

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Technologische Anwendung des Bainit

Struktur

1. Übersicht: Bainitische Werkstoffe
2. Anwendung für Massivwerkstoffe
 - Vergütungsstahlguss GS 50CrSiNiMo5
 - Advanced Bainitic Steels, z.B. für Schienen
 - Bainitisierter Wälzlagerstahl 100Cr6
 - Austempered Ductile Iron (ADI)
 - Bainitisieren von Gusseisen (ADI) im Druckgussverfahren
3. Anwendung für Flachprodukte
 - TRIP-Stahl (siehe „Ein- und Mehrphasenstähle [...]“)
4. Zusammenfassung
5. Literatur

Übersicht: Banitische Werkstoffe

gegossen

Austempered Ductile Iron

Schweißlegierungen
mit nadelförmigem Ferrit

umgeformt

Hochfester Bainit
($R_{p0,2}$ 1200-2500 MPa)

Höherfester Bainit
($R_{p0,2}$ <1200 MPa)

Kriechbest. bainitische Stähle
(für $T < 570^{\circ}\text{C}$)

Schmiedelegierungen für
Automotive-Anwendungen
($R_{p0,2}$ <900 MPa)

TRIP-Stahl

Vorzüge des Bainitisierens

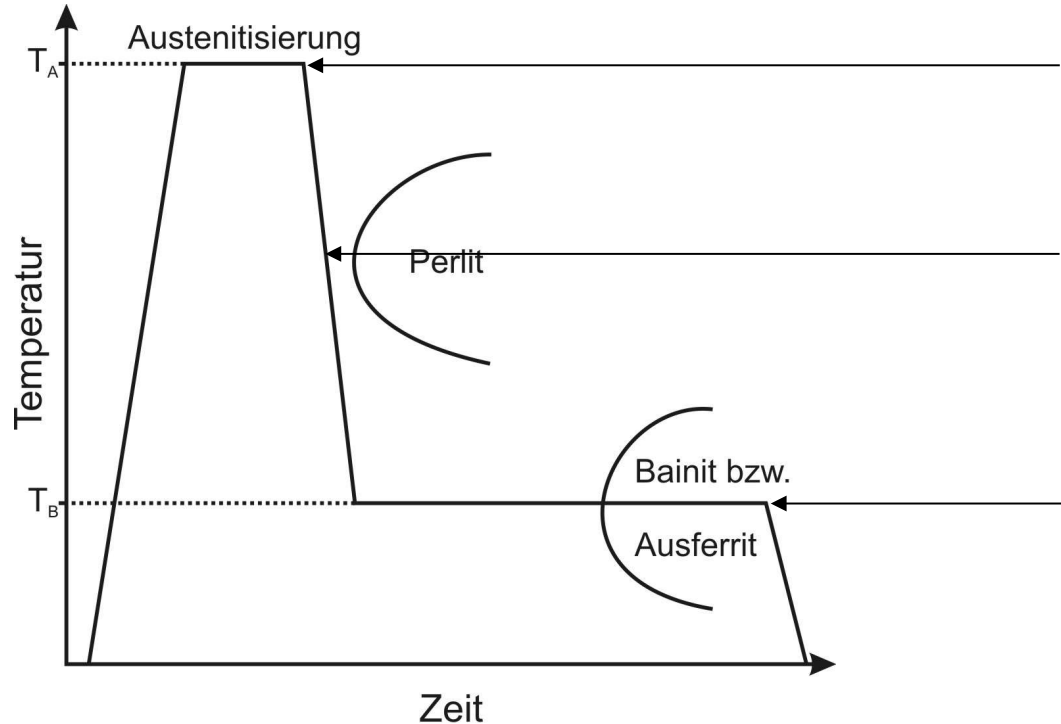
Bainitischer Stahl (-guss)

- Konkurrenz zum Martensit
 - Erzielung höherer Zähigkeiten
 - günstigerer Eigenspannungsverlauf
 - geringerer Verzug
 - Verminderung der Gefahr von Härterissen

Austempered Ductile Iron (ADI)

- Konkurrenz zu GJS
 - hohe Festigkeit bei hoher Zähigkeit
- Konkurrenz zum geschmiedeten Stahl
 - endformnah
 - hohe Verschleißbeständigkeit
 - gute Dämpfung
 - geringere Dichte

Prozessablauf des Bainitisierens

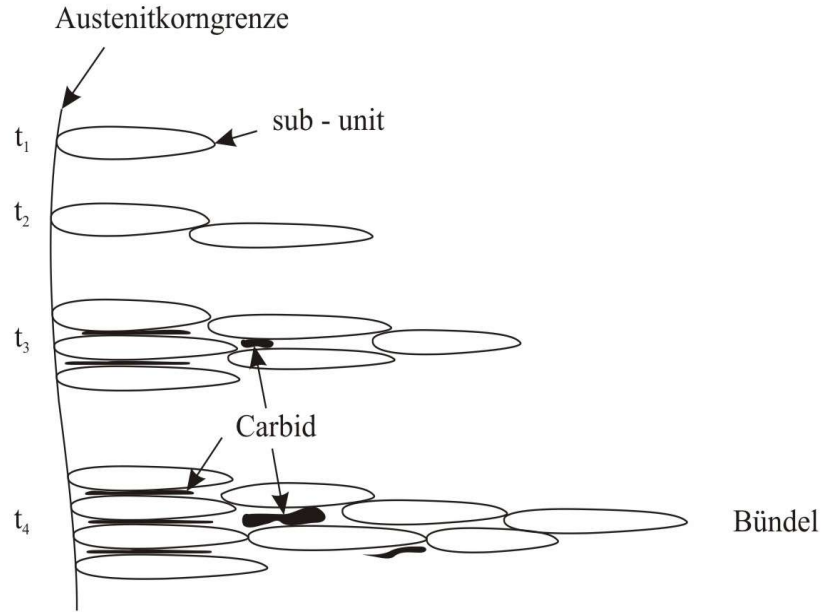


Umwandlung
Ferrit/Perlit $\rightarrow$ Austenit
Erhöhung des C – Gehalts im Austenit

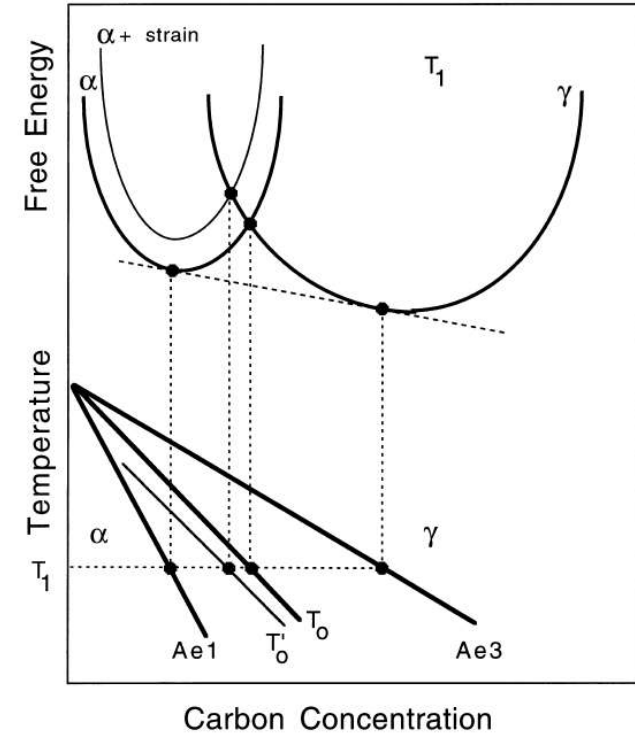
Gezielte Abkühlung auf Haltetemperatur
Vermeidung der Perlitbildung
Gefüge: metastabiler Austenit

Isotherme Bainitisierung
Durch Legierungszusammensetzung
und Prozessführung
Erhalt von Restaustenit

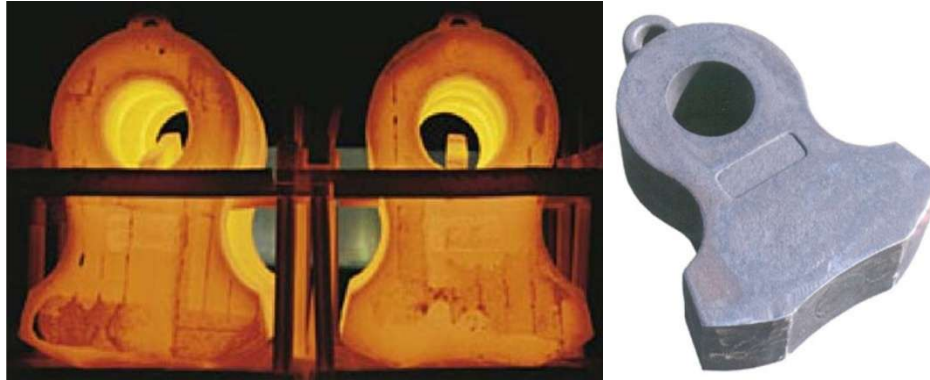
Bildungskinetik des Bainit & T_0 -Kriterium



Quelle: Bhadeshia: Bainite in steels

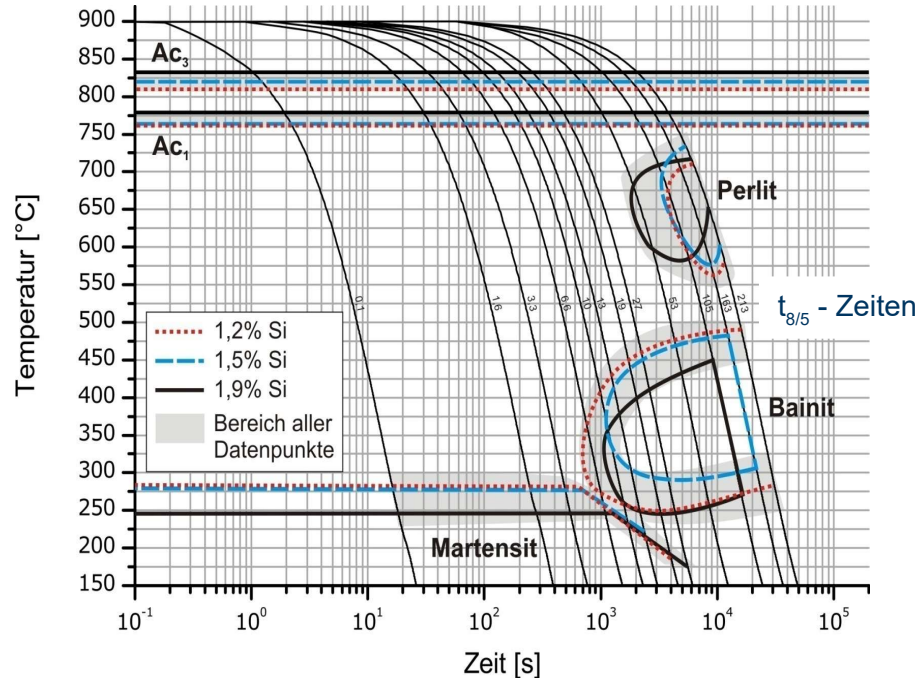


Vergütungsstahlguss GS 50CrSiNiMo5



Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

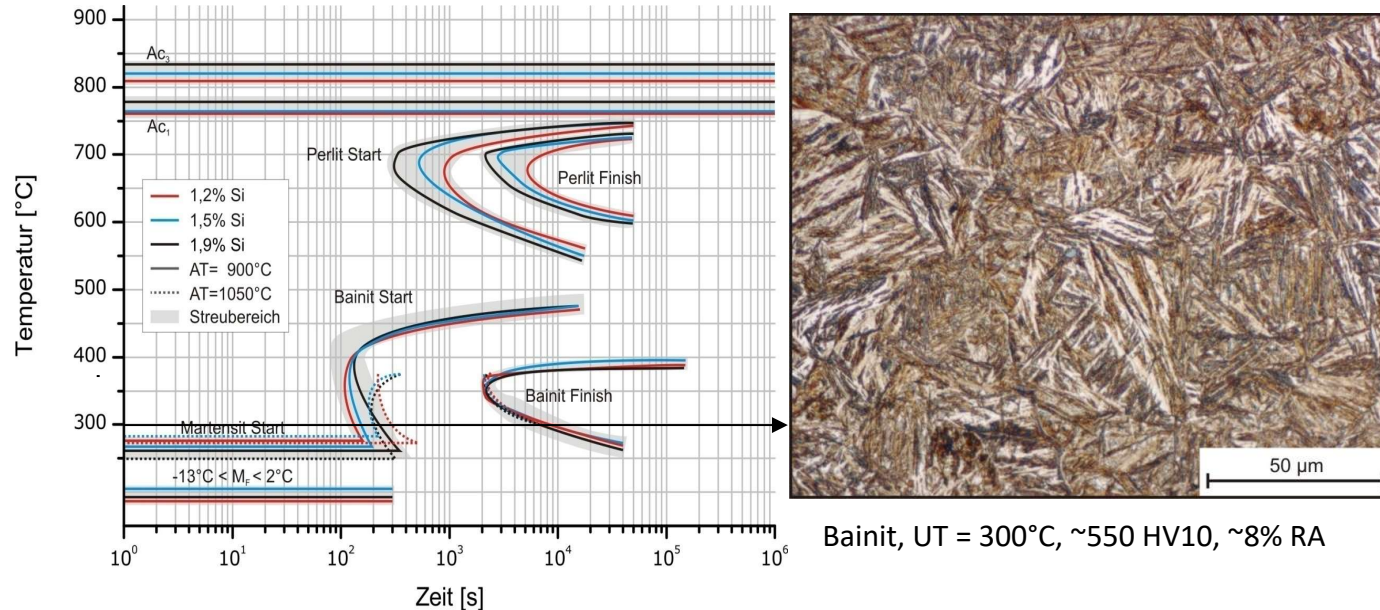
Kontinuierliches ZTU – Diagramm des Stahles GS 50CrSiNiMo5



$T_A = 900^\circ\text{C}$

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

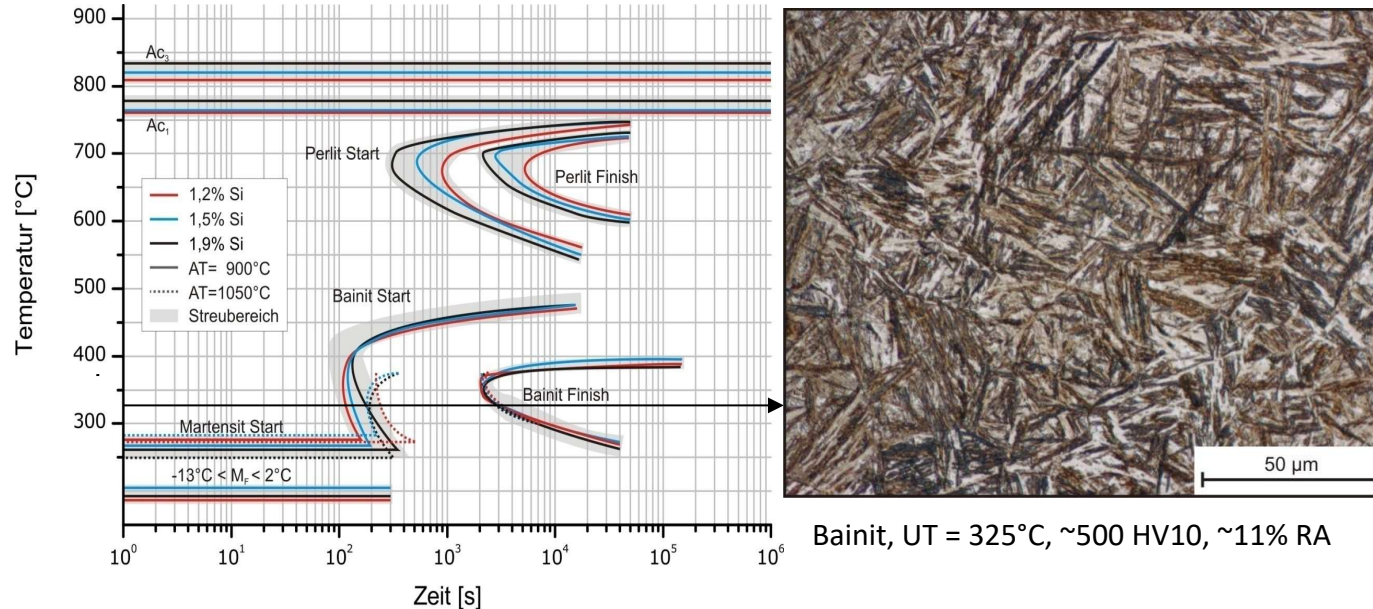
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

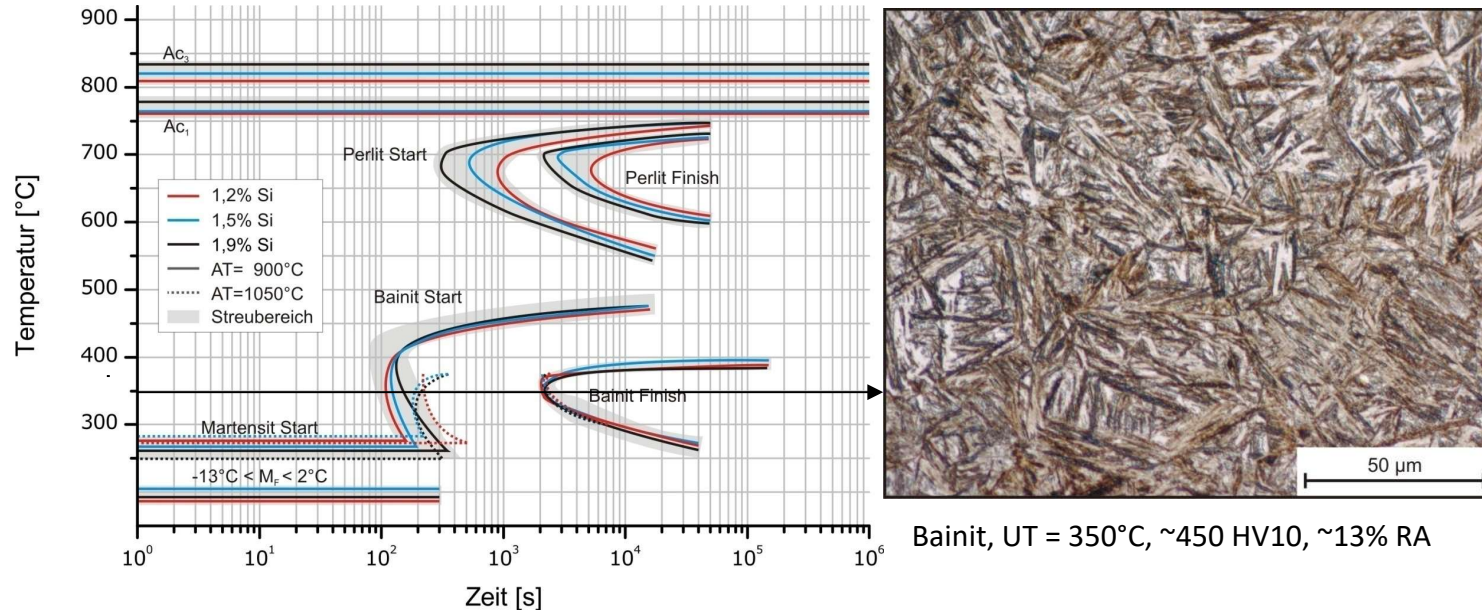
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

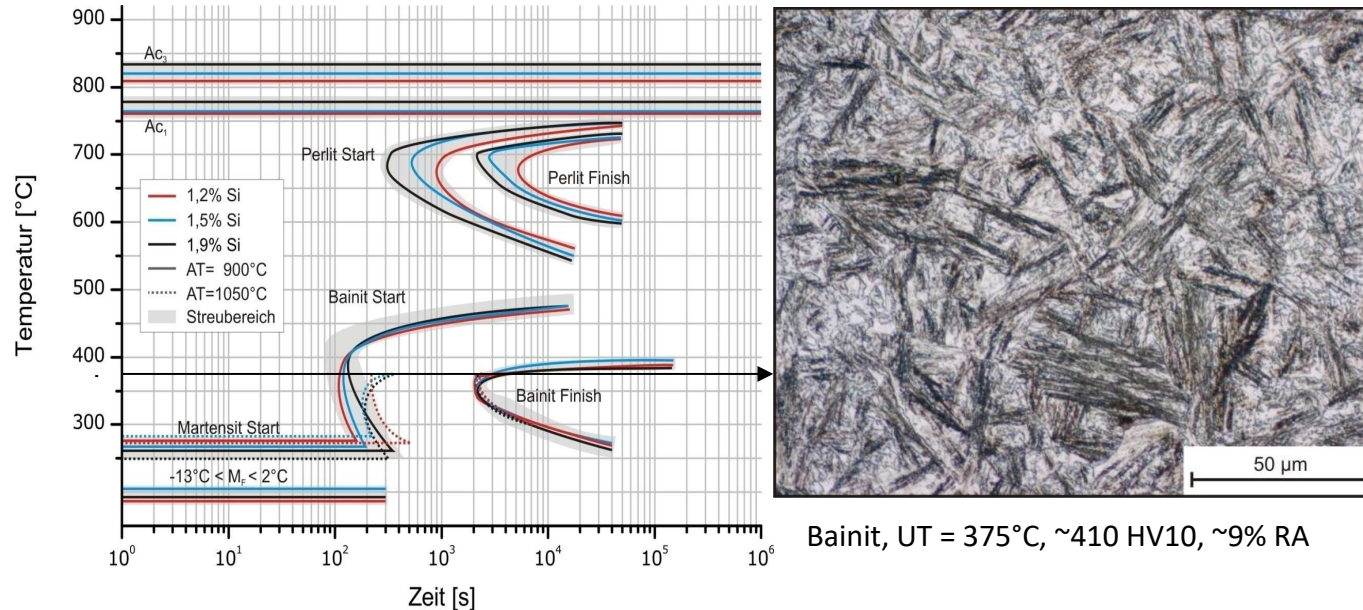
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

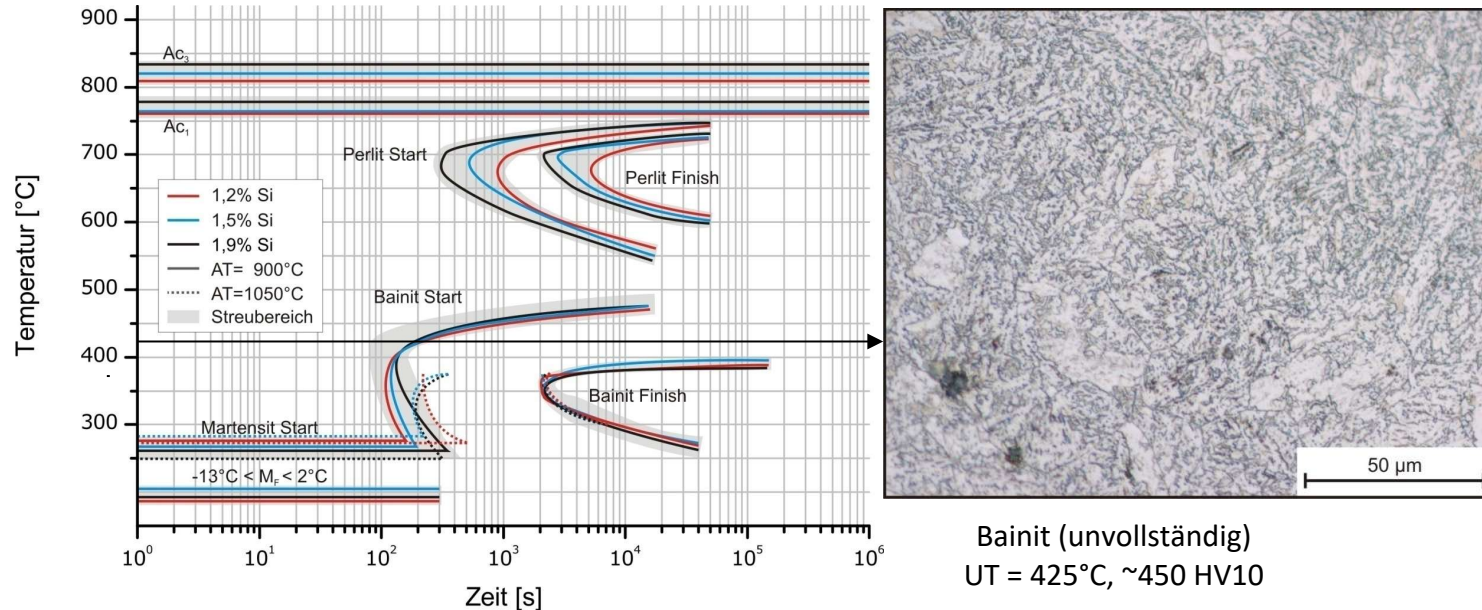
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

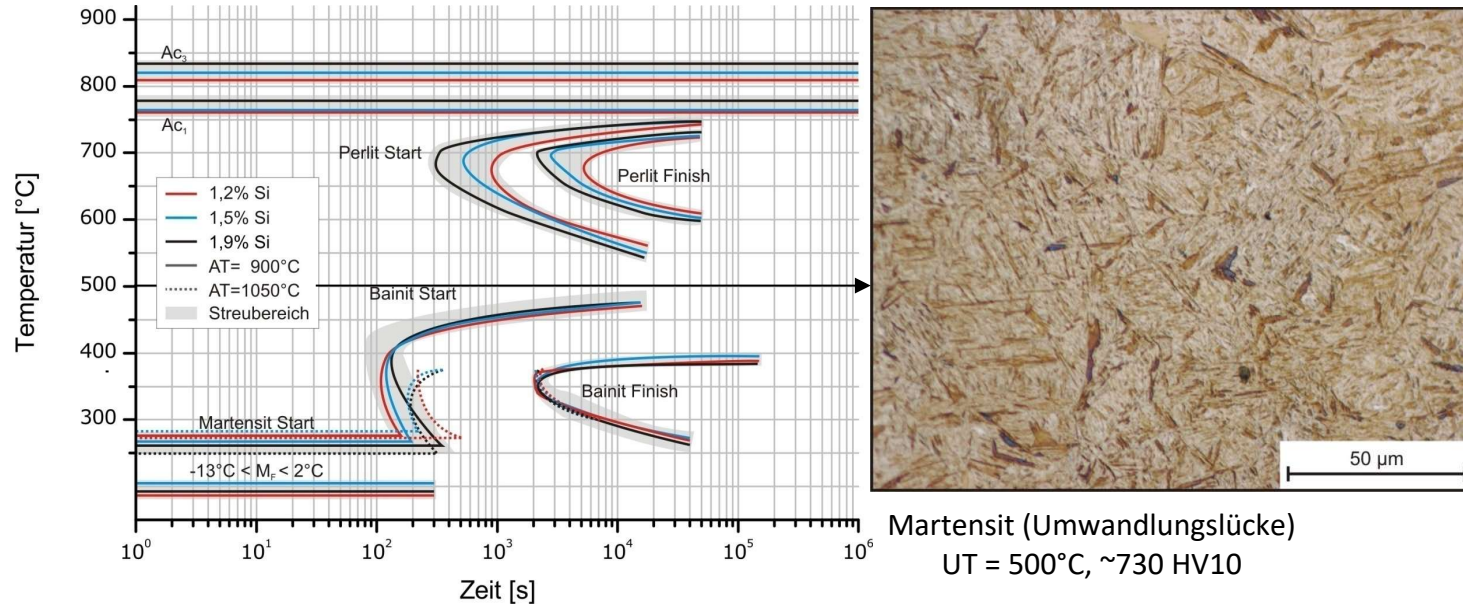
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

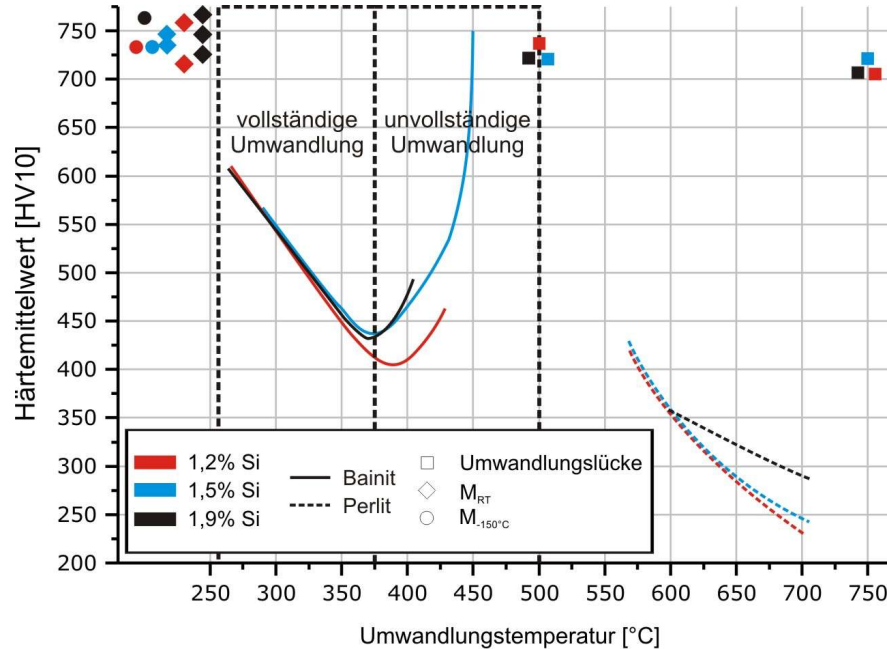
Isothermer Bainit des GS 50CrSiNiMo5



Entwicklung des Gefüges mit 3% HNO₃ + 97% Ethanol

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

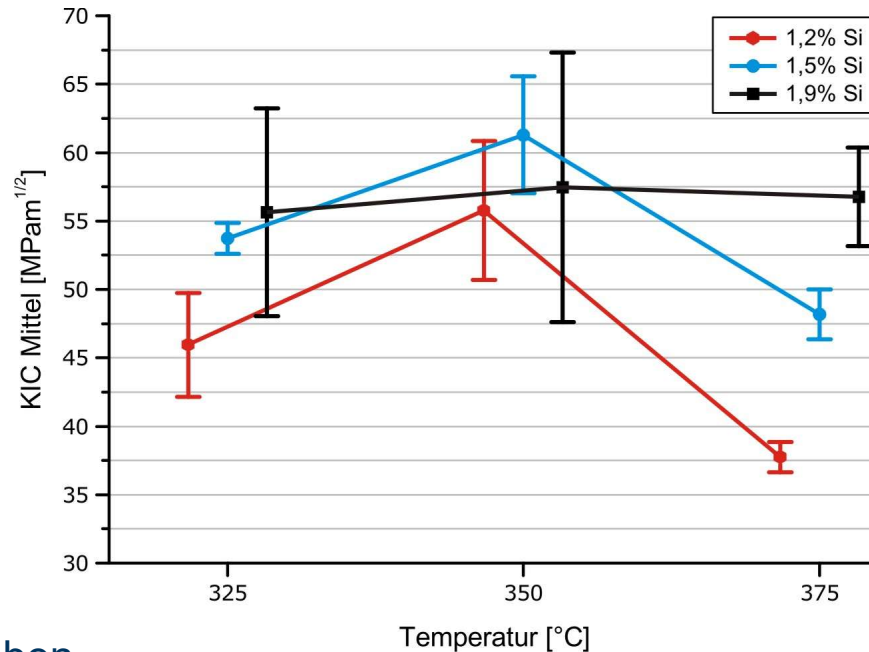
Härte des isothermen Bainits des GS 50CrSiNiMo5



Prüftemperatur: RT

Bainit von Vergütungsstählen: GS 50CrSiNiMo5

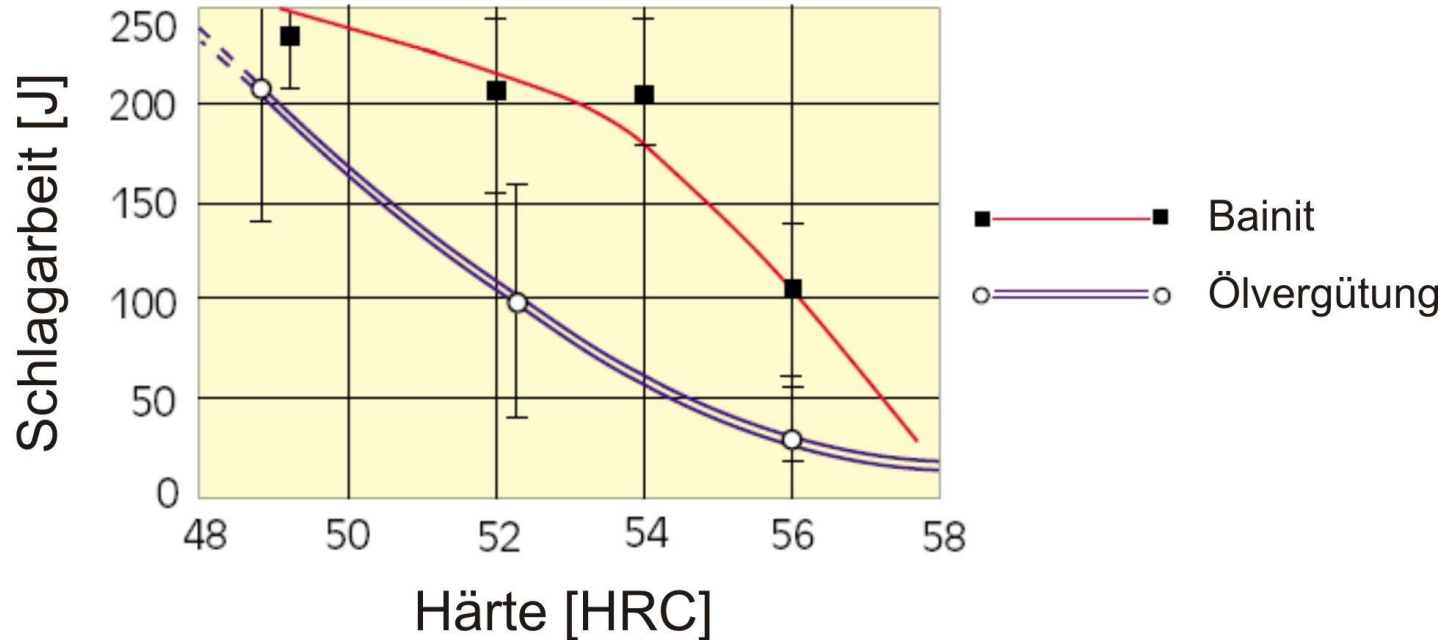
Bruchzähigkeit des isothermen Bainits des GS 50CrSiNiMo5



Ermittelt an CT – Proben

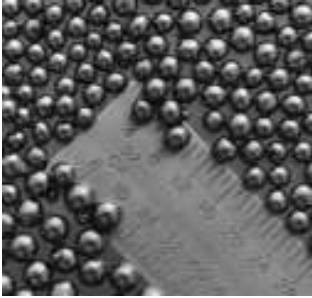
Bainit von Vergütungsstählen

Vergleich der Schlagarbeit eines vergüteten und eines bainitisierten C67

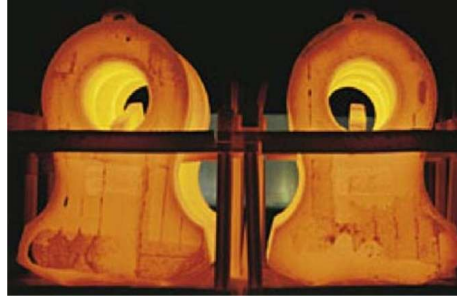


Bainit von Vergütungsstählen

Anwendungen für bainitisierten Vergütungsstahl



Kugeln zum
Kugelstrahlen



Schredderhämmer für
die Schrottzerkleinerung

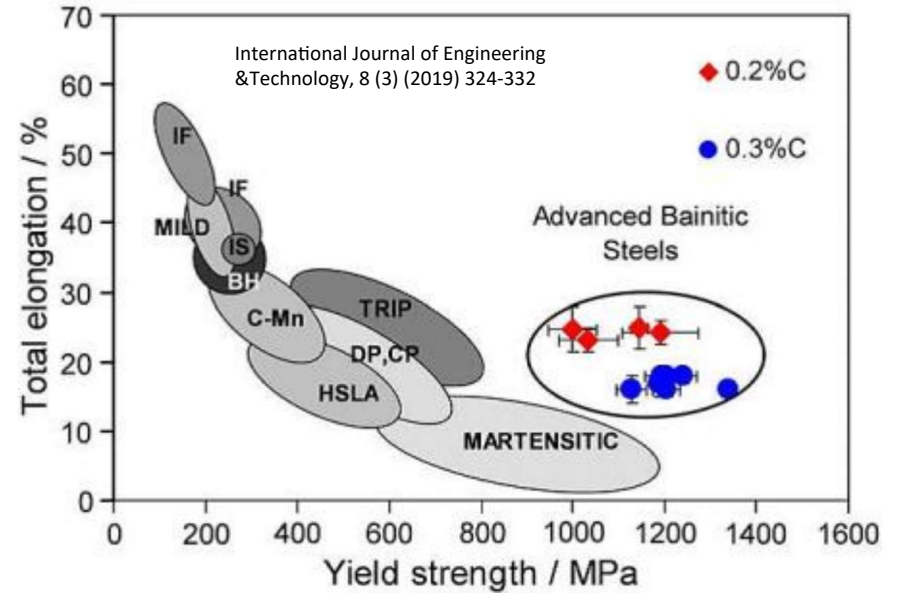


Schienenräder

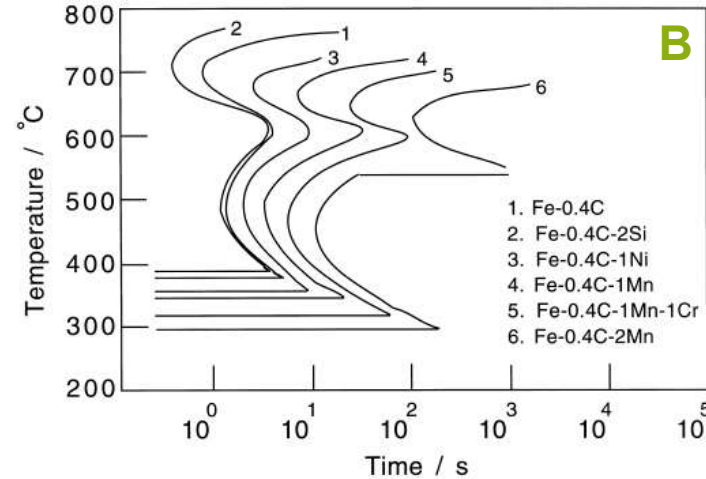
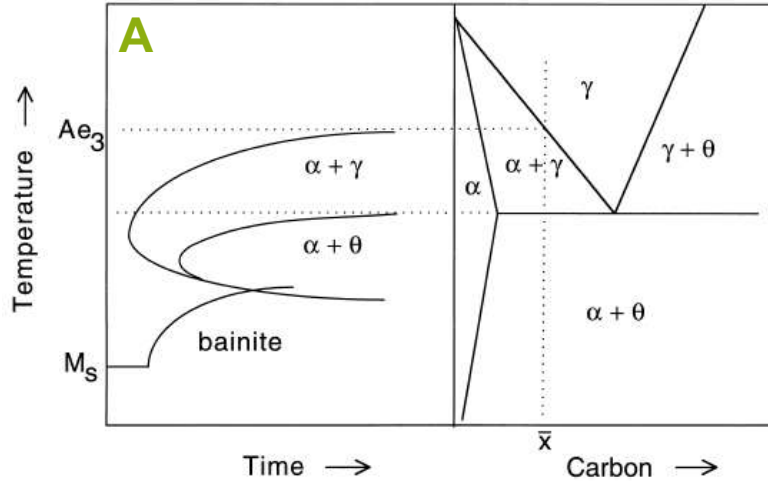


Sägeblätter zum Trennen
untersch. Werkstoffe

Advanced Bainitic Steels



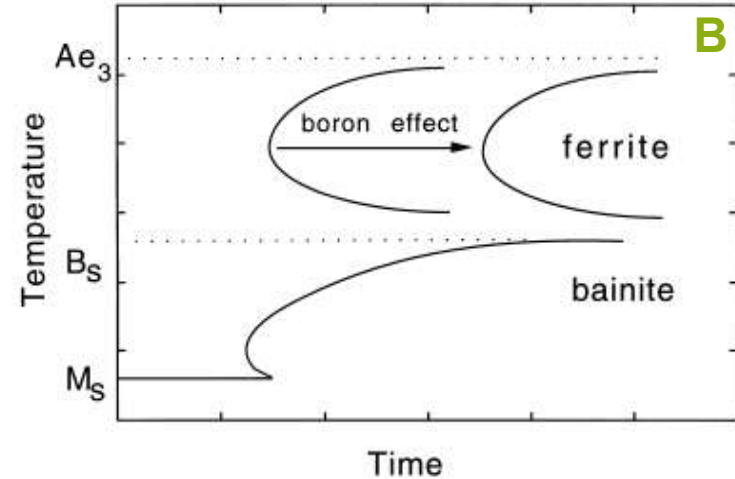
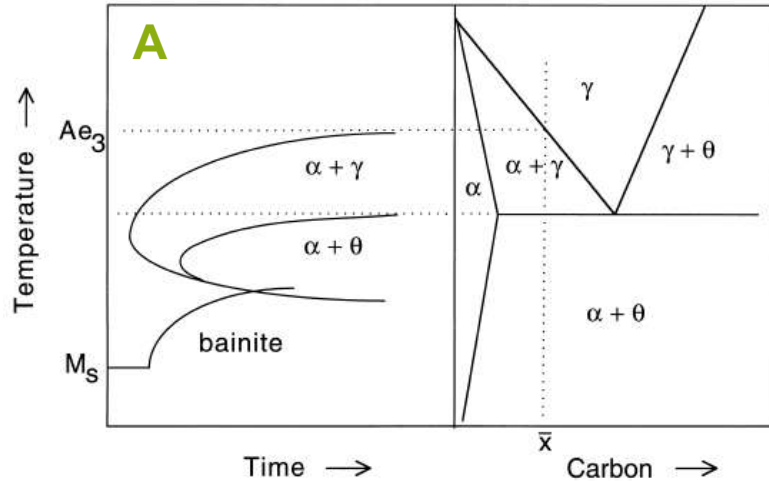
Advanced Bainitic Steels



A) Verknüpfung von Gleichgewichts- und ZTU-Diagramm

B) Einfluss von Legierungselementen auf Perlit- und Bainit-Umwandlung: Die diffusionskontrollierte Bildung von Perlit wird vor allem durch Zugabe von Mangan verzögert, und zwar wesentlich stärker als die Bildung von Bainit. Einen ähnlichen Einfluss übt Bor aus. Lage der C-Kurven bei tieferer Temperatur durch thermodynamische Stabilisierung des Austenits, gegenläufiger Einfluss von Silizium (vgl. Abbildung A).

Advanced Bainitic Steels



- A) Verknüpfung von Gleichgewichts- und ZTU-Diagramm
- B) Einfluss von Legierungselementen auf Perlit- und Bainit-Umwandlung: Die diffusionskontrollierte Bildung von Perlit wird vor allem durch Zugabe von Mangan verzögert, und zwar wesentlich stärker als die Bildung von Bainit. Einen ähnlichen Einfluss übt Bor aus. Lage der C-Kurven bei tieferer Temperatur durch thermodynamische Stabilisierung des Austenites, gegenläufiger Einfluss von Silizium (vgl. Abbildung A).

Advanced Bainitic Steels

Chemische Zusammensetzung ausgewählter „Advanced Bainitic Steels“

C	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	Ti	B	Al	N	Nr.
0,04	0,2	1,55	0,2		0,04	0,015	0,00013	0,024	0,003	2
0,12	1,5	1,5						0,045	0,0035	8
0,1	0,25	1,0								5
0,02	0,2	2,0	0,3	0,3	0,05	0,02	0,001		0,0025	9
0,09	0,25	1,0	0,5	1,0	0,1	0,02	0,002	0,04	0,006	15

- 2 Bainitisch bei beschleunigter Abkühlung
- 8 TRIP Stahl
- 5 Bainitischer Dualphasen-Stahl
- 9 ULCB – ultra low carbon boron steel
- 15 Schmiedelegierung, „100%“ Bainit

Advanced Bainitic Steels

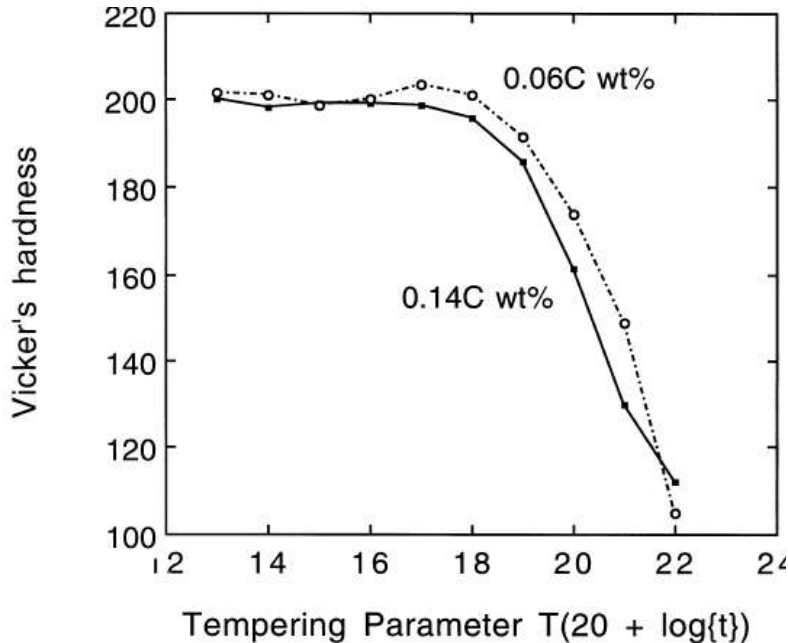
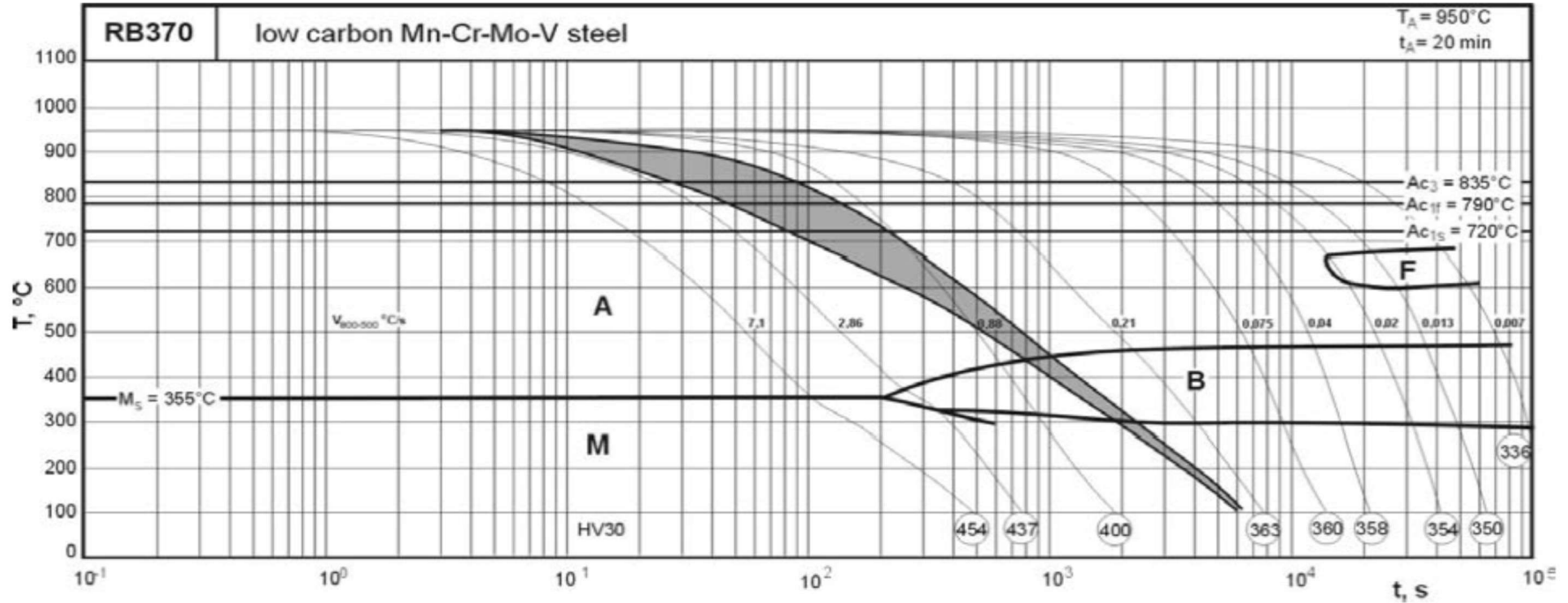


Fig. 4.2 Change in hardness for two bainitic steels containing different carbon concentrations, as a function of a time-temperature tempering parameter (after Irvine and Pickering, 1957). The tempering parameter is defined with the absolute temperature T and the time t in hours.

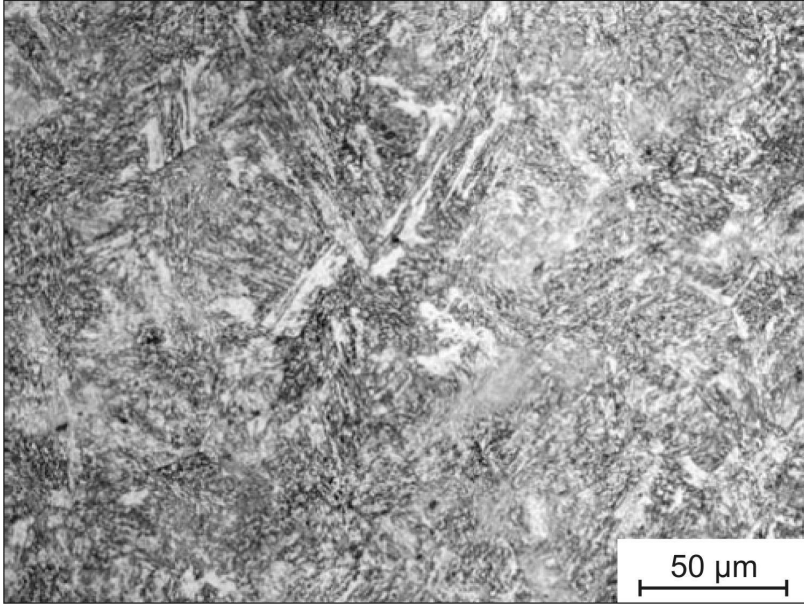
- Im Vergleich zu Martensit wesentlich geringerer Einfluss des C-Gehaltes auf Härte- und Anlassverhalten
- Höhere Anlassbeständigkeit bainitischer gegenüber martensitischer Zustände
- Ursächlich sind die unterschiedlichen primär wirksamen Verfestigungsmechanismen, wobei die Festigkeit des Bainit sich überwiegend aus einer Feinkornhärtung ergibt, nicht aus einer Verfestigung über Versetzungen wie im Fall des Martensit.

Bhadeshia: Bainite in steels, S. 93

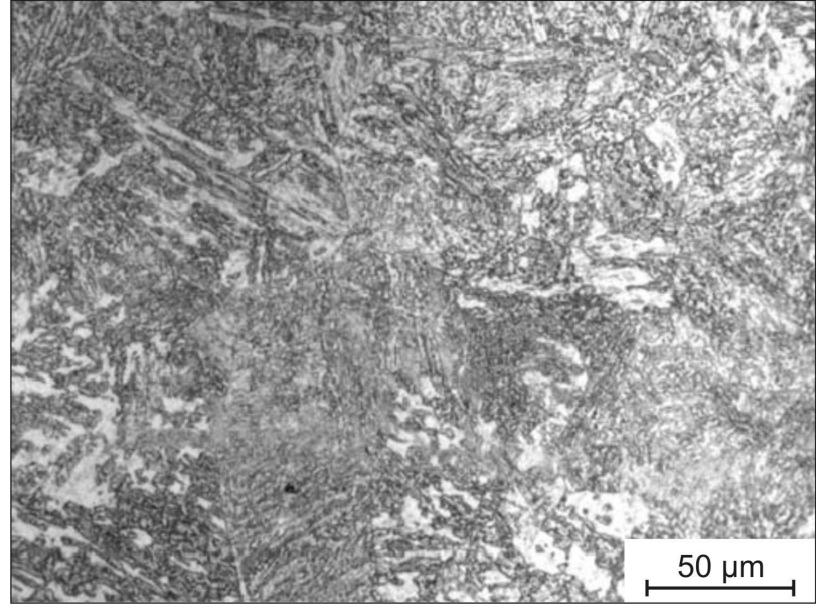
Kontinuierliche ZTU-Diagramme von Radschienenstählen



Gefüge von Radschienenstahl



RB370



RB390

Mechan. Eigenschaften der bainitischen Schienenstähle

	HBW	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]	K_{IC} [MPam ^{0,5}]	$K_{IC,-20^\circ C}$ [MPam ^{0,5}]
RB370	371-378	843-858	1197-1211	12,2-14,1	38,6-43	28,3-33,9	51,9-54,5	40,3-42,3
RB390	390-398	825-832	1347-1353	13-14,9	43-49	33,2-38,4	90,5-92,1	61,2-63
R350HT	350-390	700-712	1080-1098	10,3-11,1	-	-	23,2-25,6	mind. 32



RB370 & RB390: Bainitische Schienenstähle
R350HT: klassischer Schienenstahl (fein-perlitisch)

Bainitische Schienen für den Eurotunnel
(Testphase: Beginn Januar 2007)

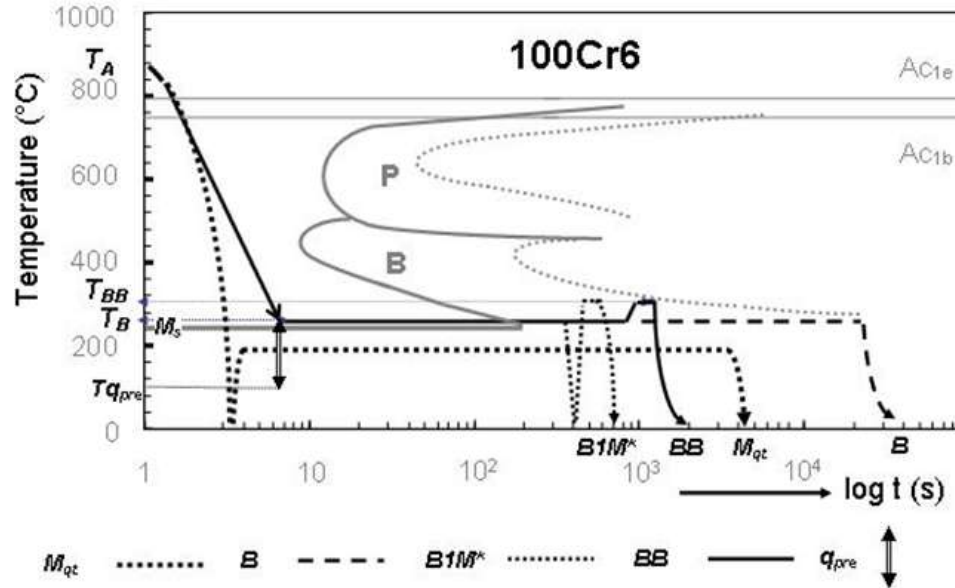
Verschleiß zweier Schienenstähle im Einsatz



Bainitisierter Wälzlagerstahl 100Cr6



Wärmebehandlungen zur Bainitisierung des 100Cr6



Isothermisches ZTU Diagramm des Stahles 100Cr6 (SAE 52100) mit Bezeichnung der Temperaturzyklen und der Methode einer Vorabschreckung (qpre)

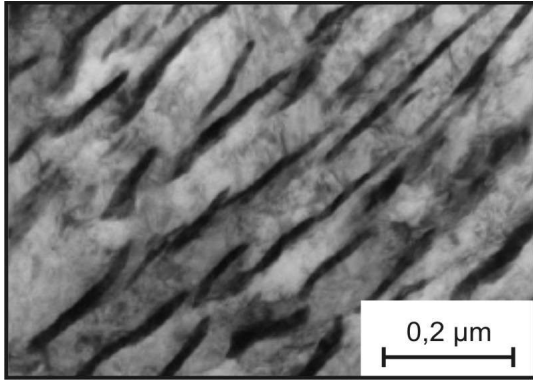
Wärmebehandlungen zur Bainitisierung des 100Cr6

Zyklen	Prozessdaten für die Praxis	
	Austenitisierung	Wärme- behandlung
M _{angelassen}	845°C 20 min/ (Salzbad)	Ölabschreckung auf RT / 170°C 2h
B		230 °C 4 h
B1M*		230 °C 25 min / H ₂ O RT + 250 °C 5 min
B unvollständig		230 °C 50 min / H ₂ O RT
845BB		230 °C 50 min + 250 °C 5 min / H ₂ O RT

Wärmebehandlungen bezeichnet gemäß DIN EN 10052

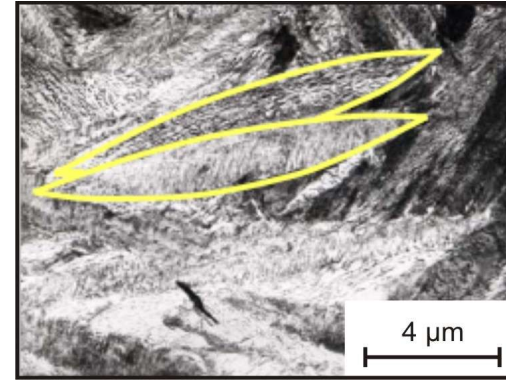
REM – Gefügebilder des Bainits des 100Cr6

oberer Bainit

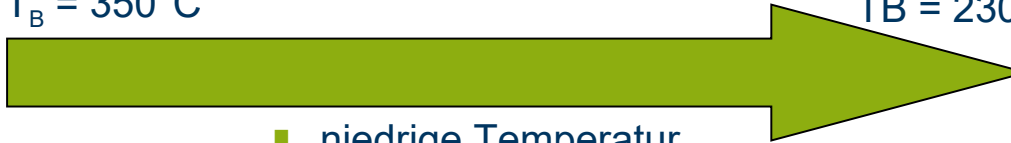


$T_B = 350^\circ\text{C}$

unterer Bainit



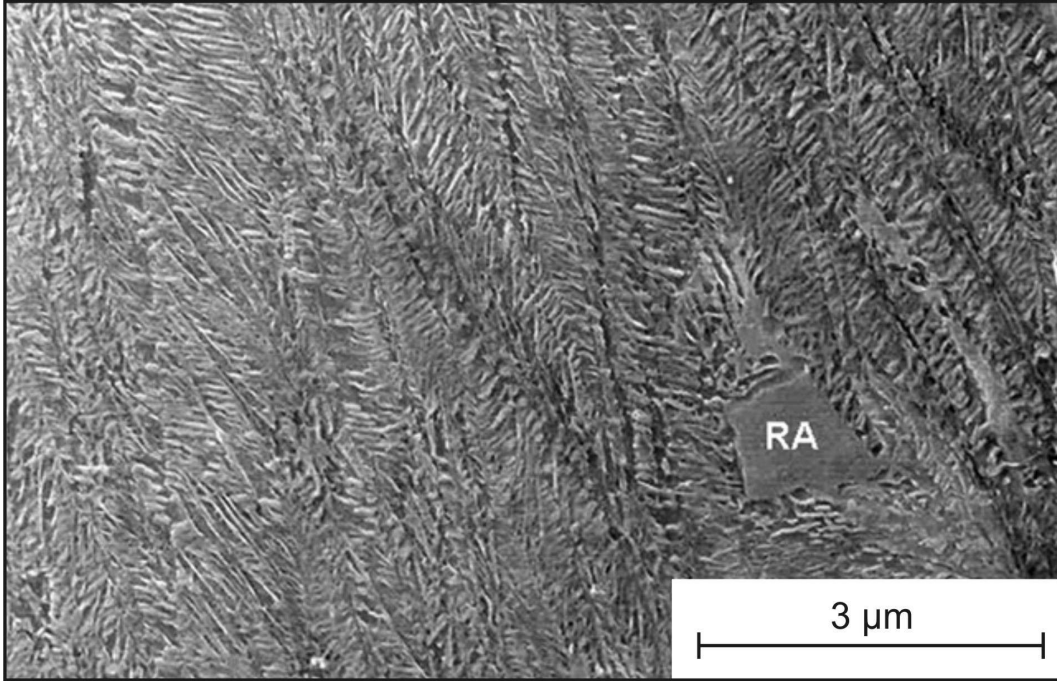
$T_B = 230^\circ\text{C}$



- niedrige Temperatur
- hoher Si - Gehalt

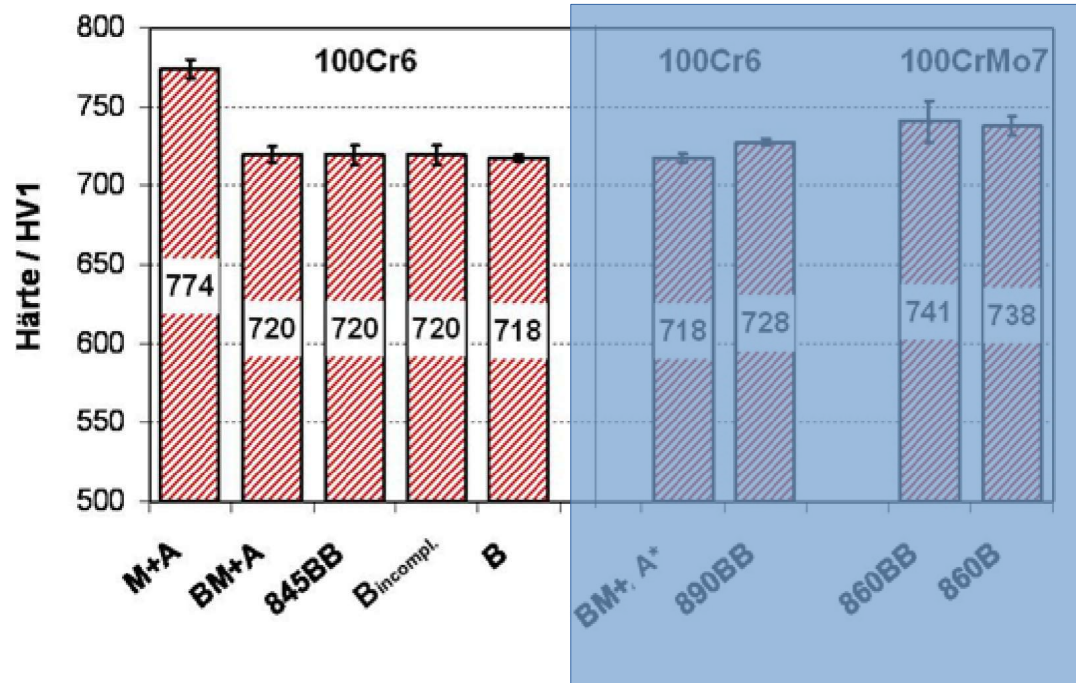
Dr.-Ing. H. Klümper-Westkamp: „Sensorkontrolliertes Bainitisieren von Gusseisen“, Projektvorschlag 04.11. 2008 in Bremen
Stiftung Institut für Werkstofftechnik (Bremen), http://www.awt-online.org/uploads/media/Top_7_ADI_Guss_Sensor_04_11_2008.pdf

REM – Gefügebilder des Bainits des 100Cr6



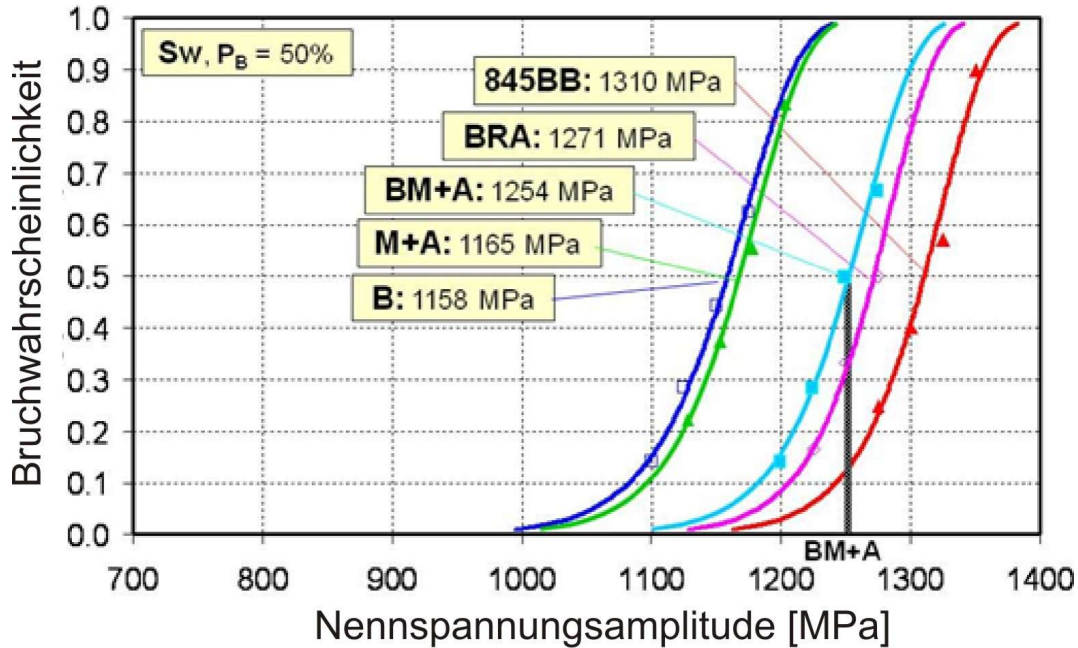
Unterer Bainit mit Restaustenit (RA)
nach unvollständiger Umwandlung
[Feld Emissions REM (15 keV)]
Aufnahme einer elektrolytisch
gedünnten TEM Folie]

Härten des 100Cr6 nach verschiedenen Wärmebehandlungen



Vergleich der verschiedenen Wärmebehandlungen

Im Umlaufbiegeversuch:



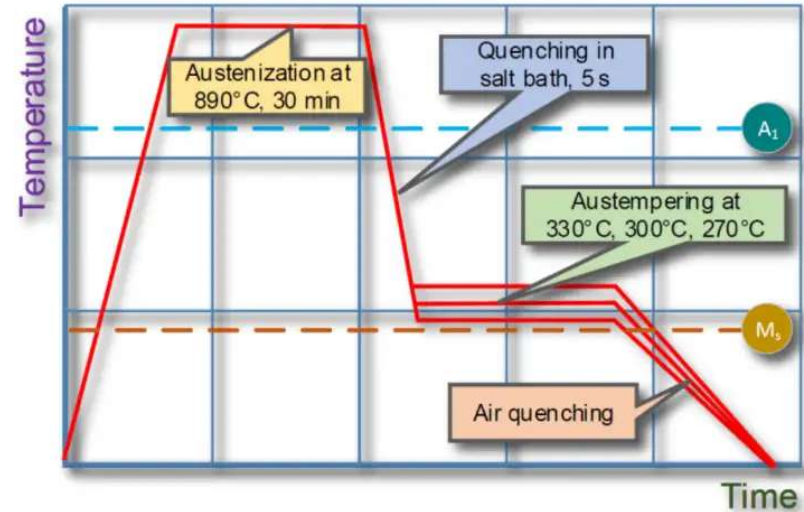
Anwendungen für bainitischen 100Cr6



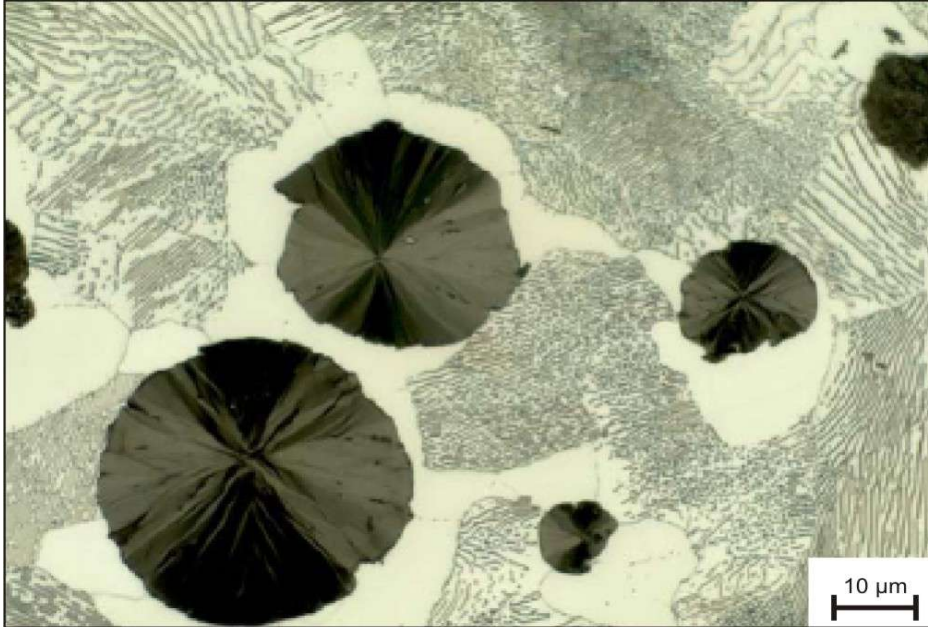
Getriebekomponenten: Zahnräder, Wälzlager, Wellen

Austempered Ductile Iron (ADI)

Gusseisen mit bainitisch-austenitischer Mikrostruktur



Ausgangsgefüge vor der Bainitisierung

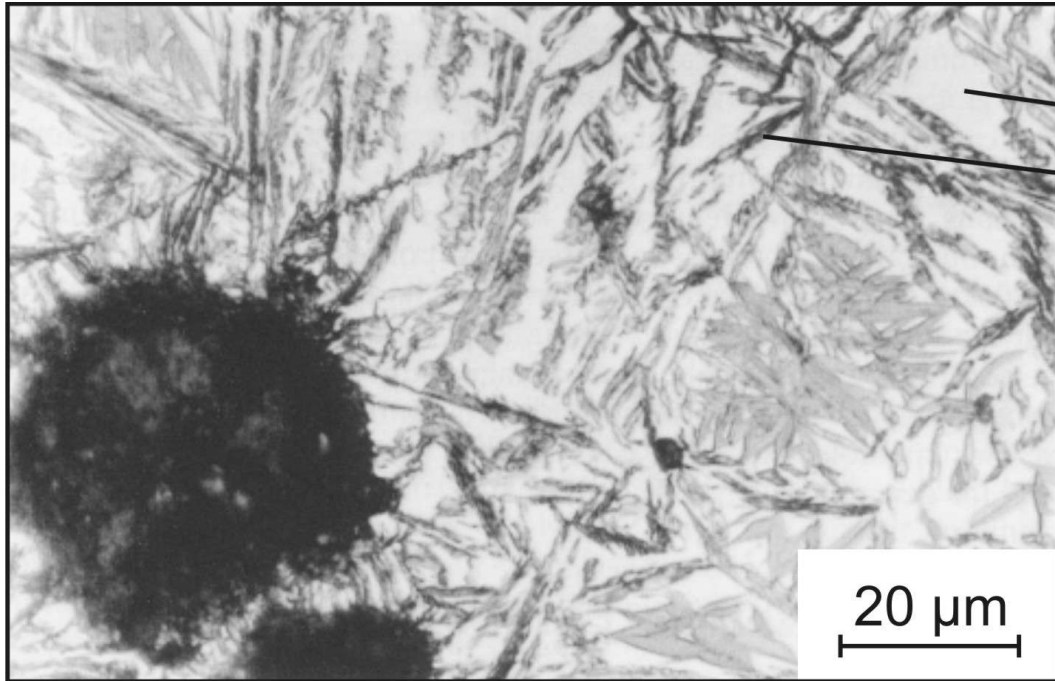


GJS 600-3

Angaben in Ma.-%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
3,6	2,21	0,16	0,07	0,063	0,291

Gefüge des Bainits des ADI

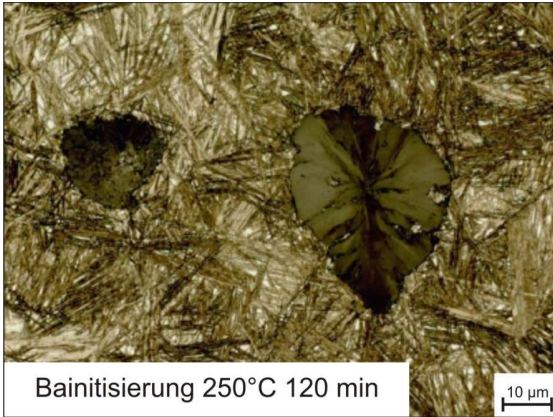


Austenit

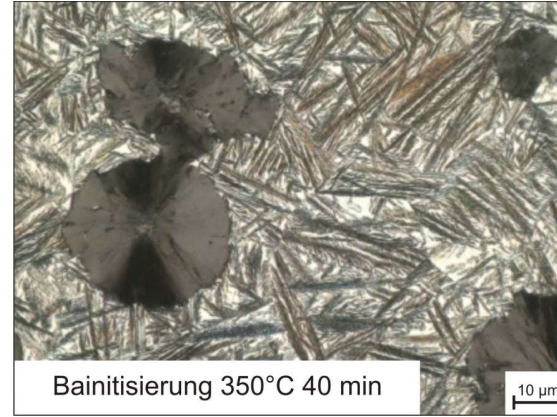
Bainitischer Ferrit

20 µm

Einfluss der Bainitisierungstemperatur



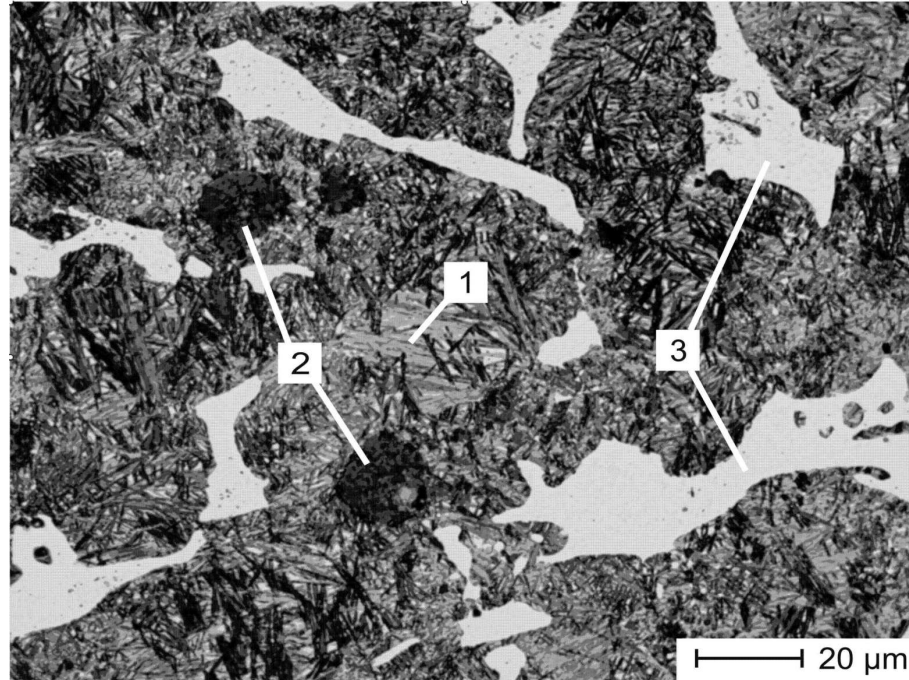
- hohe Festigkeit
- verringerter Restaustenitgehalt
- erhöhter Bainitgehalt
- niedrige Dehnung



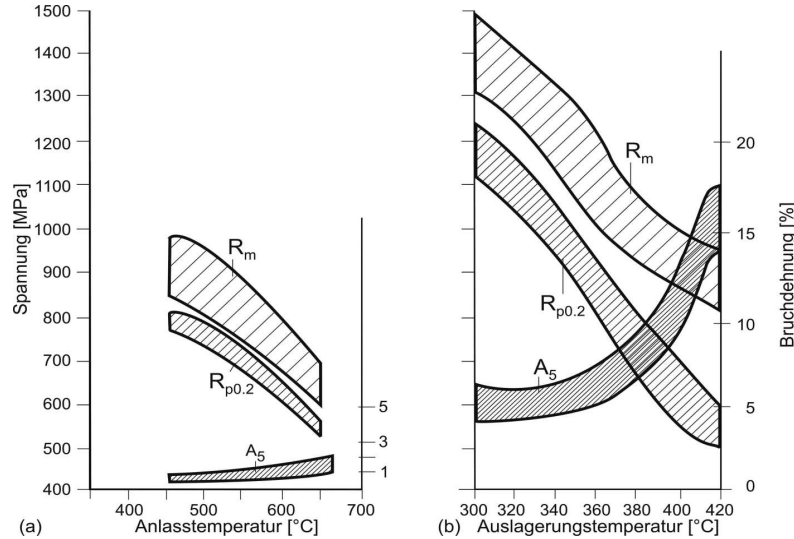
- niedrige Festigkeit
- erhöhter Restaustenitgehalt
- verringerter Bainitgehalt
- hohe Dehnung

Karbidhaltiger ADI

Lichtmikroskopische Aufnahme von karbidischem ADI: 1: Ausferrit; 2: Graphit; 3: Fe_3C



Mechanische Eigenschaften von ADI



Mechanische Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit:

(a) nach dem Härten von 900°C als Funktion der Anlasstemperatur (nach S. Hasse)

(b) nach dem Austenitisieren in Abhängigkeit von der isothermen Haltetemperatur zur Umwandlung in der Bainitstufe (nach E. Dorazil et al.)

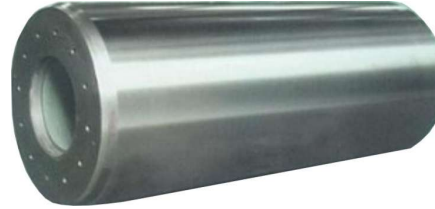
Anwendungen für ADI



Mahlkugeln



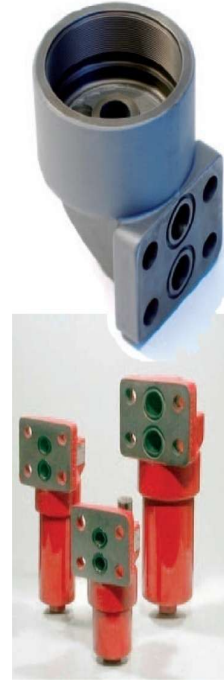
Landwirtschaftliche
Anwendungen



Mahlwalzen



Kurbelwelle



Filterköpfe
in Hydraulik-
systemen

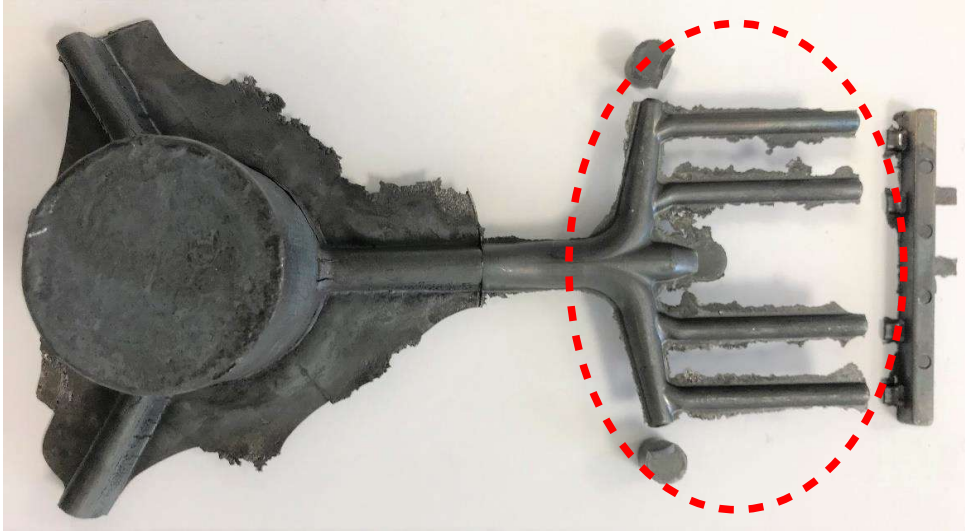


Trägerplatte und montierte Räderkassette für
einen 10-Zylinder-Dieselmotor von VW



Getriebekomponenten

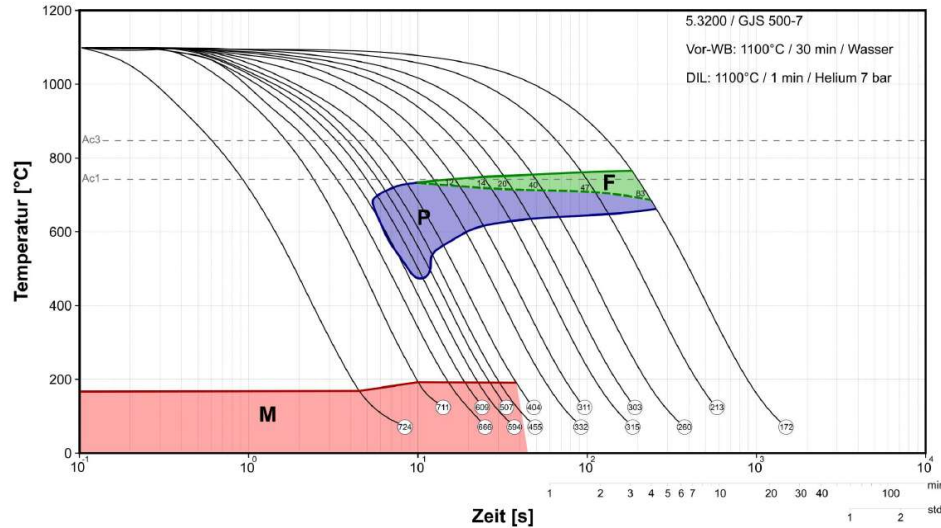
Bainitisieren von Gusseisen im Druckgussverfahren



- Herstellung dünnwandiger Bauteile auf Fe-Basis durch einen Druckgieß-Prozess
- Anschließende Bainitisierung („Austempering“) zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften (R_m & A)
- Geeignete Werkstoffgruppe: Sphäroguss (GJS)

Quelle: M.Sc. Thesis Ninnemann, RUB, 2019

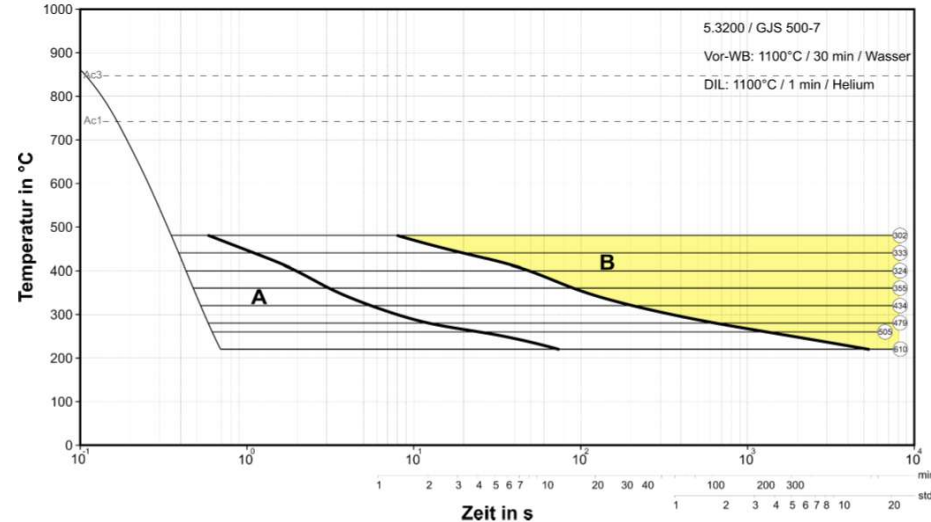
Bainitisieren von Gusseisen im Druckgussverfahren



- Analyse des Umwandlungsverhaltens mittels Abschreck-Dilatometrie anhand GJS 500-7
- Ergebnis bei kontinuierlicher Abkühlung: Bildung von Perlit (und Ferrit) ist der Bainitbildung vorgelagert
- Relativ schnelle Umwandlungskinetik führt zu erschwerter praktischer Umsetzung

Quelle: M.Sc. Thesis Ninnemann, RUB, 2019

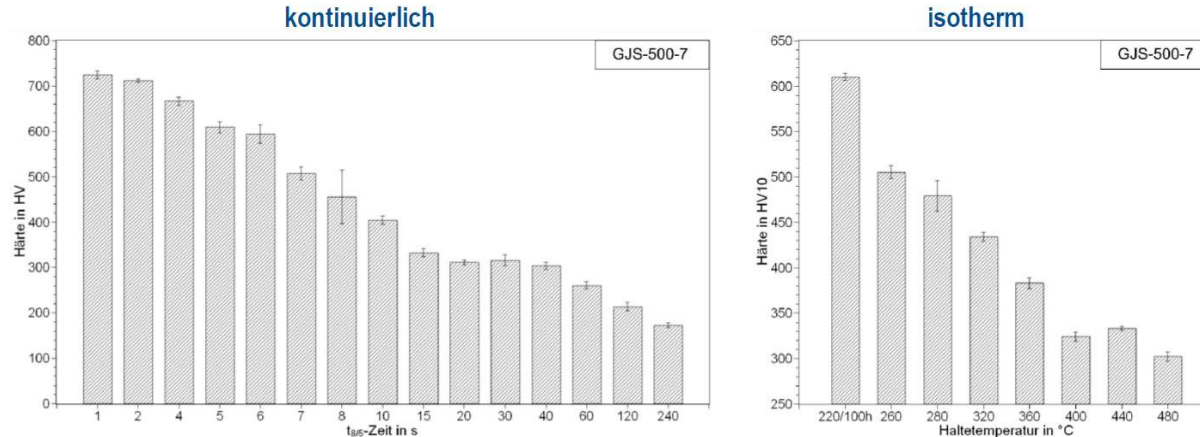
Bainitisieren von Gusseisen im Druckgussverfahren



- Ergebnis bei **isothermer** Umwandlung: Bainit tritt unterhalb von etwa 500°C auf
- Wie erwartet: Erhebliche Verzögerung der Umwandlung mit abnehmender Temperatur
- Unterere kritische Umwandlungstemperatur ist durch M_s vorgegeben (vgl. vorherige Folie)

Quelle: M.Sc. Thesis Ninnemann, RUB, 2019

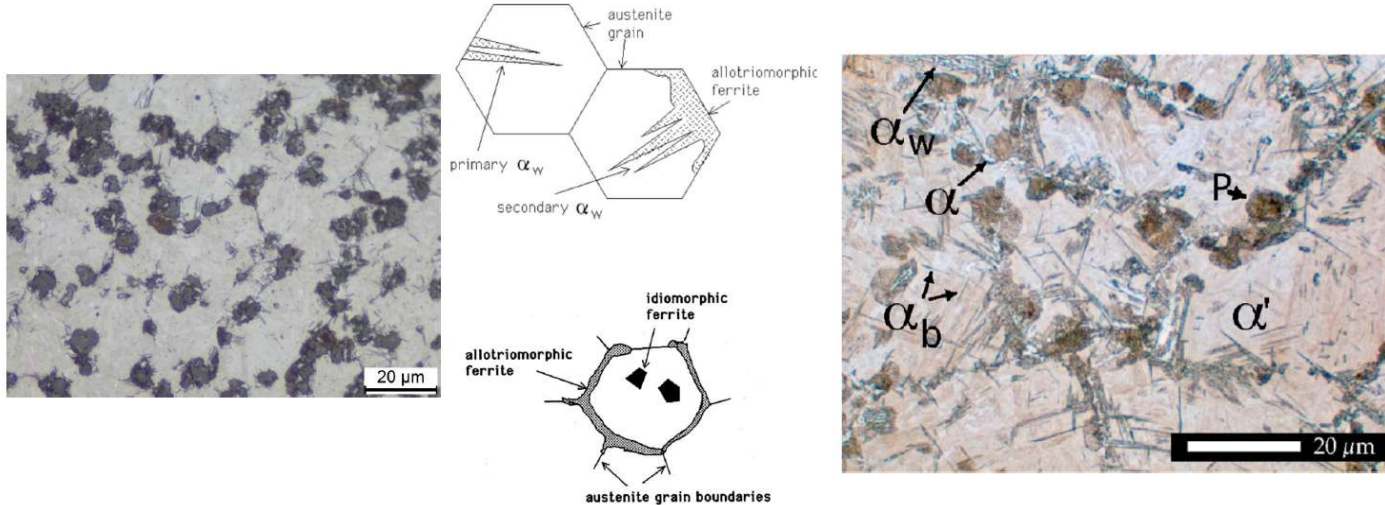
Bainitisieren von Gusseisen im Druckgussverfahren



- Gegenüberstellung der Härte (HV10) nach kontinuierlicher und isothermer Umwandlung
- $t_{8/5}$ -Zeiten beschreiben die Zeiten, die zum Durchlaufen des T-Intervalls von 800°C bis 500°C benötigt werden
- Niedrige $t_{8/5}$ -Zeiten (kontinuierlich) => Martensit !
- Isotherme Umwandlungen führen zu Bainit + Restaustenit
- Langsame Umwandlung bei T=220°C erfordert lange Umwandlungsdauer von 100h !

Quelle: M.Sc. Thesis Ninnemann, RUB, 2019

Bainitisieren von Gusseisen im Druckgussverfahren



- Bainitisierte Werkstoffe sind nie vollständig bainitisch (vgl. „Theorie der Bainitbildung“)
- Unterschiedliche Arten an Ferrit können nebeneinander auftreten, abhängig von Umwandlungsparametern
- Optimal bzgl. mechanischer Eigenschaften ist ein hoher Anteil unterer Bainit mit Restaustenit (ohne P, M)

Quelle: M.Sc. Thesis Ninnemann, RUB, 2019

Zusammenfassung

- Anwendung von Bainit für Flachprodukte und Massivwerkstoffe
- Vorteile: Teils höhere Zähigkeit im Vergleich zu angelassenem Martensit, geringerer Verzug, teils einfacher gestaltete Wärmebehandlung
- Eigenschaften stark abhängig von der Umwandlungstemperatur
- Eigenschaften des Bainit weniger abhängig vom C-Gehalt
- „Advanced Bainitic Steels“ mit vergleichsweise geringem C-Gehalt
- Wesentliche Legierungselemente: Mn & B zu Verzögerung der Perlitbildung und vergleichsweise geringer Verzögerung der Bainit-Bildung
- Begrenzung der untereren Umwandlungstemperatur durch MS
- Erhebliche Verzögerung der Umwandlung mit abnehmender Temperatur

Überprüfungsfragen

1. Was verstehen Sie unter der „Umwandlungslücke“?
2. Das Legierungselement Silizium unterdrückt die Bildung von Zementit. Welche negativen Effekte muss man jedoch beachten?
3. Welchen Vorteil bietet ein bainitisches Gefüge im Vergleich zu einem auf gleiche Härte vergüteten martensitischen Gefüge?
4. Nennen Sie typische Anwendungsbereiche bainitischer Stähle.
5. Welche Funktion hat das Element Bor?
6. Wofür steht die Abkürzung „ADI“? Wie sieht eine typische Wärmebehandlung aus?
7. Was ist mit dem Begriff „Austempering“ gemeint?
8. Wieso ist die Festigkeit des Bainit weniger abhängig vom C-Gehalt als die eines angelassenen Martensit?

Literatur

1. H.K.D.H. Bhadeshia, Bainite in Steels, Cambridge University Press, 2001
2. Dr.-Ing. Dieter Liedtke: Merkblatt 450 „Wärmebehandlung von Stahl – Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren“, Ausgabe 2005, ISSN 0175-2006
3. Dr.-Ing. P. Sommer, Dr. Sommer Werkstofftechnik, Issum: Bainitisieren - eine Maßnahme zur Einsatzoptimierung hochfester Bauteile,
http://www.werkstofftechnik.com/zeitschrift/fachartikel/sommer_wbm2002_1.pdf

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