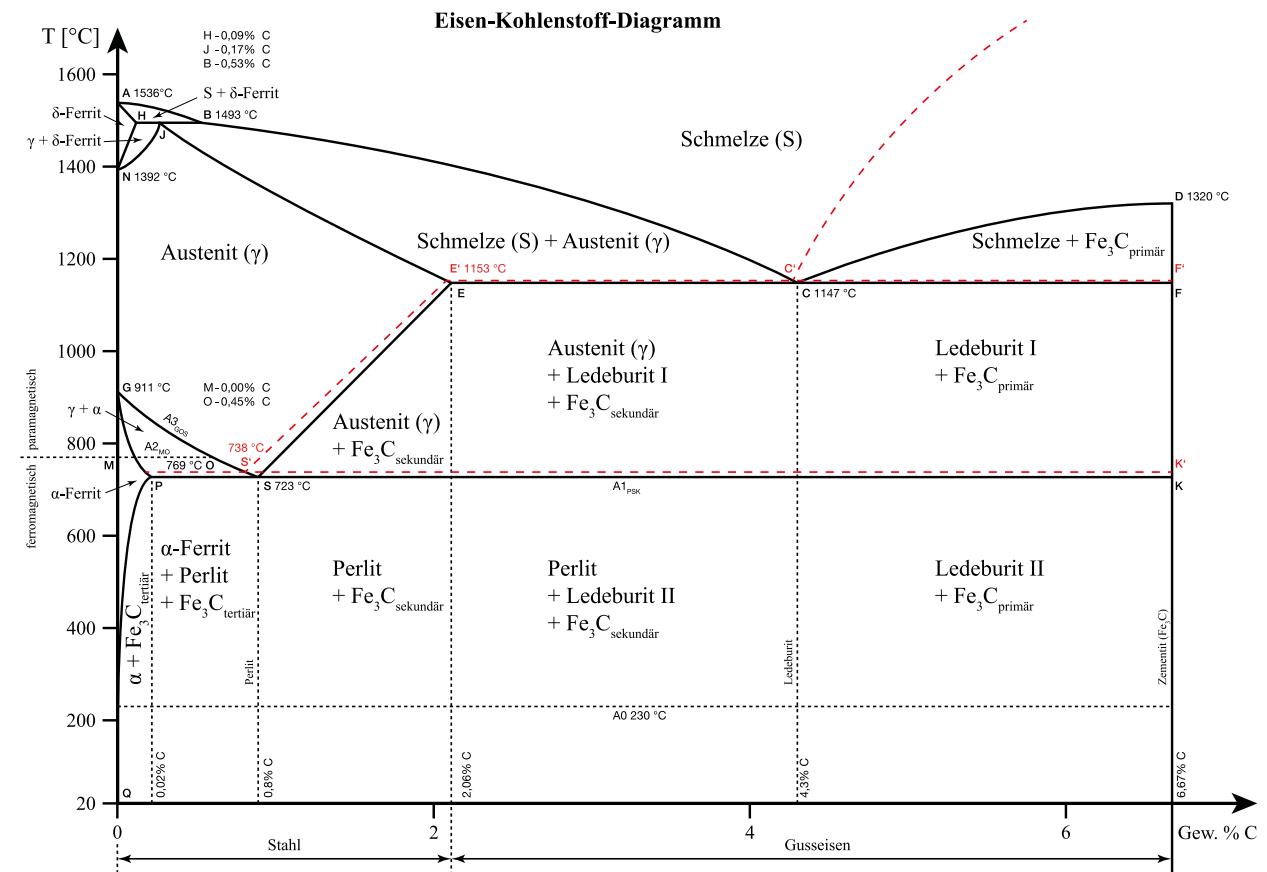
- bezeichnet die kubisch-flächenzentrierte Modifikation (Phase) des reinen Eisens und seiner Mischkristalle
- eine hohe Löslichkeit von Kohlenstoffatomen



# Intermediäre Phase

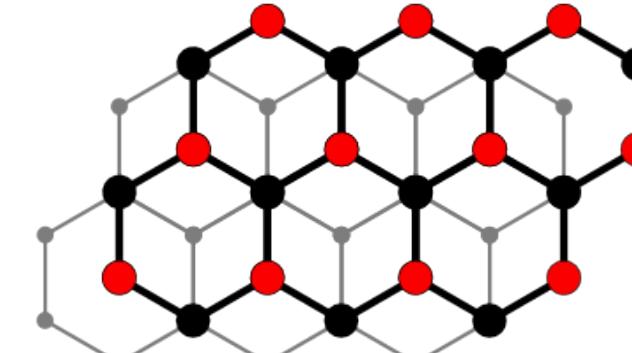
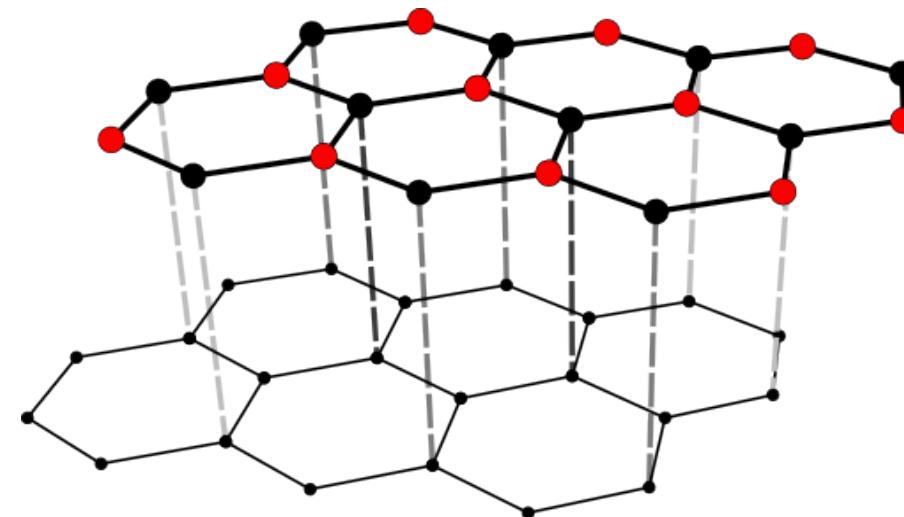
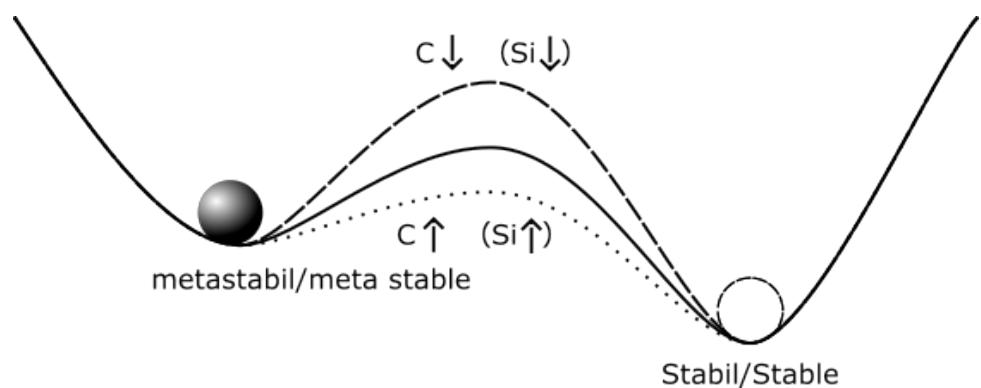
Zementit (Eisencarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ ); 6.67

Masse-% C-Gehalt

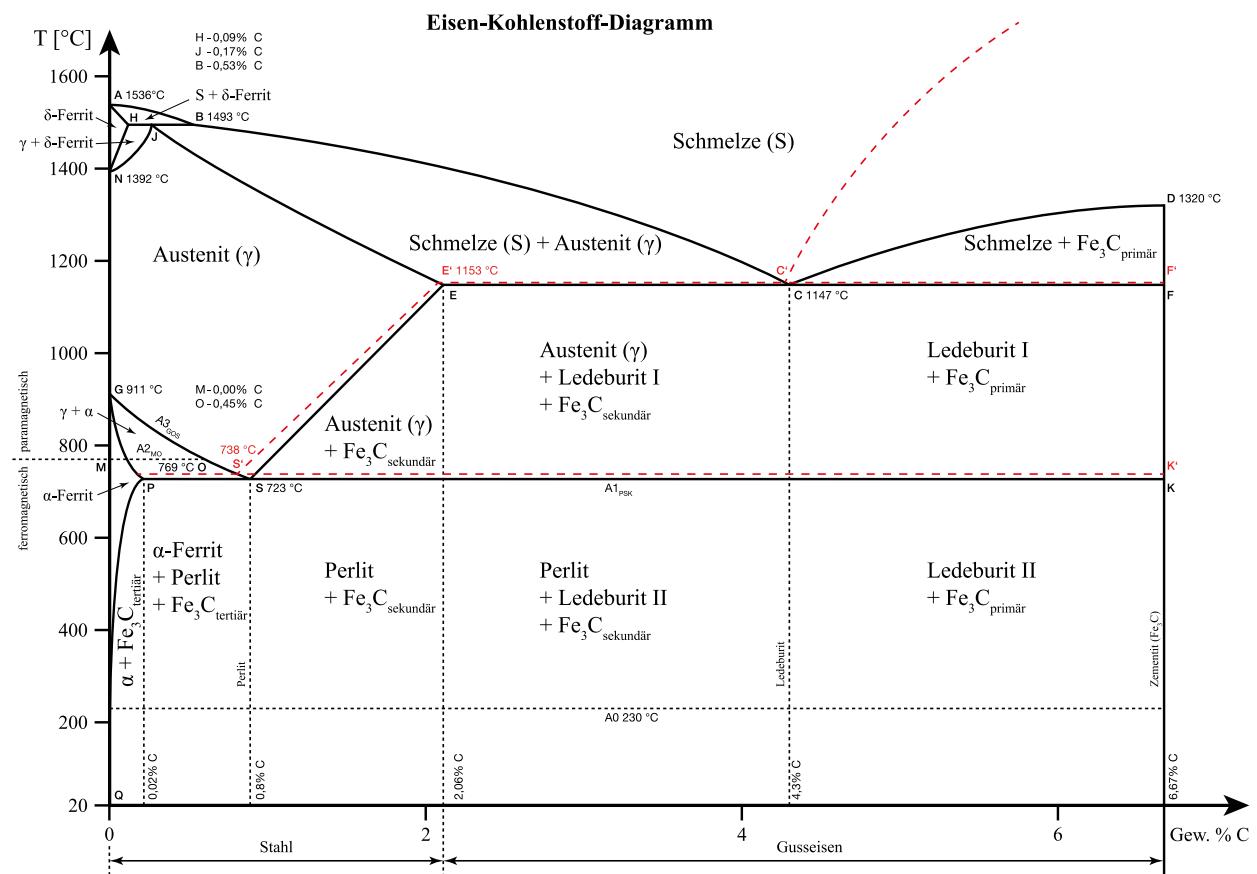


## Metastabile Systeme

- meta-stabil ist  $\text{Fe}_3\text{C}$
- Stabil ist Graphit

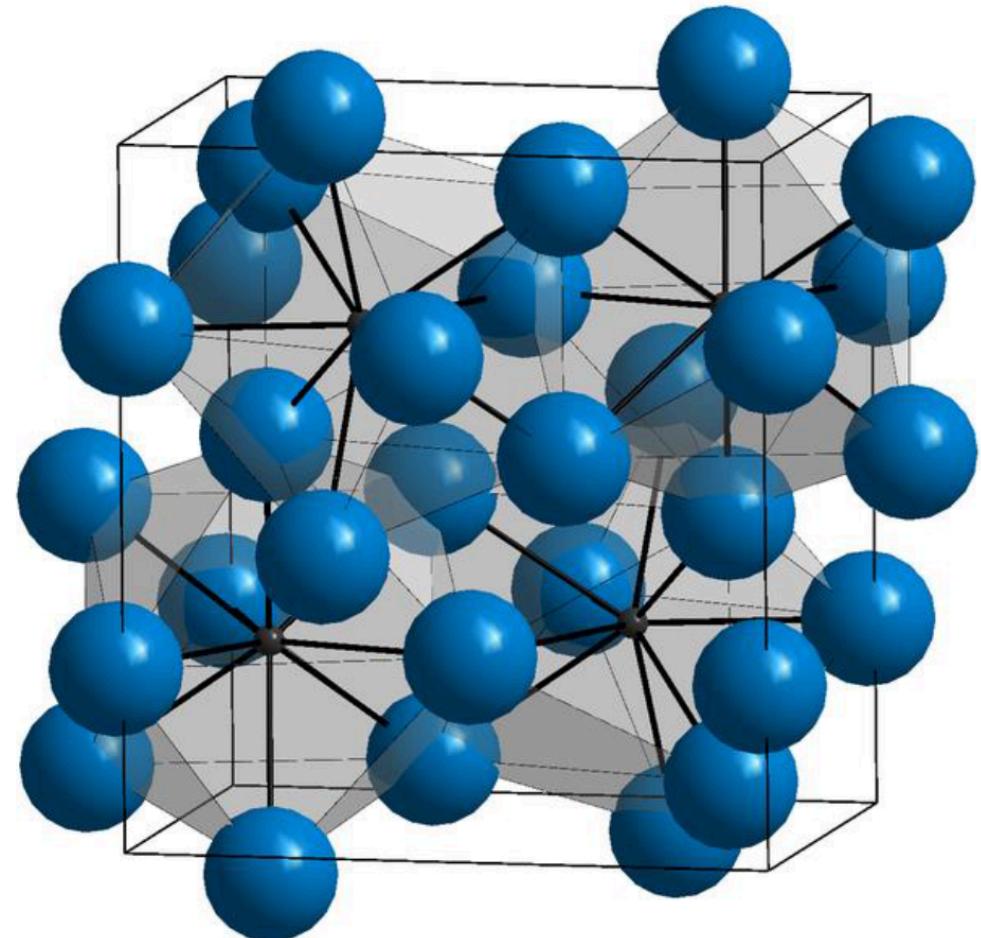


- Primärzementit:  
primäre Kristallisation aus der Schmelze (Linie CD)
- Sekundärzementit:  
Ausscheidung aus dem Austenit (Linie ES)
- Tertiärzementit:  
Ausscheidung aus dem Ferrit (Linie PQ)

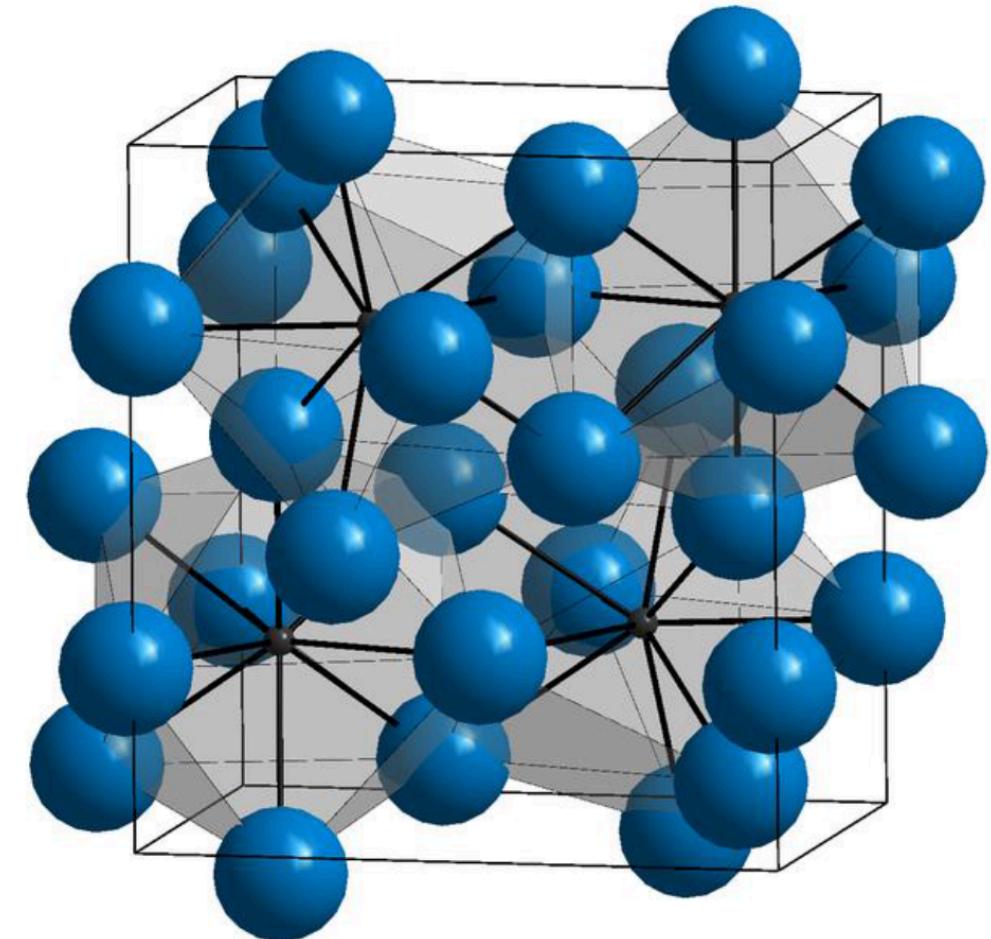


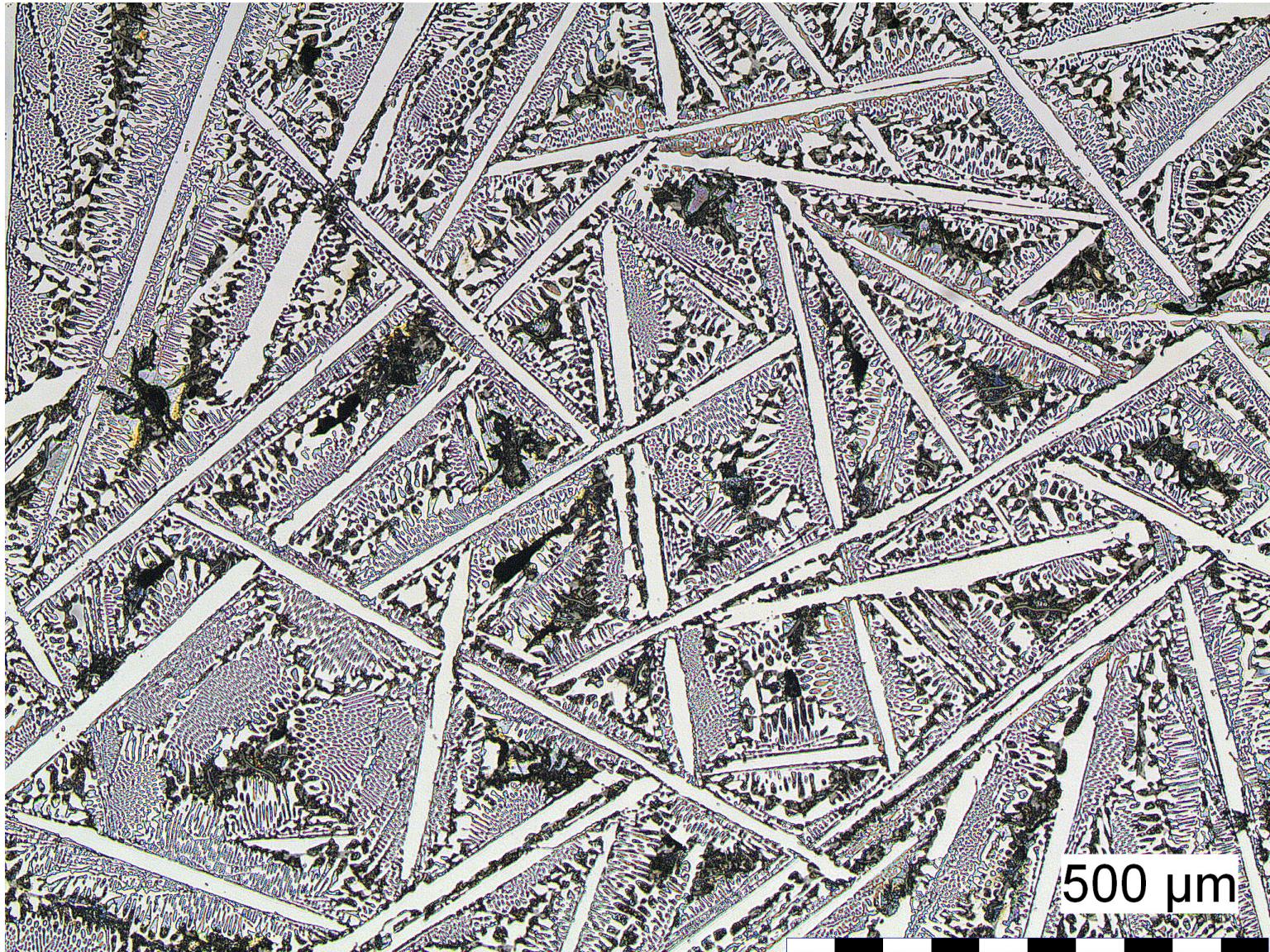
# Kristallstruktur

- orthorhombischen Elementarzelle
  - zwölf Eisen- und vier Kohlenstoffatome
  - die Kohlenstoffatome sind relativ unregelmäßig von acht Eisenatomen umgeben



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

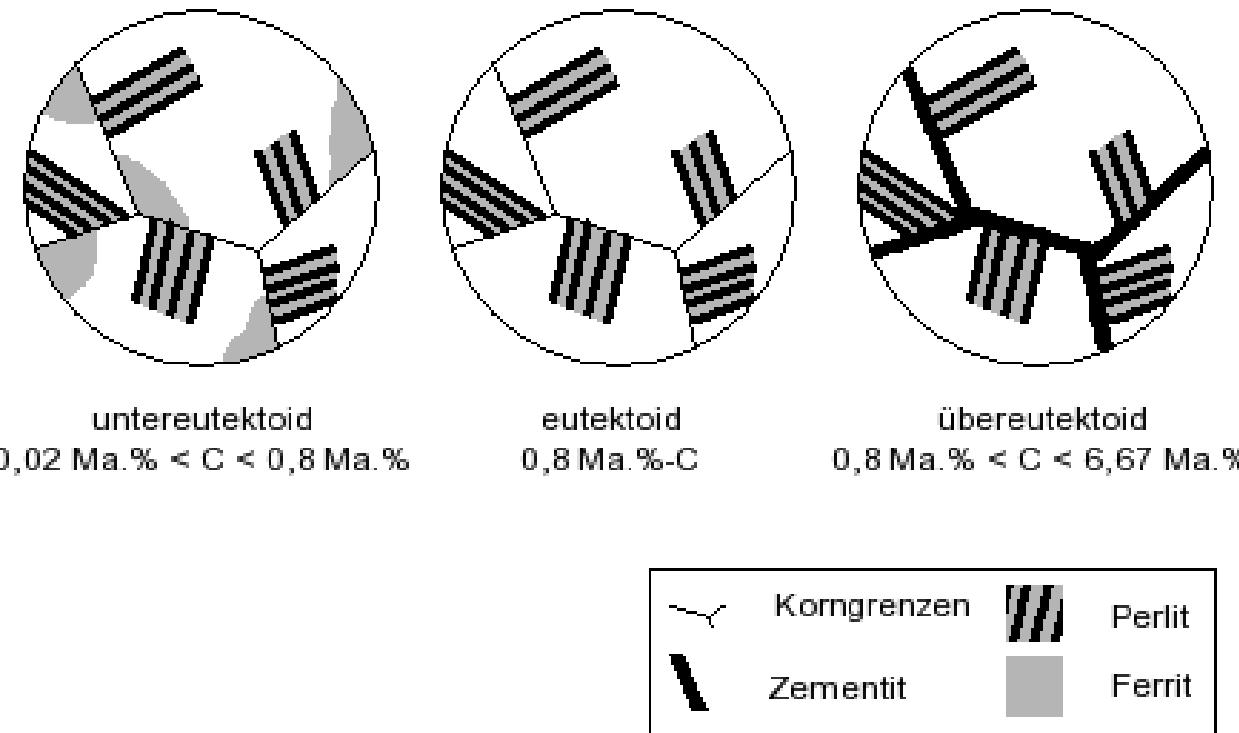




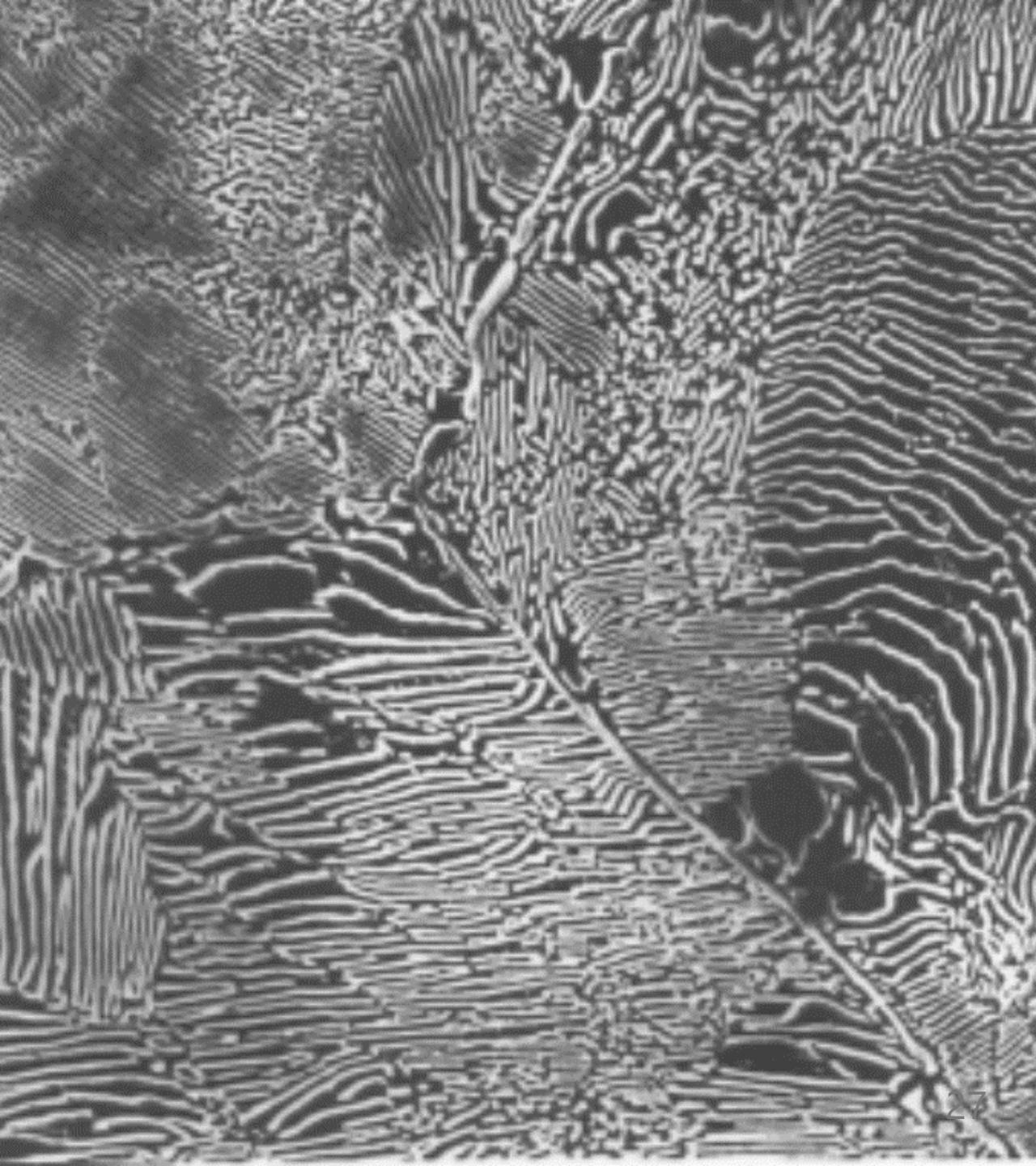
# Phasengemische/Gemische von Mischkristallen

# Perlit

- Gefüge aus Zementit und Ferrit (= Phasengemisch)
- entsteht durch den "eutektoiden" Zerfall des Austenits ( $\gamma$ -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  $\alpha$ -Mk und  $Fe_3C$ -  
Kristallen) .
- häufig spricht man von einer  
"Perlitstufe", die - gemessen am  
Lamellenabstand - in Perlit, fein-  
streifigen und feinststreifigen  
Perlit unterteilt wird.

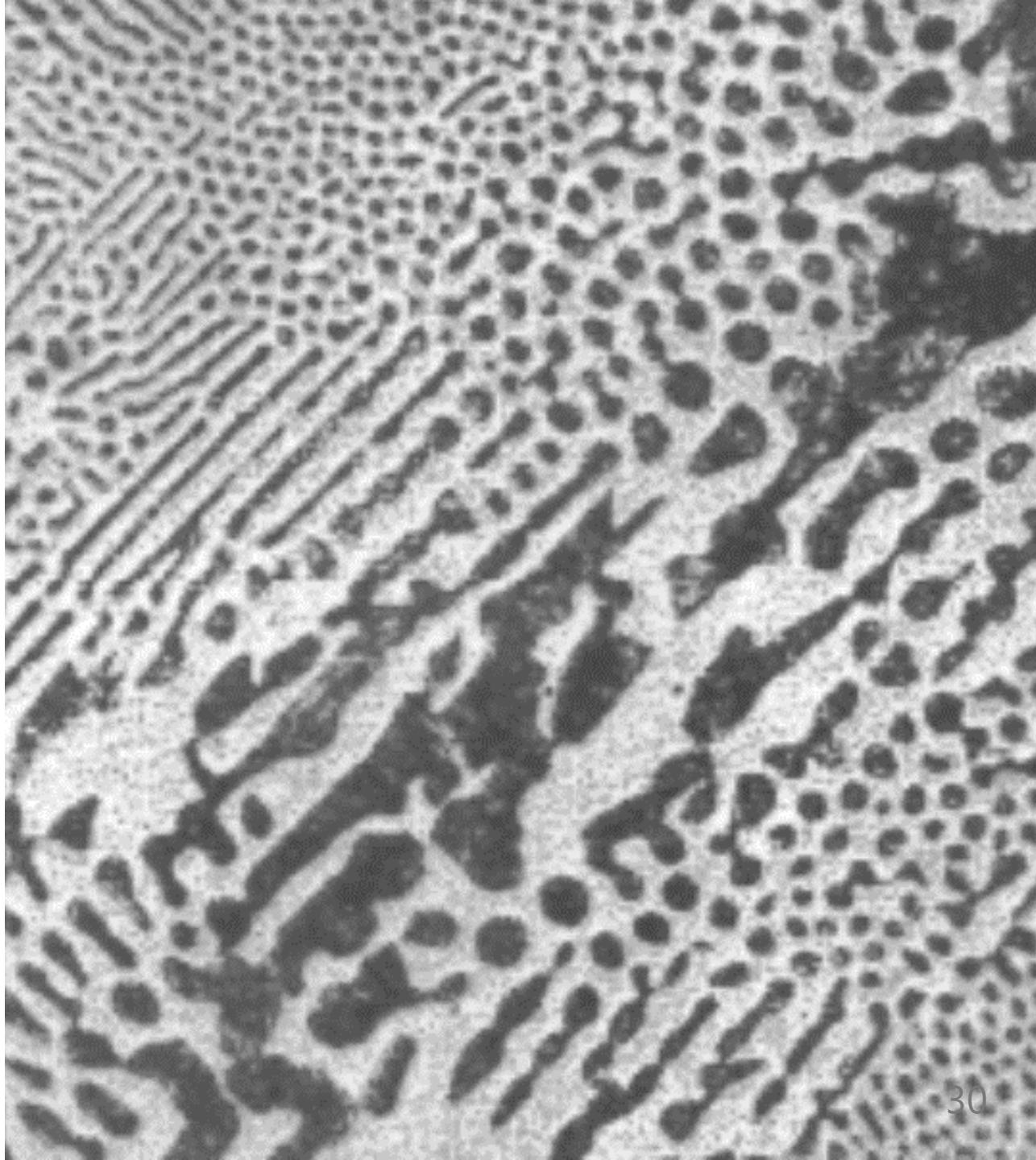


## Ledeburit

- 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  $\text{Fe}_3\text{C}$ -Kristalliten und Perlitbereichen im Auflichtmikroskop als charakteristische Pantherfellstruktur sichtbar.



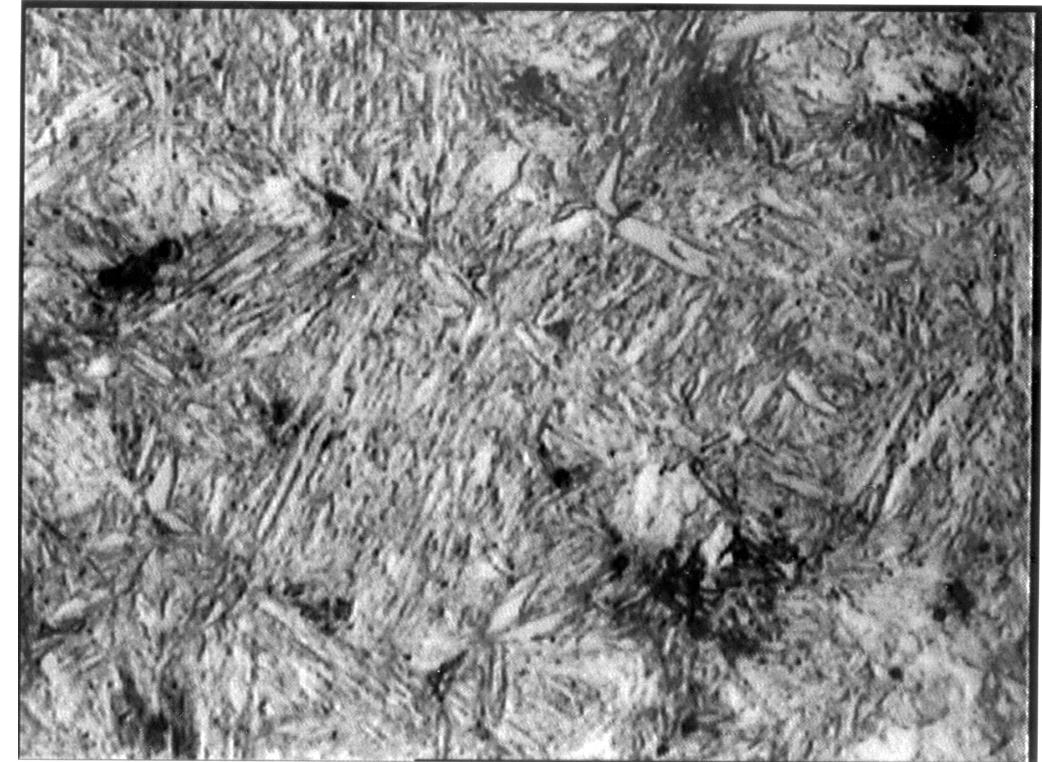
# Phasen- und Gefüge im Ungleichgewichtszustand

- Gleichgewichtszustände sind 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

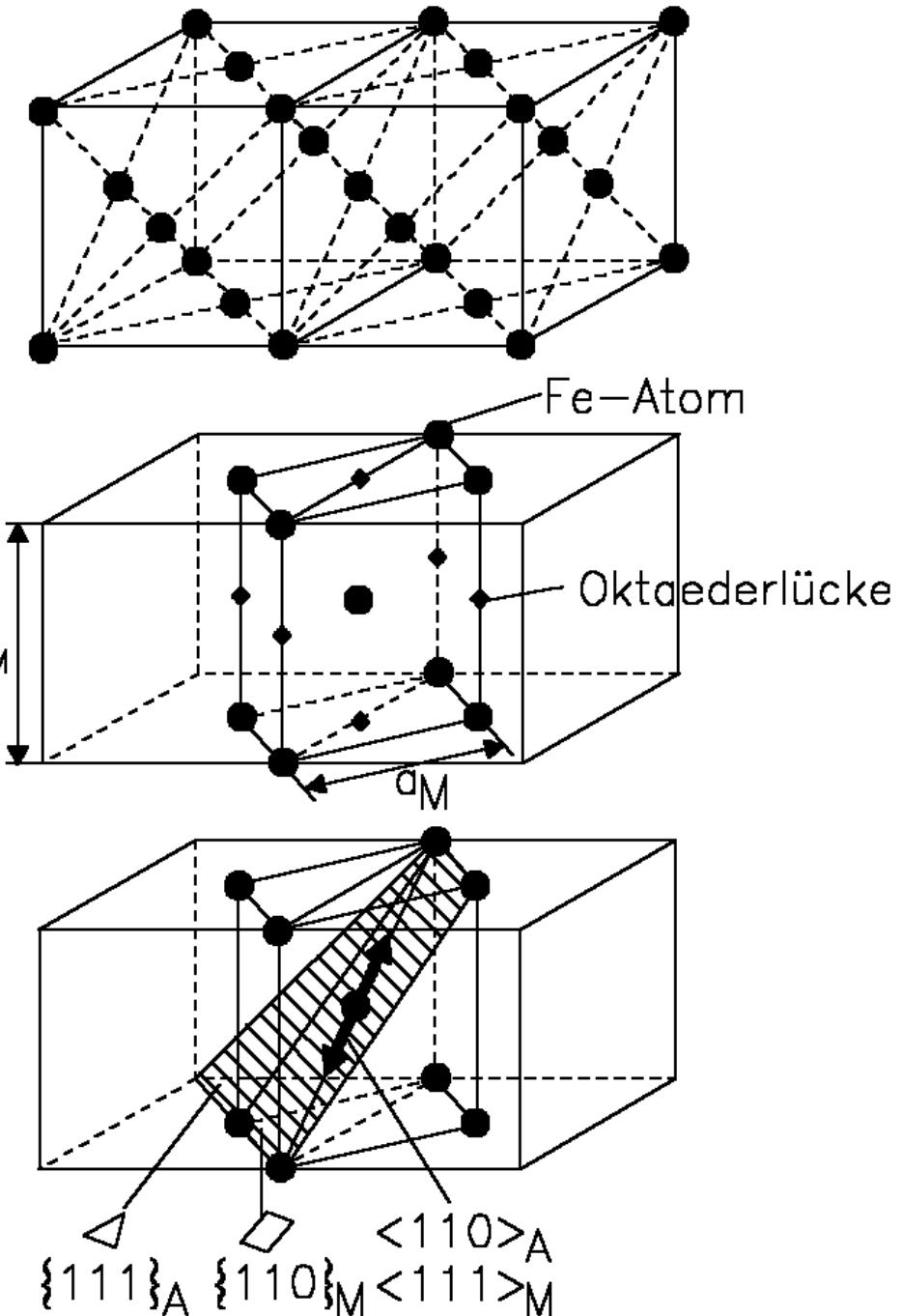
**Tauchen nicht im Phasendiagramm auf!**

# Martensit

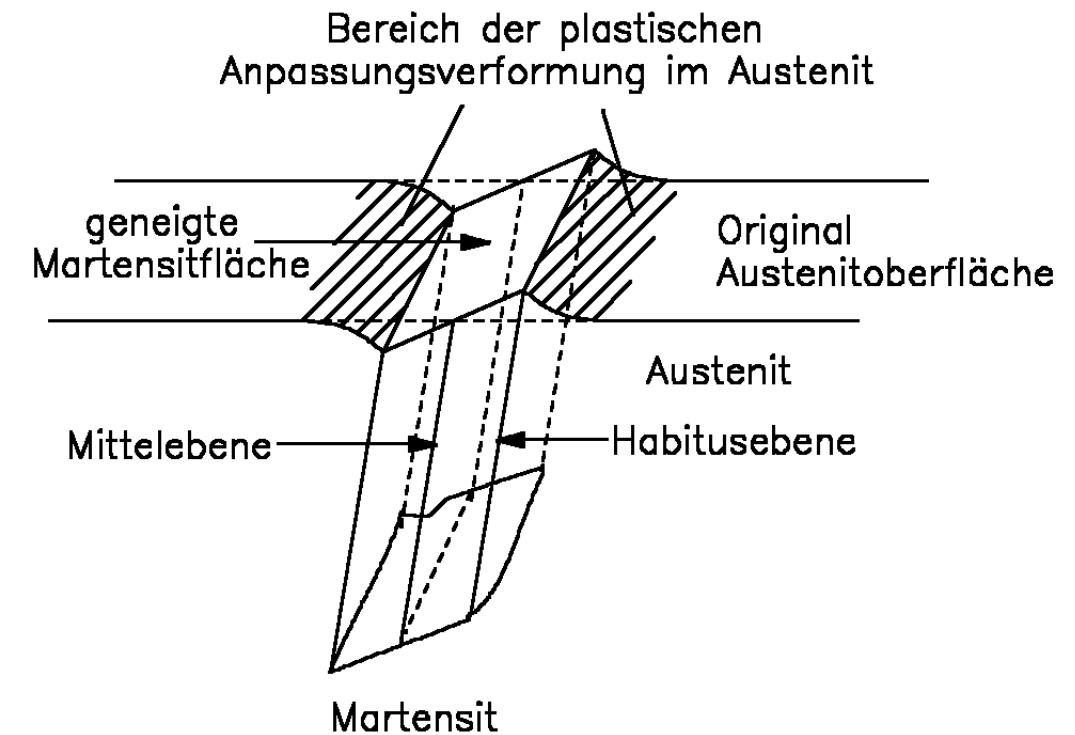
- raumzentriertes Gitter tetragonal verzerrt („verspanntes Ferritgitter“)
- meist feinnadeliges, sehr hartes und sprödes Gefüge
- der im krz-Gitter des  $\alpha$ -Fe zwangsgelöste Kohlenstoff verzerrt das Gitter und weitet es tetragonal auf („diffusionsloses Umklappen“).



- wird bei sehr schneller Abkühlung gebildet
- Kohlenstoffatome haben keine Zeit für Diffusion und können keine  $\text{Fe}_3\text{C}$  bilden

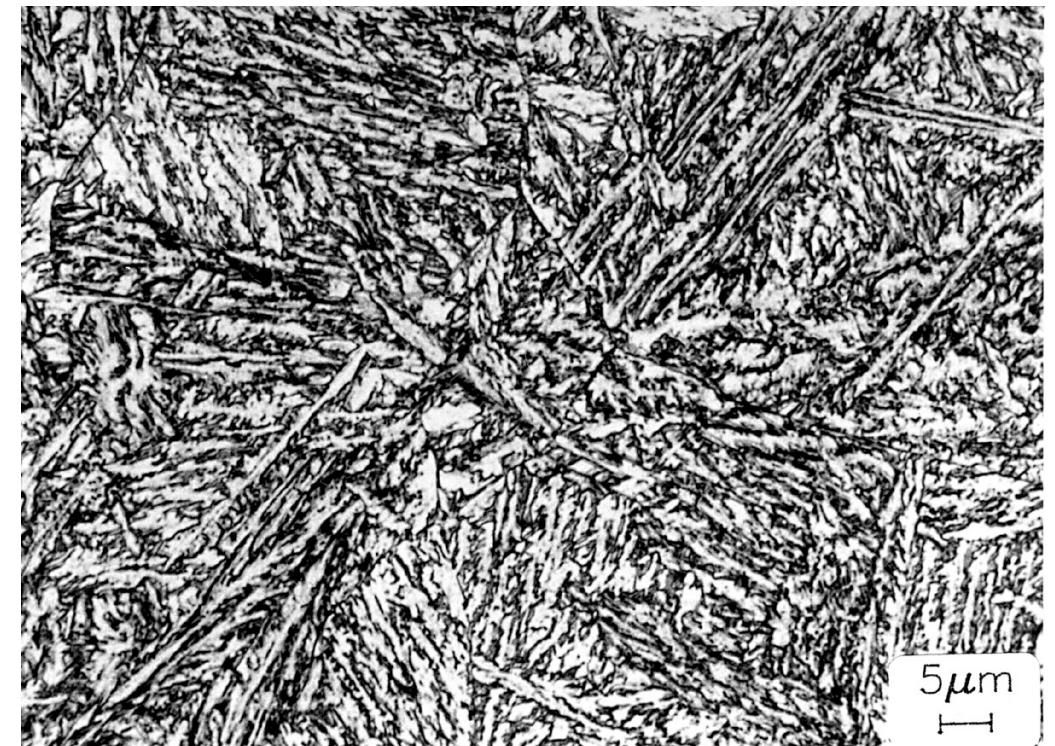


## Formgedächtnislegierungen



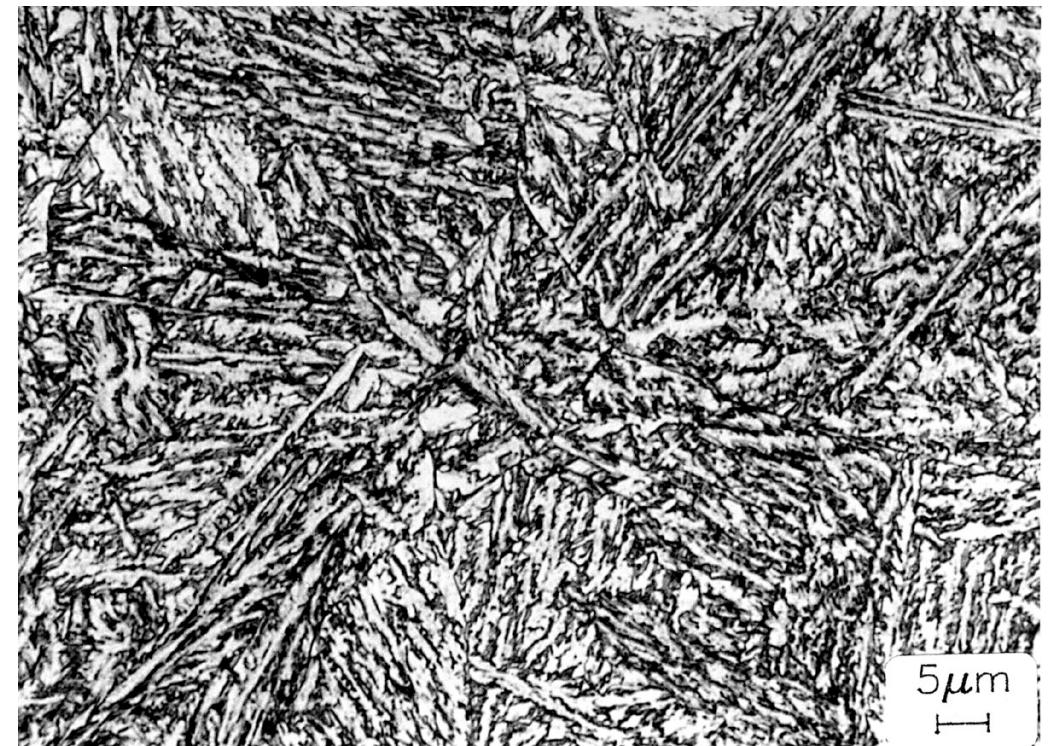
# Bainit

- 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)

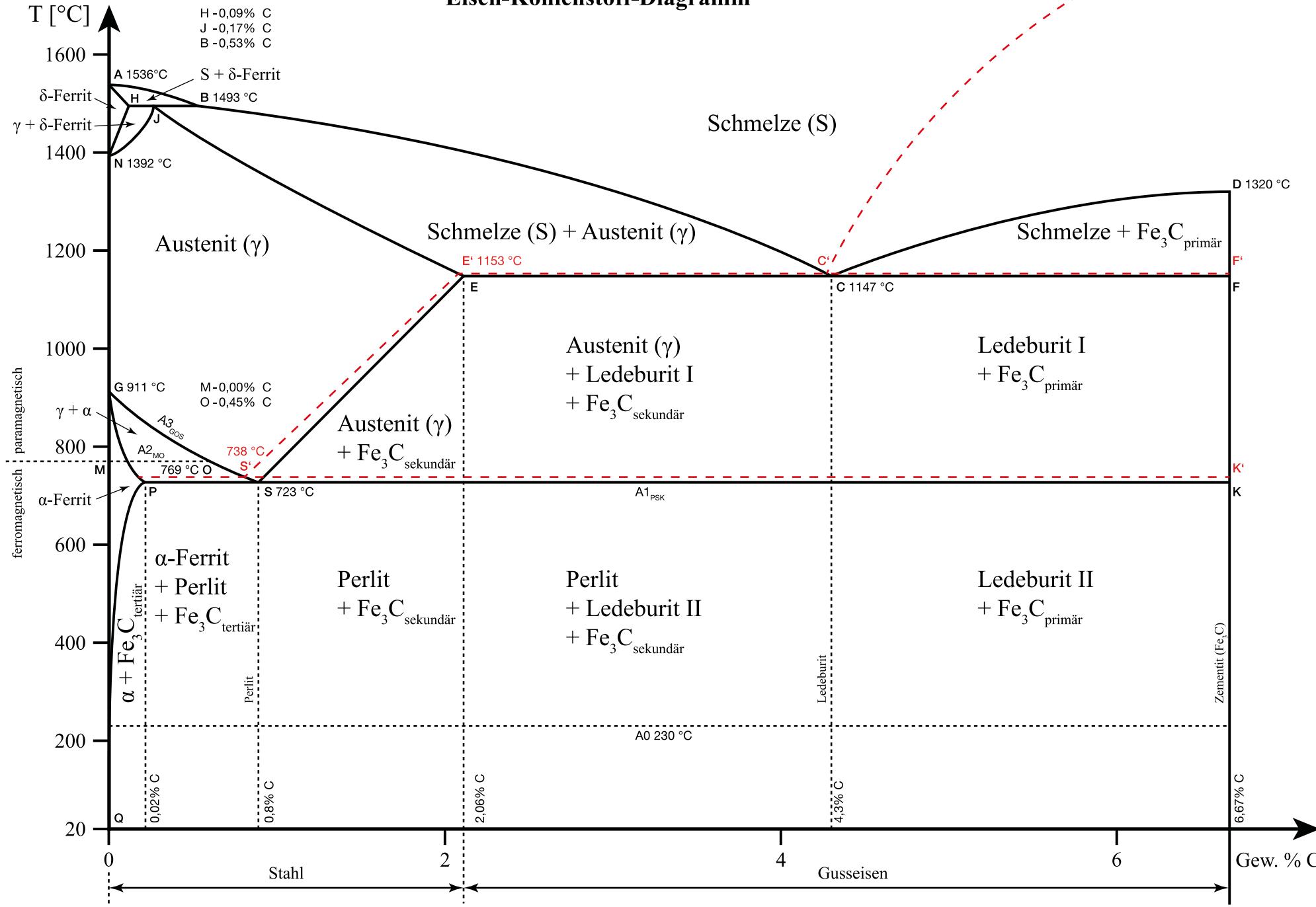


# Bainit

- 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.

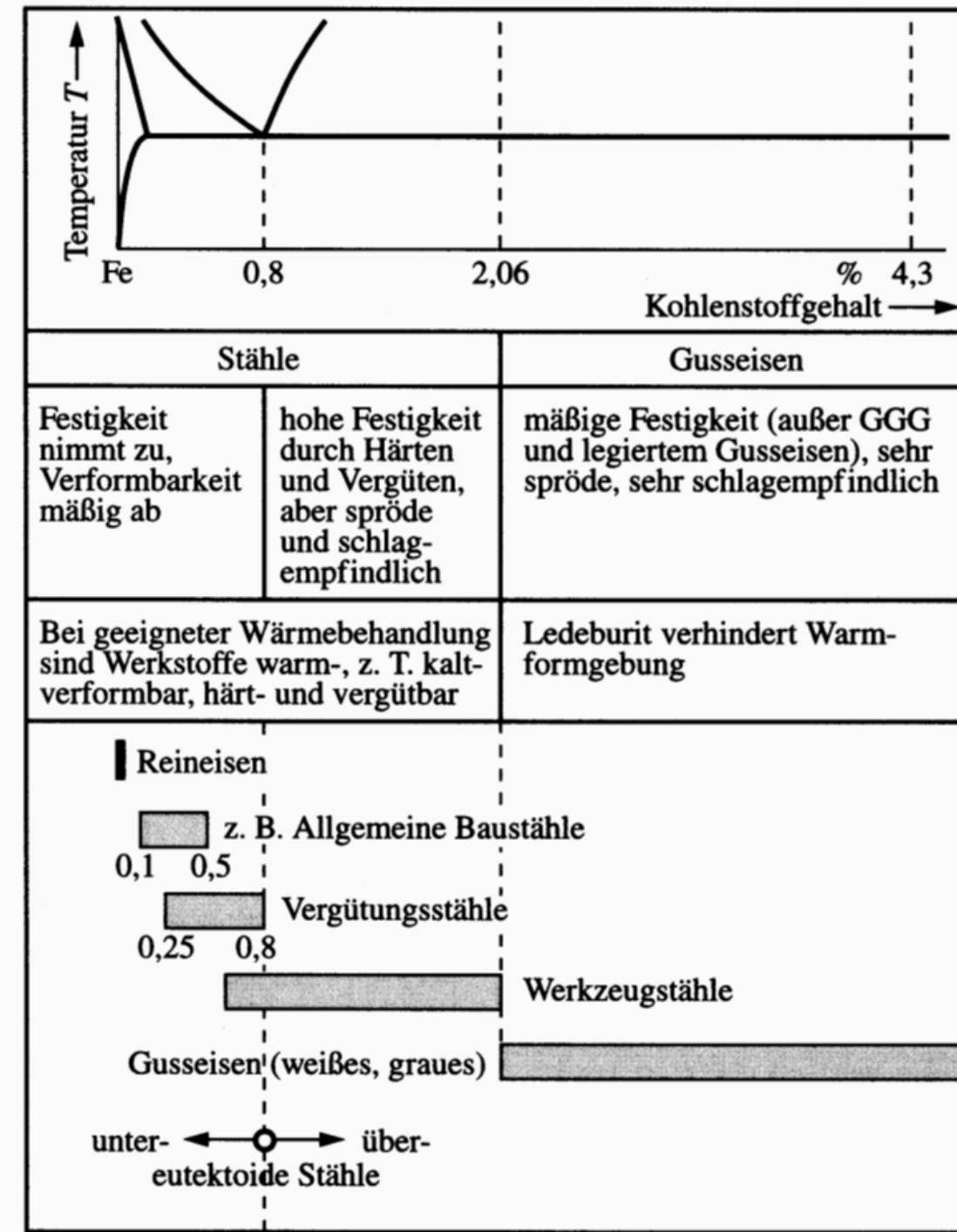


# Eisen-Kohlenstoff-Diagramm



# 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



# Stahl

## Normen

- 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

# Gusseisen

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 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) vorkommt.  
*Die Bruchflächen sind weiß*

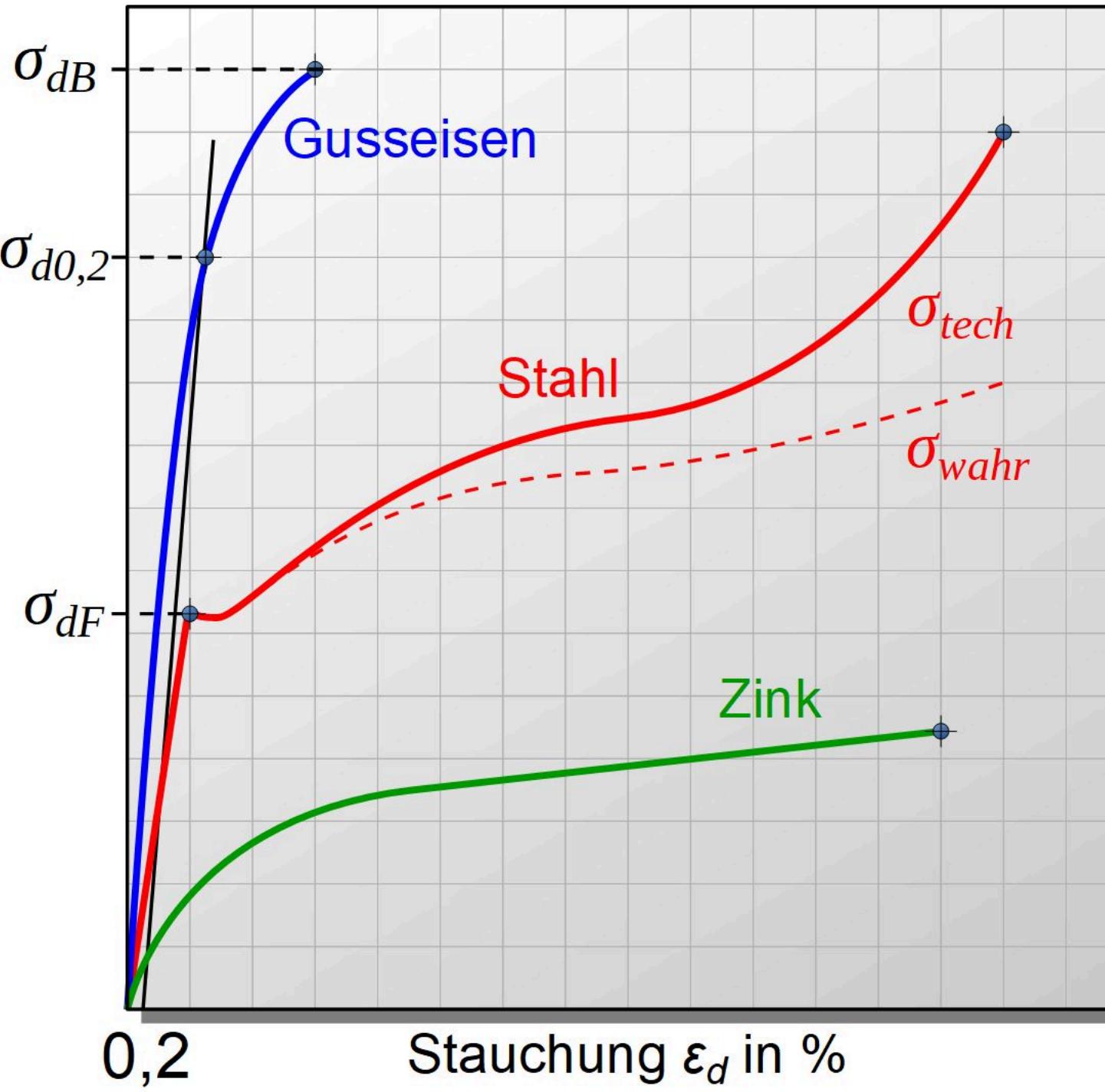
# Vergleich Gusseisen und Stahl

## 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

Druckspannung  $\sigma_d$  in N/mm<sup>2</sup>



# 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

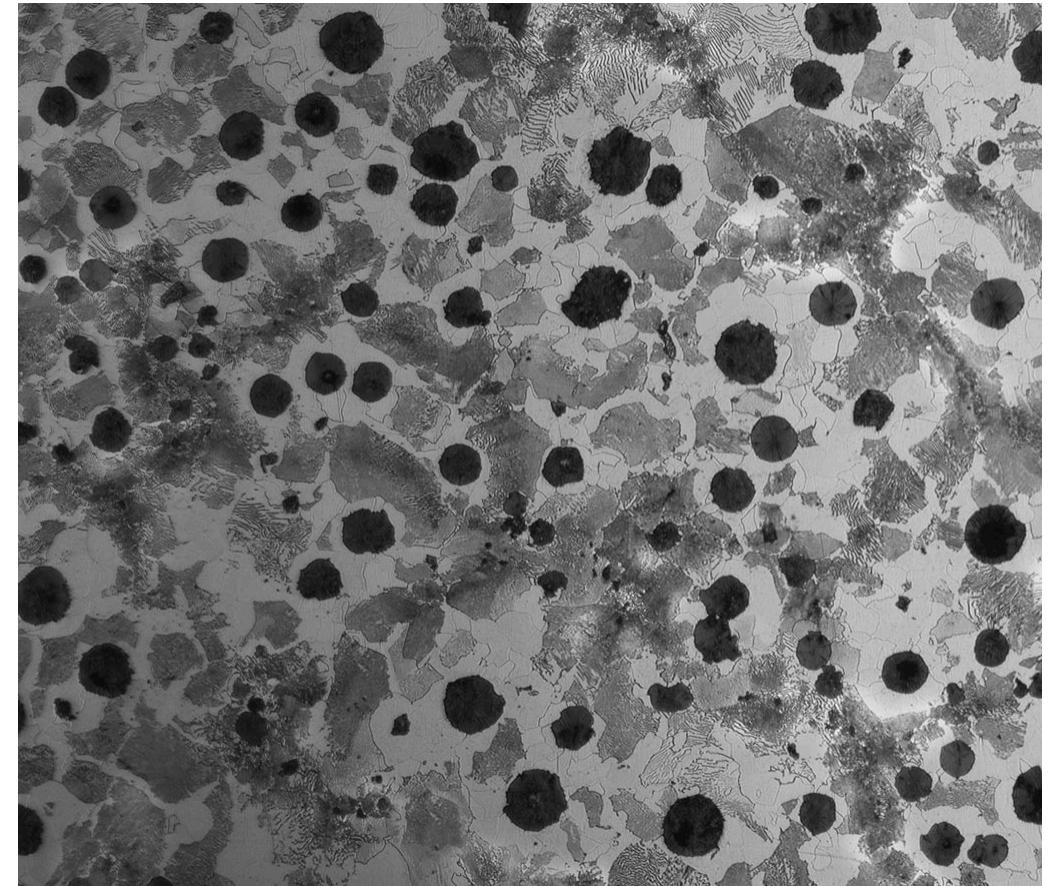


- spröder Werkstoff
- gute Wärmeleitfähigkeit
- vorteilhafte Selbstschmiereigenschaften
- wenn durch Bearbeitung die Lamellen angeschnitten und der Graphit selbst oder an dessen Stelle andere Schmiermittel in den Hohlräumen „bevorratet“ werden können.



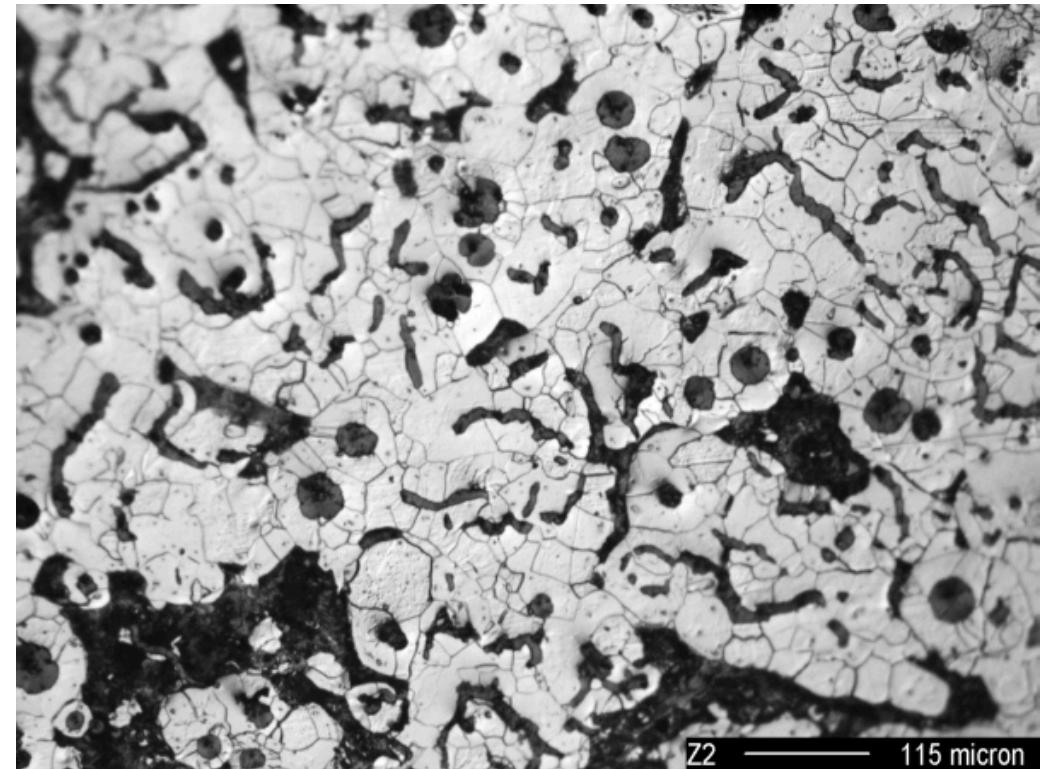
## Gusseisen mit Kugelgraphit

- 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)

## Stahl vs. Gusseisen

- Massenanteil von Kohlenstoff weniger als 2.06 %
- hohe Zugfestigkeit
- teurer als Gusseisen
- Duktiler und zäher als Gusseisen
- Schweißbar
- höhere Schmelzpunkt als Gusseisen

# Stahl vs. Gusseisen

- Massenanteil von Kohlenstoff 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