

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

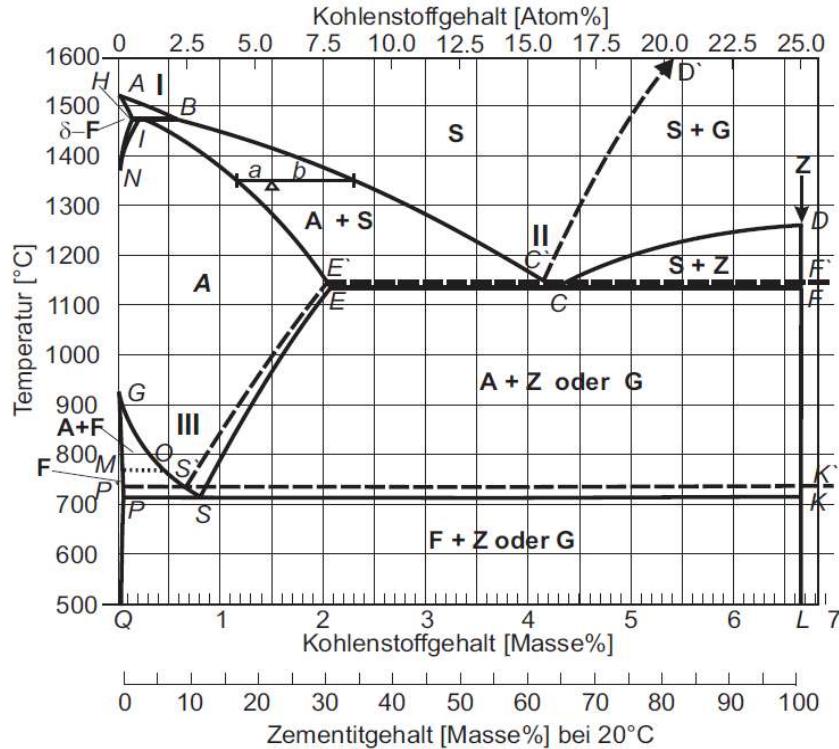
ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Bainit: Theoretische Grundlagen

Struktur

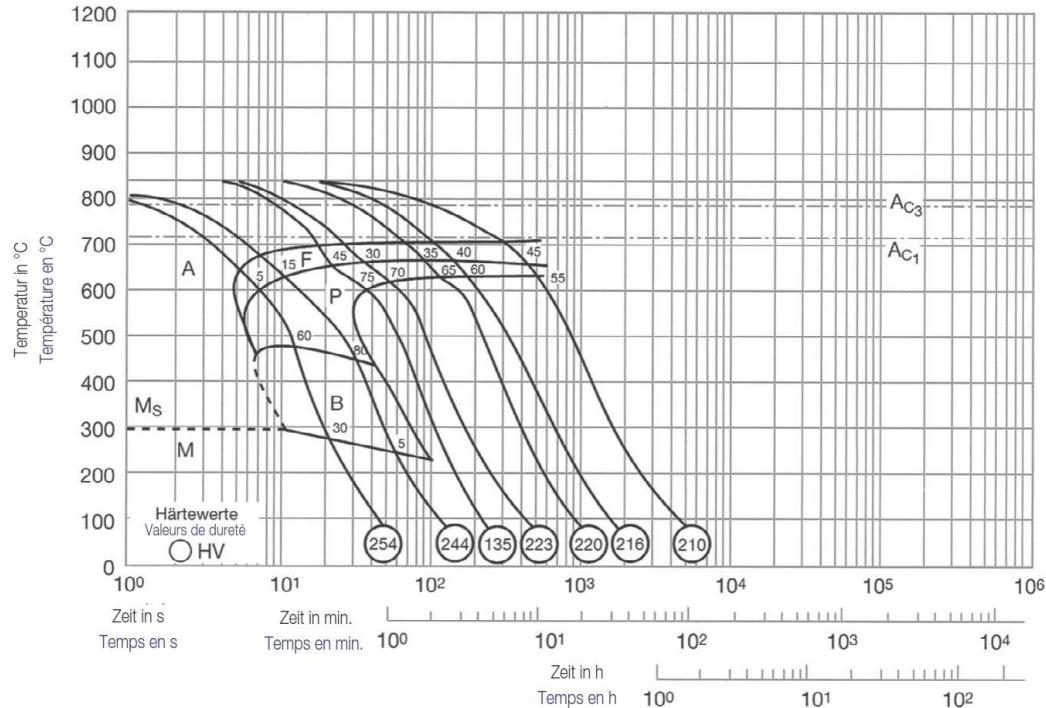
- Einleitung: Das binäre System Fe-C
- Historischer Hintergrund: Entdeckung von Bainit
- Fragestellung: Was ist „Bainit“ ?
- Gefüge und Eigenschaften
- Unterschied zu anderen Ferrit-Arten / -morphologien
- Die bainitische Umwandlung
- Thermodynamik
- Zusammenfassung & weiterführende Literatur

Einleitung: Fe-C // Fe-Fe₃C



Quelle: Berns/Theisen, Eisenwerkstoffe

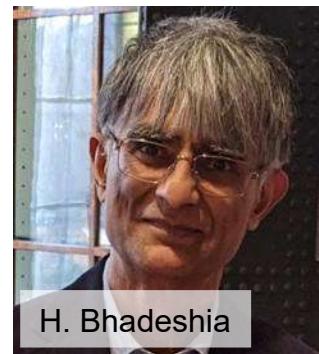
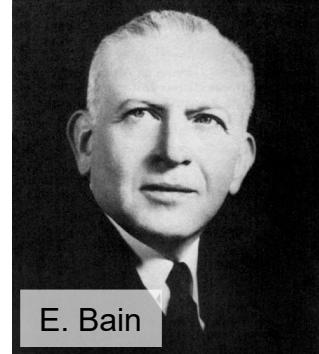
Einleitung: ZTU-Schaubild C45



Quelle: Datenblatt C45E, ThyssenKrupp

Einleitung: Entdeckung von Bainit

- Maßgebliche Arbeiten in den 1920er und 1930er Jahren
- Zahlreiche Arbeiten von Edgar C. Bain (*US Steel Corp., Pittsburgh*)
- Untersuchung mittels Metallographie und Dilatometrie => ZTU
- 1930: Davenport & Bain entdecken neue Struktur bei der isothermen Umwandlung von Fe-C-Austenit oberhalb M_s
(=> „*acicular, dark-etching aggregate*“)
- Bezeichnung als „Bainite“ erstmalig im Jahr 1934
- Beobachtung: Teils höhere Zähigkeit bei gleicher Härte im Vergleich zum angelassenen Martensit des gleichen Stahls ! Das ist bis heute die primäre technische Motivation, Stähle zu bainitisieren.
- Wesentliche weiterführende Arbeiten in der 1980er und 1990er Jahren durch H. Bhadeshia (*University of Cambridge*)

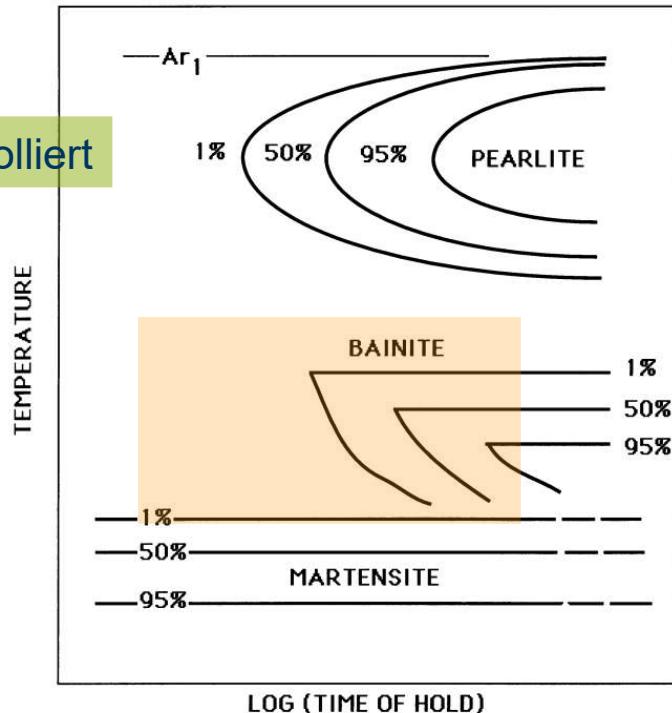


Fragestellung: „Was ist Bainit?“

diffusionskontrolliert

diffusionslos
(C-Diffusion
nachgelagert)

diffusionslos



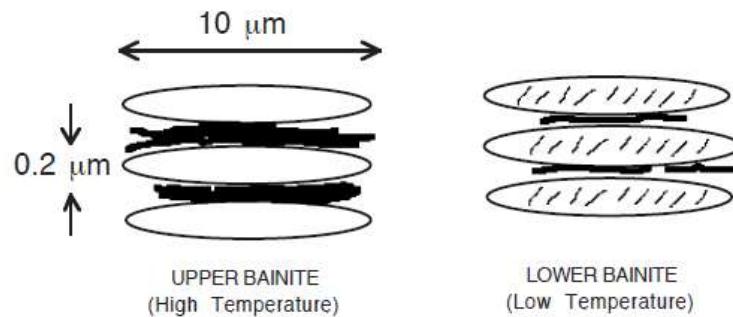
Auftreten C-förmiger Umwandlungskurven bei einfachen Kohlenstoffstählen:

- **Obere Kurve(n)**
(diffusionskontrolliert): Ferrit / Perlit
- **Unter Kurve(n)**
(diffusionslos, auch bei Widmannstätten-Ferrit
nur C-Diffusion):
Bainite und/oder Widmannstätten Ferrit
- Definition einer Bainit-Start-Temperatur (B_s)
physikalisch und technisch richtig, B_f wird
jedoch nie erreicht.

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

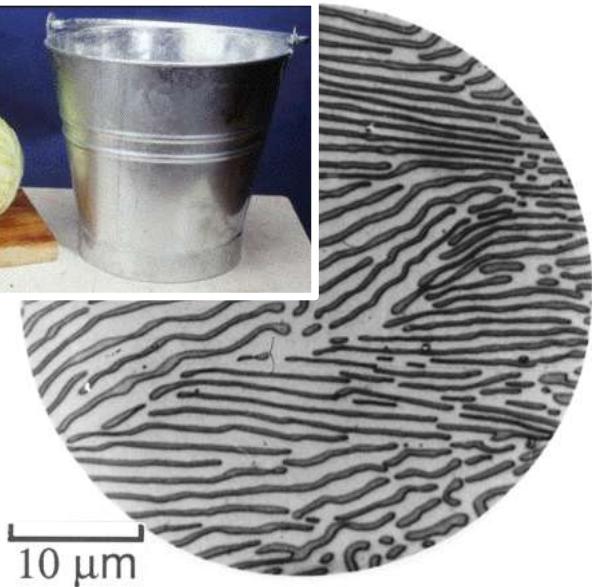
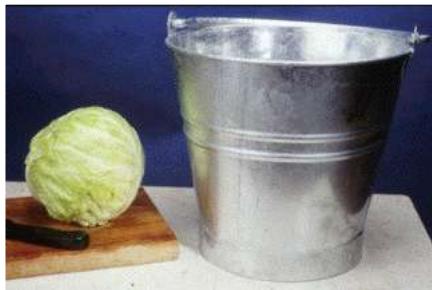
Fragestellung: „Was ist Bainit?“

- Bainit ist, im Gegensatz zu Perlit, eine nicht-lamellares Gemenge von Ferrit und ggf. Karbiden.
- Karbide sind nicht essentiell – sie können sich in einer sekundären Reaktion bilden.
- Die Ferrit-Platten haben im Gefügeschliff eine typische Länge von $10\mu\text{m}$ und eine Breite von $0,2\mu\text{m}$ und sind deshalb lichtmikroskopisch nicht einzeln sichtbar.
- Grundsätzlich unterschieden wird „oberer“ und „unterer“ Bainit.
- Kurdjumov-Sachs-Orientierung (KS) zwischen Ferrit und umgebendem Austenit im oberen Bainit ($\{111\}\gamma \parallel \{110\}\alpha$ oder $\{1-1-0\}\gamma \parallel \{1-11\}\alpha$)

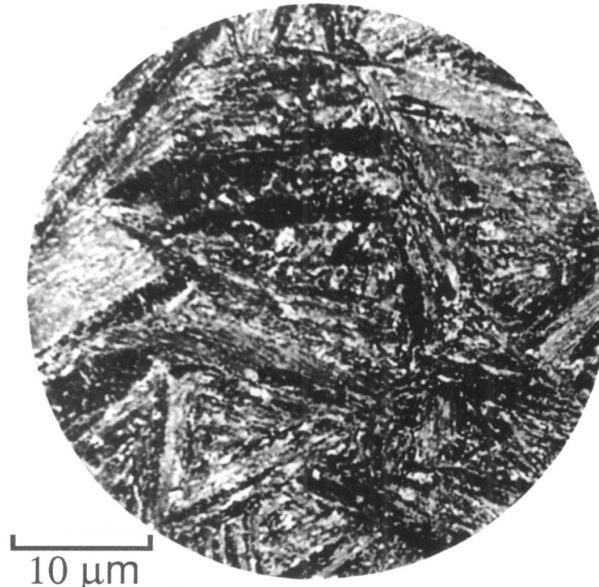


Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Gefüge (eutektoider Stahl)



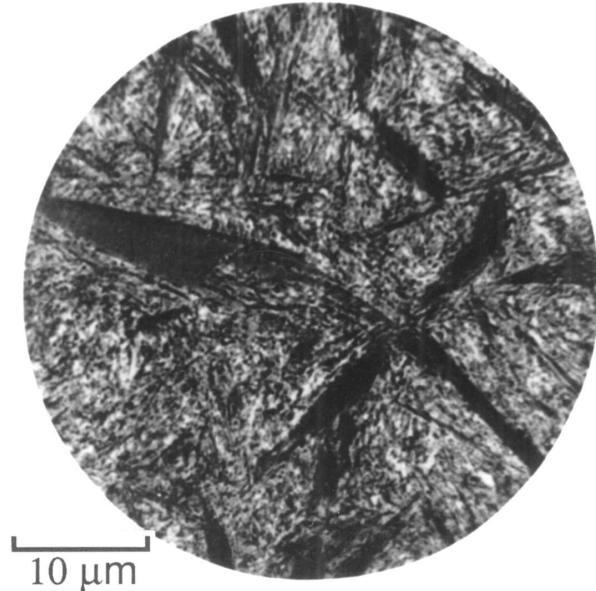
Perlit, isotherm 720°C
Ferrit und Zementit in Perlit wachsen
– im Unterschied zu Bainit – gekoppelt!



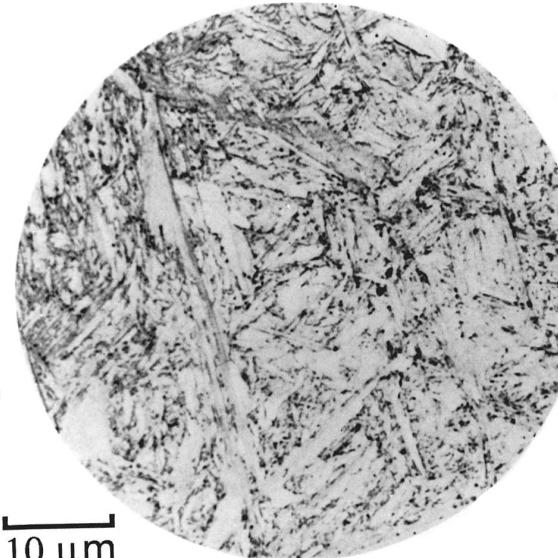
Bainit, isotherm 290°C

Quelle: Bain, The Alloying Elements in Steel

Gefüge (eutektoider Stahl)



Bainit, isotherm 180°C



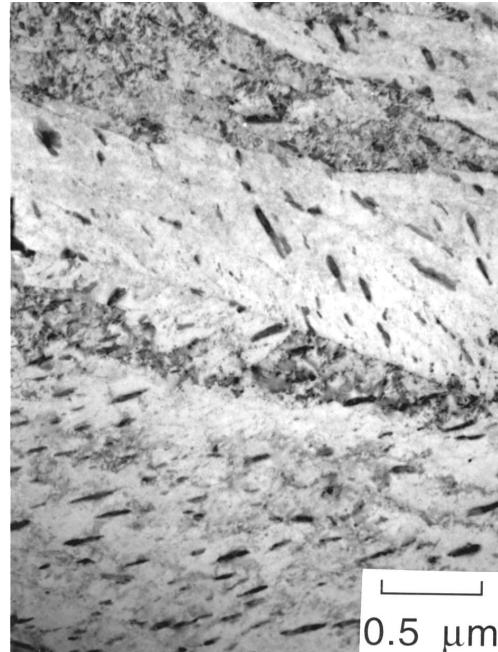
Martensit

Quelle: Bain, The Alloying Elements in Steel

Gefüge (Fe-0,3C-4Cr / $T_{iso}=395\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Lichtmikroskop
dunkel: Bainit „sheaves“; hell: Martensit



„sub-units“ im TEM

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

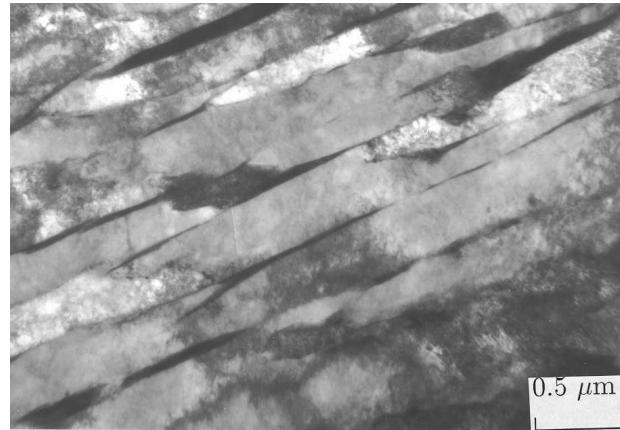
RUB

Eigenschaften

- Deutliche Abhängigkeit der Eigenschaften des Bainit von der Umwandlungstemperatur
- Oberer Bainit: geringere Zähigkeit aufgrund vergleichsweise grober Karbide
- Unterer Bainit: Kombination aus hoher Festigkeit und Zähigkeit => feinere oder überhaupt keine Karbide (dann nur bainitischer Ferrit + Restaustenit / Martensit)

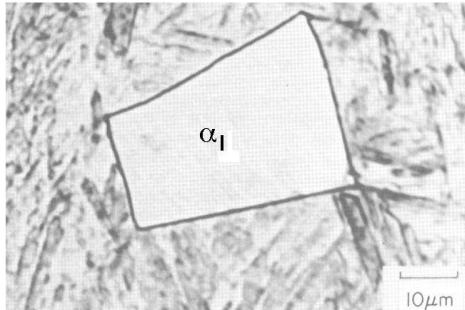


Unterer Bainit mit Karbidausscheidungen in „sub-unit“ mit bevorzugter Orientierung

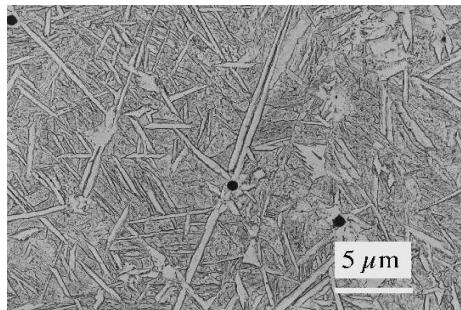


Oberer Bainit ohne Karbidausscheidungen in „sub-unit“, aber Zementit in den Zwischenräumen.

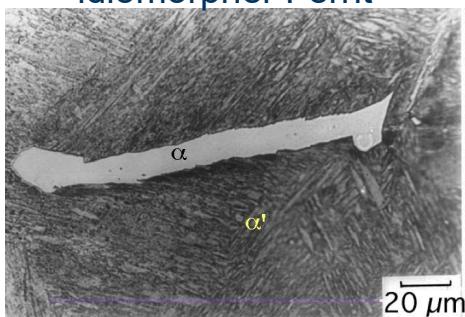
Vergleich unterschiedlicher Ferrit-Arten (Morphologie)



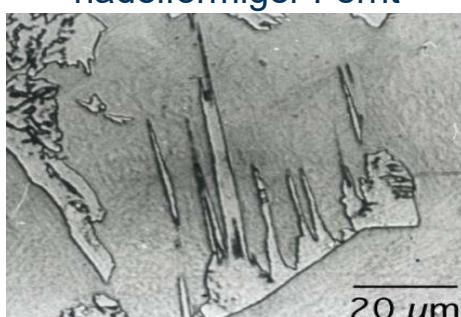
idiomorpher Ferrit



nadelförmiger Ferrit



allotriomorpher Ferrit

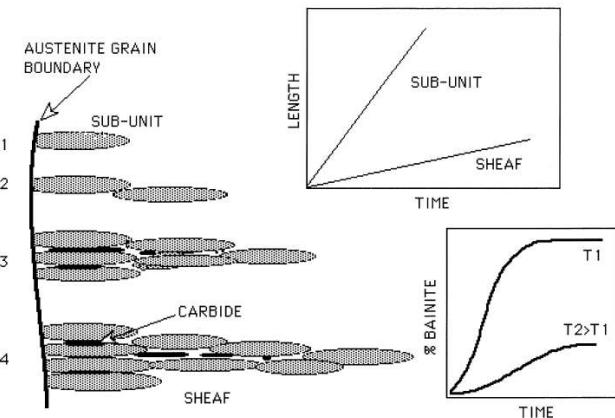


Widmannstätten-Ferrit

Quelle: http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2008/Steel_Microstructure/SM.html

Die bainitische Umwandlung

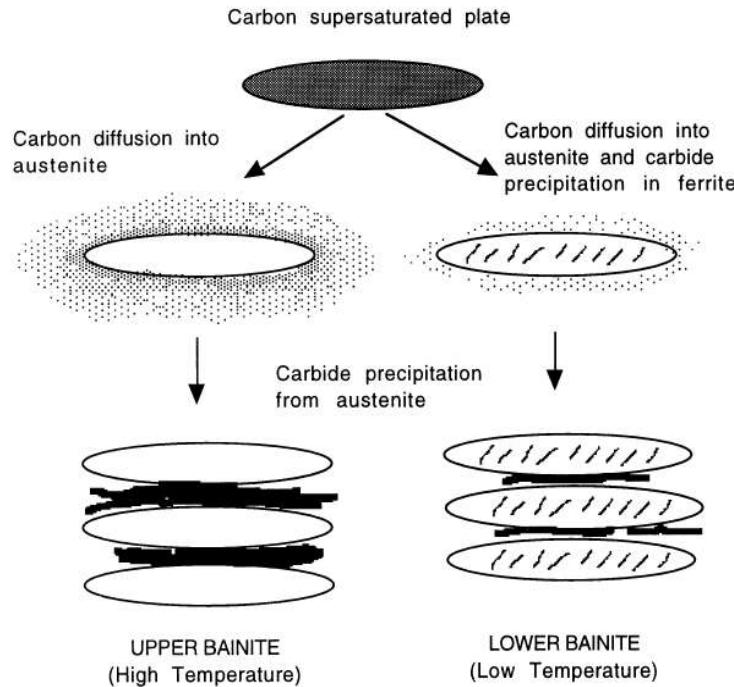
- Nukleation und Wachstum von Austenit-Korngrenzen aus
- Geringere Dichte des Ferrit führt zur Deformation des umgebenden Austenits
- Austenit muss sich in der Umgebung der Ferrit-Platten plastisch verformen, er unterdrückt damit das weitere Wachstum => Entstehung plattenförmiger „sub-units“
- Substituiert gelöste Atome diffundieren während der Bainit-Umwandlung nicht



- Kohlenstoff ist bei der Umwandlungstemperatur des Bainit mobil und partitioniert zwischen Austenit und Ferrit
- Anreicherung im Austenit kann zur Bildung von Zementit führen
- Zementit (Z)-Bildung wird unterdrückt durch Zulegieren von Silizium. Grund: Si ist in Z nicht löslich, dieser muss sich jedoch mit der Zusammensetzung des Austenit bilden, da eine Diffusion substituierter Elemente nicht möglich ist!

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Die bainitische Umwandlung



1. Bildung einer mit C übersättigten Ferrit-Platte
2. Oberer Bainit: Partitionierung in den umgebenden Austenit, dort ggf. Bildung von Zementit
3. Zementit in Bainit hat Zusammensetzung des Austenit => Unterschied zu Zementit in Perlit !
4. Unterer Bainit: C-Diffusion verlangsamt, so dass Zementit sich innerhalb der Ferrit Platte und im angereicherten Austenit bilden kann
5. Karbidbildung abhängig von Gesamt-C- Gehalt und Zusammensetzung des Austenit, hier vor allem Si

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Die bainitische Umwandlung

Perlit (gekoppeltes Wachstum im lokalen Gleichgewicht)

$$\gamma \Rightarrow \alpha + \theta$$

oberer Bainit (Karbide nicht in α_b !)

$$\gamma \Rightarrow \gamma + \alpha_{b,\text{übersättigt}}$$

$$\Rightarrow \alpha_{b,\text{ungesättigt}} + \gamma_{\text{angereichert}}$$

$$\Rightarrow \alpha_{b,\text{ungesättigt}} + \alpha + \theta$$

unterer Bainit (Karbide auch in α_b !, $\varepsilon = \text{Fe}_{2,4}\text{C}$, $\theta = \text{Fe}_3\text{C}$)

$$\gamma \Rightarrow \gamma + \alpha_{b,\text{übersättigt}}$$

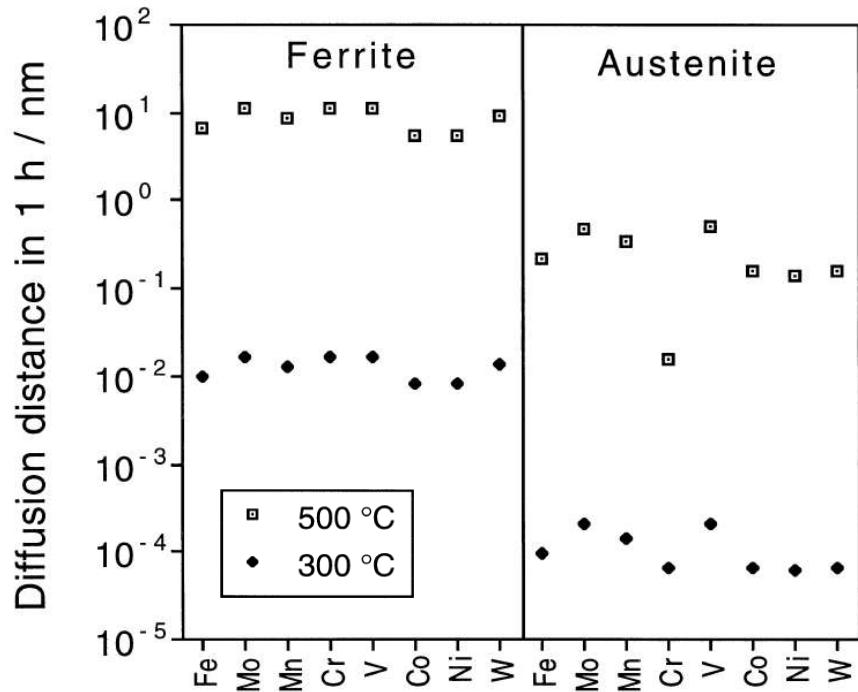
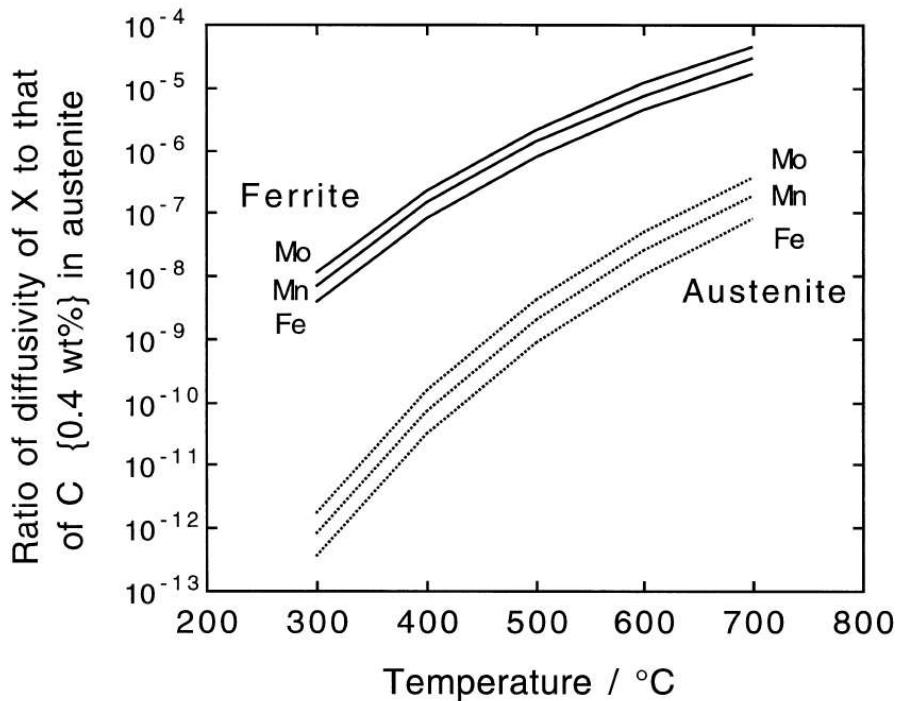
$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{in Ferrit}} + \alpha_{b,\text{ungesättigt}} + \gamma_{\text{angereichert}}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{in Ferrit}} + \alpha_{b,\text{ungesättigt}} + \alpha + \theta_{\text{zwischen Ferritplatten}}$$

$$\Rightarrow \theta_{\text{in Ferrit}} + \alpha_{b,\text{ungesättigt}} + \alpha + \theta_{\text{zwischen Ferritplatten}}$$

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Die bainitische Umwandlung



Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Thermodynamik

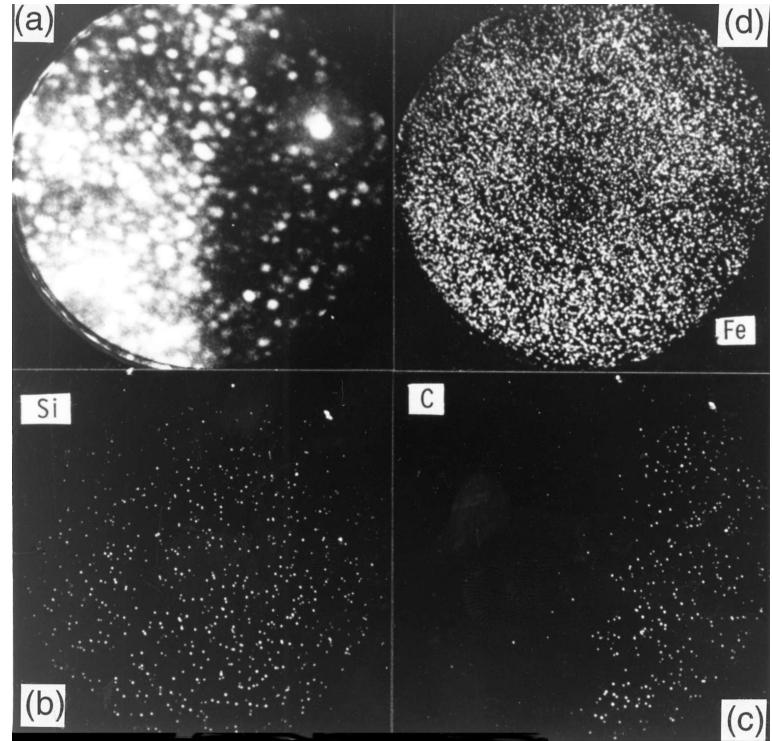
Fe-C-Si-Mn Stahl

Atomsonden-Aufnahmen der Grenzfläche
Austenit-bainitischer Ferrit

Kohlenstoff partitioniert in den Austenit

Substituierte Atome sind nicht mobil

Nicht allein ein Temperatur-Effekt, da messbarer
Unterschied im **Verteilungskoeffizient für Cr**
zwischen Perlit und Bainit bei gleicher
Umwandlungstemperatur



Thermodynamik

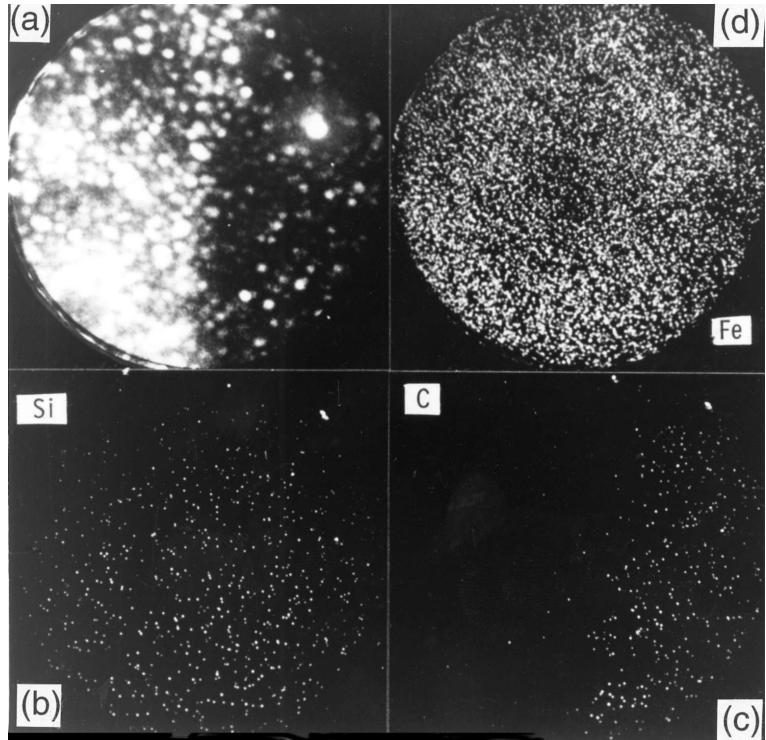
Fe-C-Si-Mn Stahl

Atomsonden-Aufnahmen der Grenzfläche
Austenit-bainitischer Ferrit

Kohlenstoff partitioniert in den Austenit

Substituierte Atome sind nicht mobil

Nicht allein ein Temperatur-Effekt, da messbarer
Unterschied im **Verteilungskoeffizient für Cr**
zwischen Perlit und Bainit bei gleicher
Umwandlungstemperatur



Thermodynamik

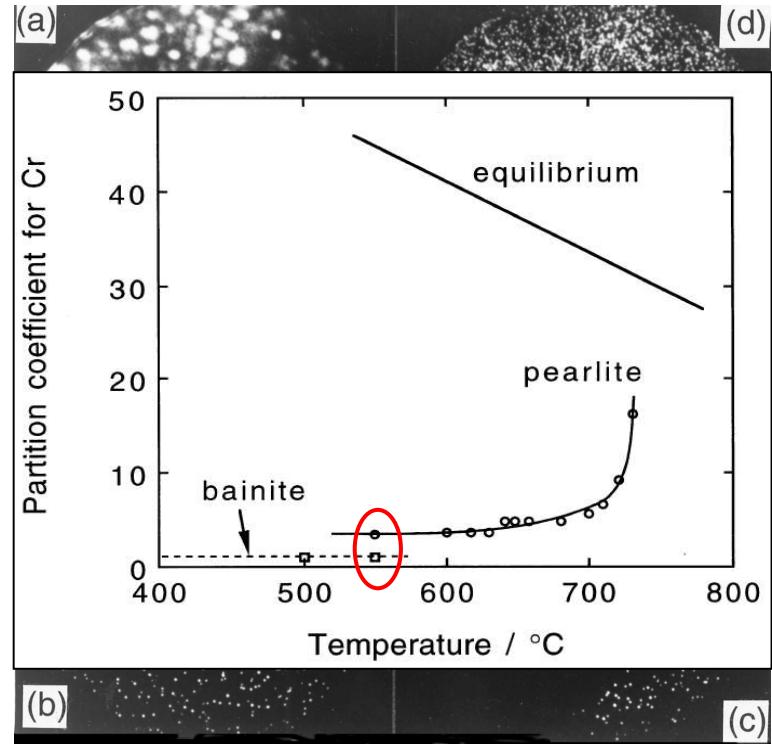
Fe-C-Si-Mn Stahl

Atomsonden-Aufnahmen der Grenzfläche
Austenit-bainitischer Ferrit

Kohlenstoff partitioniert in den Austenit

Substituierte Atome sind nicht mobil

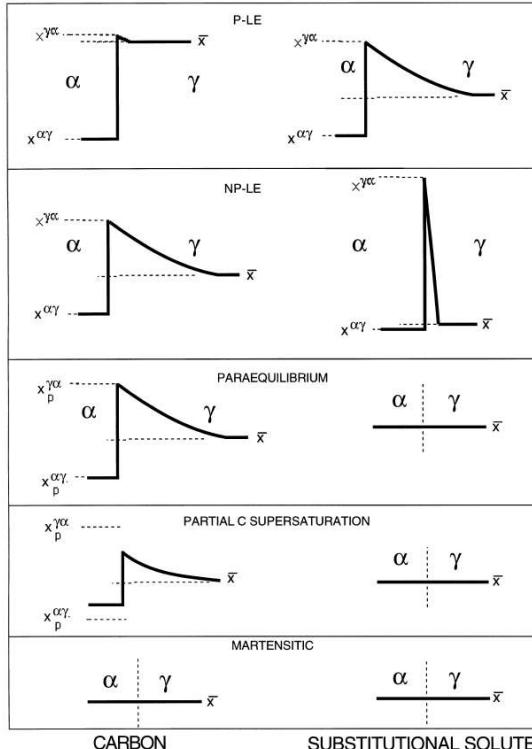
Nicht allein ein Temperatur-Effekt, da messbarer
Unterschied im **Verteilungskoeffizient für Cr**
zwischen Perlit und Bainit bei gleicher
Umwandlungstemperatur



Thermodynamik

- Bainit immer weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht
- Bei diffusionskontrollierten Prozessen: Annahme eines **lokalen Gleichgewichtes**, z.B. an einer Phasengrenze, ist meist zutreffend.
- Bei Systemen, die interstitiell gelöste, schnell diffundierende Elemente enthalten (z.B. C oder N in Fe), kann sich ein sog. „**Paraequilibrium**“ einstellen. In diesem Fall diffundieren die substituierten Elemente nicht und die GG-Einstellung erfolgt nur durch C- oder N-Diffusion.
- Vollständig diffusionslose Umwandlung können unterhalb einer Temperatur stattfinden, die als T_0 bezeichnet wird. Bei $T=T_0$ weisen Edukt- und Produktphase die gleiche freie Enthalpie bei gleicher chemischer Zusammensetzung auf.
- Für Bainit-Bildung: T_0 -Kriterium mit anschließender C-Diffusion!

Thermodynamik



P-LE: Partitioning – Local Equilibrium
C (N) und substituierte Elemente diffundieren

NP-LE: No Partitioning – Local Equilibrium
C (N) diffundieren
substituierte Elemente nur an Grenzfläche

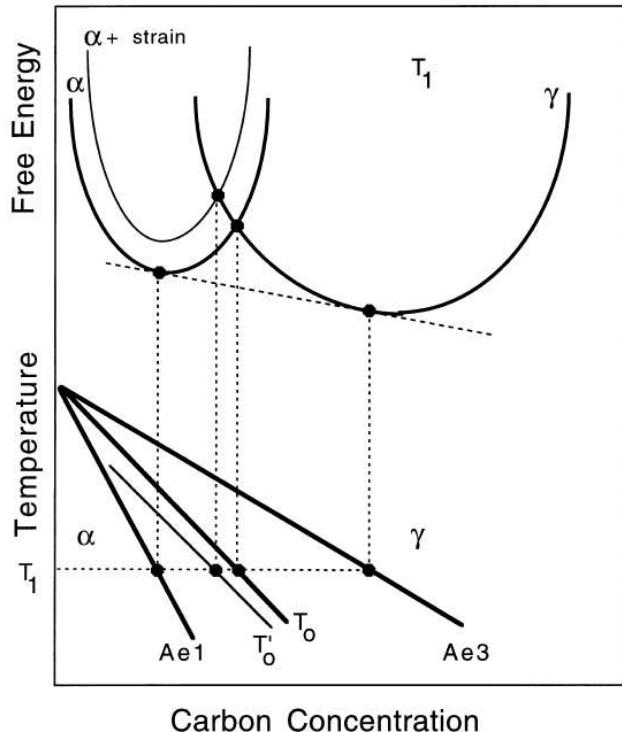
Paraequilibrium
Nur C (und N) diffundieren

Partial C Supersaturation
Übersättigung an C im Ferrit

Martensitische Umwandlung
Keine Diffusion

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

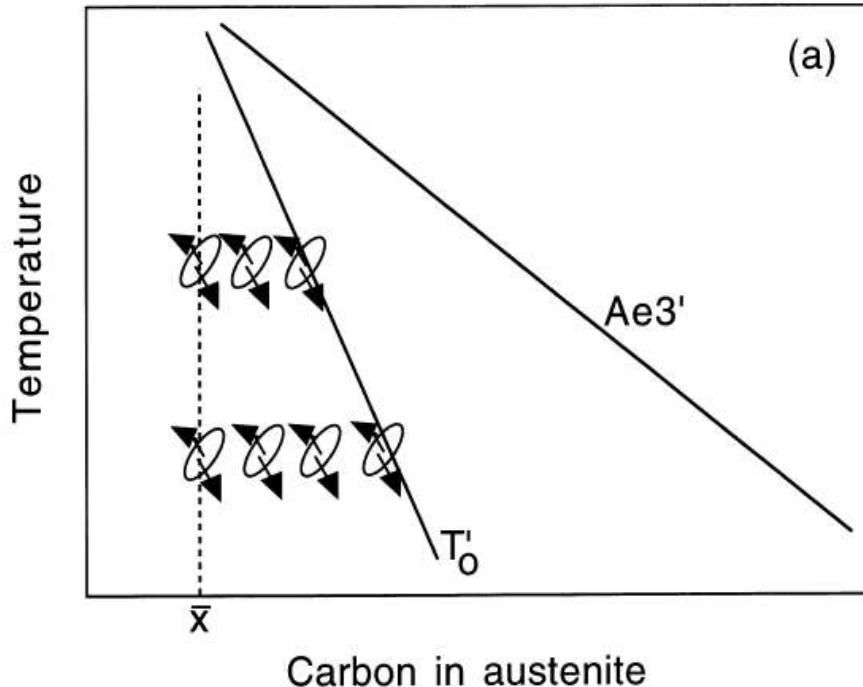
Thermodynamik: T_0 -Kriterium



- Eine Temperatur T_1 und die zugehörigen G-x-Kurven von α und γ .
- Schnittpunkt der Kurven ($G_\alpha = G_\gamma$) bei gleicher Zusammensetzung definiert T_0
=> Kriterium für diff.-lose Umwandlung!
- Unterkühlung unter T_0 notwendig für Bildung einer Platte aus bainitischem Ferrit.
- Berücksichtigung des Beitrages der Gitterdehnung durch Bildung bainitischen Ferrits durch Verschiebung G-x-Kurve Ferrit zu höheren Werten
=> größere Unterkühlung nötig
- Kohlenstoff aus bainitischem Ferrit diffundiert in umgebenden Austenit, erneute Bildung einer Ferrit-Platte aus C-angereichertem Austenit.

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Thermodynamik: T_0 -Kriterium



Umwandlung von A in B ist immer unvollständig, da c_C des Austenit links der T_0 -Kurve liegen muss.

Experimentell

Isotherme Umwandlung von Austenit in Bainit endet bei T_0 , verbleibender Austenit wandelt bei Abkühlung in Martensit um oder verbleibt als RA.

T_0 ist Erklärung für B_s (vgl. Folie 4) und Zunahme der Bainit-Menge mit Unterkühlung.

Bildung von Bainit verläuft innerhalb eines Austenit-Kernes (wie bei Martensit, Unterschied zu Perlit)

Quelle: Bhadeshia, Bainite in Steels

Zusammenfassung

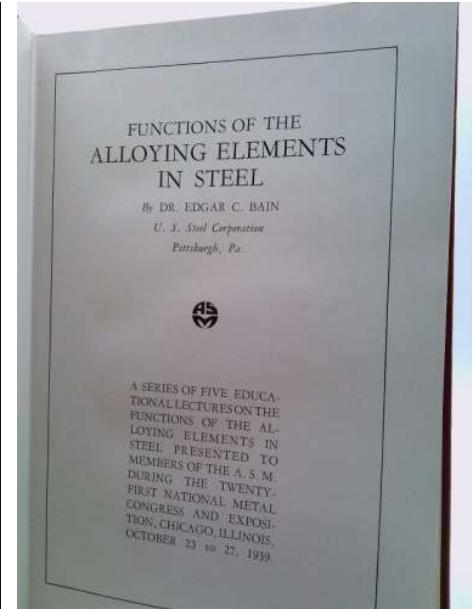
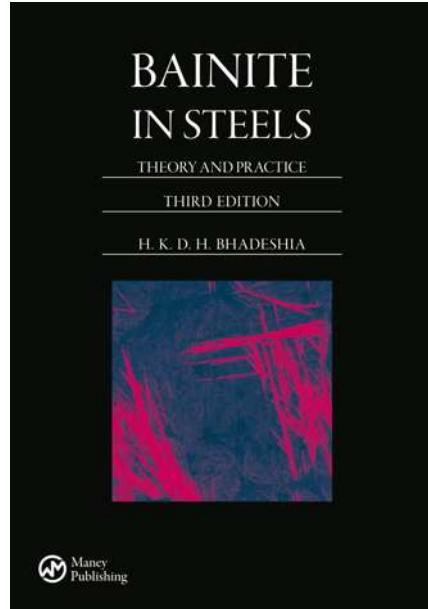
- Bainit ist neben Ferrit, Perlit und Martensit ein weiteres Umwandlungsprodukt, das sich in Stählen bilden kann.
- Die Bildung von Perlit ist rekonstruktiv, d.h. sie beinhaltet die Diffusion aller Legierungselemente im lokalen Gleichgewicht an der Wachstumsfront.
- Bainit bildet sich zunächst diffusionslos in Form von Ferrit-Platten mit starker C-Übersättigung. C wird durch Diffusion in den umgebenden Austenit partitioniert.
- Erneute Nukleation weiterer Bainit-Platten führt zur Bildung keilförmiger Bainit Bündel. Starker Einfluss durch Dehnung des Wirtsgitters.
- Diffusion von substituierten Elementen findet nicht statt.
- Bainit-Bildung ist immer unvollständig, begrenzt durch T_0 -Kurve.

Überprüfungsfragen

1. Welche Temperatur muss unterschritten werden, damit sich Bainit bilden kann?
2. Wieso bildet sich Bainit in Form einzelner Plättchen („sub-units“)?
3. Kann sich Bainit auch bilden, wenn Sie C vollständig durch N ersetzen?
4. Was macht bainitische Stähle im Vergleich zu martensitischen Stählen interessant?
5. Beschreiben Sie den Begriff „Para-Equilibrium“.
6. Die Bildung von Karbiden muss nicht zwingend bei der bainitischen Umwandlung erfolgen. Mit welchen Legierungselementen kann man sie verzögern? Warum ist das so?
7. Wie verhalten sich substituiert gelöste Elemente bei der Bainit-Bildung?
8. Leiten Sie das T₀-Kriterium für die Bainit Bildung über ein G-T-Diagramm her!
9. Erläutern Sie anhand des G-T-Diagramms den Unterschied in der B_s und der M_s-Temperatur!
10. Wie unterscheiden sich oberer und unterer Bainit mikrostrukturell?

Literatur

- E.C. Bain, Functions of the Alloying Elements in Steel, ASM, 1939
 - H.K.D.H. Bhadeshia, Bainite in Steels, Cambridge University Press, 2001
- (online verfügbar:
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/newbainite.html>)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit
und Ihre Mitarbeit !

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Weber
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl Werkstofftechnik
Universitätsstr. 150, IC 03-319
D-44801 Bochum