

Die Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe

WS 2019
DR. DIETER MÜLLER

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 1

Atomarer Aufbau von Eisen

	α -Eisen	γ -Eisen
Ordnungszahl	26	
Rel. Atomgewicht (g)	55,85	
Dichte (g/cm ³)	7,875	
E-Modul (GPa)	213,55	
Therm. Ausdehnungskoeffizient α (1/K)	$12 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Atomdurchmesser d (nm)	0,2482	0,256
Gittertyp	bcc	fcc
Gitterparameter a (nm)	0,286	0,356
Atome je Einheitszelle	2	4
Atomvolumen (10 ⁻²³ cm ³)	11,77	10,81
Koordinationszahl	8	12
Oktahederrücken je EZ	6 (6/2 + 12/4)	4 (12 + 12/4)
Tetraederrücken je EZ	12 (24/2)	8
Größe der Lücken (nm) (maximaler Kugeldurchmesser)		
Oktahedr.	0,038	0,053
Tetraedr.	0,022	0,056
Temperaturbereich	912-1538°C	912-2030°C

krz (v-Fe)
a = 3,56 Å

krz (v-Fe)
a = 2,86 Å

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 4

Stähle nach DIN EN 10020:2000

Als Stahl werden Werkstoffe bezeichnet, deren Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes und im allgemeinen weniger als 2% C aufweisen und andere Elemente enthalten. Einige Chromstähle enthalten mehr als 2% C. Der Wert von 2% wird jedoch im allgemeinen als Grenzwert für die Unterscheidung zwischen Stahl und Gusseisen betrachtet.

UNLEGIERTE STAHLNACH DIN EN 10020:2000

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 5

Inhalt Block 2

- 2 Die Wärmebehandlung der Stähle
 - 2.1 Der atomare Aufbau von Eisen
 - 2.2 Einteilung und Nomenklatur der Stähle
 - 2.3 Herstellung der Stähle
 - 2.4 Qualität und Spezifikation der Stähle
 - 2.5 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
 - 2.6 Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
 - 2.6.1 Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
 - 2.6.2 Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
 - 2.6.3 Der Zwitter – Bainitbildung
 - 2.6.4 ZTA- und ZTU-Diagramme

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 2

Atomarer Aufbau von Eisen

	Gleitsystem	Zwillingssystem	Spaltsystem
krz	{110} <111> und {112} <111>	{112} <111>	{110} <100>
kfz	{111} <110>	{111} <112>	

Kristallographische Richtungen

Kristallographische Ebenen

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 3

Hauptgüteklasse unlegierte Stähle - DIN EN 10020:2000

Als unlegiert gilt ein Stahl, wenn die Gehalte der einzelnen Elemente die in der Norm angegebenen Grenzwerte nicht erreichen. Als legiert gilt ein Stahl, wenn die in der Norm angegebenen Grenzwerte (siehe unten) überschritten werden.

- > Unlegierte Qualitätsstähle
- > alle Stähle, die anders als Edelmetalle sind
- > Unlegierte Edelmetalle
 - höhere Anforderungen an Reinheitsgrad, insbesondere bezüglich nichtmetallischer Einschlüsse
 - mögliche Anforderungen:
 - Mindestwert für Kerbschlagzähigkeit
 - Einhängungstiefe oder Oberflächenhärte
 - niedrige Gehalte an nichtmetallischen Einschlüssen
 - Höchstwert für S und P < 0,020% Schmelzanalyse (< 0,025% Stückanalyse)

Grenzwerte für unlegierte Stähle aus der Schmelzanalyse (Gew.-%)										
Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo	Nb	
0,30	0,0008	0,10	0,30	0,30	0,40	0,10	1,65	0,08	0,06	
Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Sonst.	
0,30	0,40	0,10	0,60	0,10	0,05	0,10	0,30	0,05	0,10	

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 6

Inhalt Block 2

- 2 Die Wärmebehandlung der Stähle
 - 2.1 **DER ATOMARE AUFBAU VON EISEN**
 - 2.2 Einteilung und Nomenklatur der Stähle
 - 2.3 Herstellung der Stähle
 - 2.4 Qualität und Spezifikation der Stähle
 - 2.5 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
 - 2.6 Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
 - 2.6.1 Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
 - 2.6.2 Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
 - 2.6.3 Der Zwitter – Bainitbildung
 - 2.6.4 ZTA- und ZTU-Diagramme

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 3

Inhalt Block 2

- 2 Die Wärmebehandlung der Stähle
 - 2.1 Der atomare Aufbau von Eisen
 - 2.2 **EINTEILUNG UND NOMENKLATUR DER STÄHLE**
 - 2.3 Herstellung der Stähle
 - 2.4 Qualität und Spezifikation der Stähle
 - 2.5 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
 - 2.6 Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
 - 2.6.1 Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
 - 2.6.2 Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
 - 2.6.3 Der Zwitter – Bainitbildung
 - 2.6.4 ZTA- und ZTU-Diagramme

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 6

Hauptgüteklasse nichtrostende Stähle DIN EN 10020:2000

Nichtrostende Stähle enthalten

- > mindestens 10,5 % Chrom und
- > höchstens 1,2 % Kohlenstoff.

Sie werden nach folgenden Kriterien unterteilt

- > nach dem Ni-Gehalt (< bzw. \geq 2,5%)
- > nach den Haupteigenschaften in
 - korrosionsbeständige
 - hitzebeständige und
 - warmfeste Stähle.

12. November 2019 DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 8

	Hauptgüteklasse andere legierte Stähle DIN EN 10020:2000	
<p>Als legiert gilt ein Stahl, wenn die in der Norm (Folie 8) angegebenen Grenzgehalte überschritten werden. (Niedriglegierte Stähle enthalten in Summe weniger als 5% Legierungszusätze, hochlegierte Stähle mehr als 5%; diese Unterscheidung ist nicht Bestandteil der DIN EN 10020)</p> <p>Legierte Qualitätsstähle besitzen Anforderungen an z.B. Korngröße, Zähigkeit, Umformbarkeit. Sie sind im Allgemeinen nicht zum Vergüten oder Oberflächenhärten vorgesehen.</p> <p>Zu dieser Gruppe zählen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Schweißgeeignete Feinkornbaustähle ➤ Stähle für Schienen ➤ Stähle für warm- oder kaltgewalzte Flachzerzeugnisse ➤ Cu-legierte Stähle mit Cu als einzigem Legierungselement ➤ Elektroblech <p>Legierte Edelmetalle erhalten durch die genaue Einstellung der chemischen Zusammensetzung, Herstell- und Prüfbedingungen verbesserte Eigenschaften, häufig mit eingeschränkten Grenzen.</p> <p>Zu dieser Gruppe zählen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Maschinenbaustähle ➤ Stähle für Druckbehälter, ➤ Walzgerstähle ➤ Werkzeugstähle ➤ Schnellarbeitsstähle ➤ Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften 		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 13</small>

	Werkzeugstähle (DIN EN ISO 957:2001)	
<p>Werkzeugstähle sind Edelmetalle, die zum Be- und Verarbeiten von Werkstoffen wie Handhaben und Messen von Werkstoffen geeignet sind. Sie weisen eine dem Verwendungszweck angepasste hohe Härte, hohen Verschleißwiderstand und Zähigkeit auf.</p> <p>Kaltarbeitsstähle sind unlegierte oder legierte Stähle für Verwendungszwecke, bei denen die Oberflächentemperatur im Einsatz im allgemeinen unter etwa 200°C liegt. Beispiel: C45 (1.1730), X153CrMoV12 (1.2379)</p> <p>Warmarbeitsstähle sind legierte Stähle für Verwendungszwecke, bei denen die Oberflächentemperatur im Einsatz im allgemeinen über 200°C liegt. Beispiel: X38CrMoV5-1 (1.2343), 55NiCrMoV7 (1.2714)</p> <p>Schnellarbeitsstähle sind Stähle, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung die höchste Warmhärte und Anlaßbeständigkeit haben und deshalb bis zu hohen Temperaturen von rund 600°C hauptsächlich zum Zerspanen und zum Umformen einsetzbar sind. Beispiel: HSS-5-2 (1.3343)</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 13</small>

	Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027:2005)	
<p>Nomenklatorsysteme</p> <p>Kurznamen (steel names, désignation symbolique) mittels Kennbuchstaben und -zahlen (DIN EN 10027-1). Diese geben Hinweise auf wesentliche Merkmale wie:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kategorie 1: <ul style="list-style-type: none"> - Hauptanwendungsgebiet - Mechanischen Eigenschaften (Festigkeits) - Physikalische Eigenschaften • Kategorie 2: Chemische Zusammensetzung, unterteilt in vier Untergruppen <p>Jeder Stahl darf nur einen Kurznamen besitzen. Festlegung erfolgt für Stähle in Europäischen Normen (EN), Technischen Spezifikationen (TS) und Technischen Berichten (TR) vom im EC/ISS (Europäisches Komitee für Eisen- und Stahlnormung) zuständigen Technischen Komitee (TC7). Andere Festlegungen erfolgen durch die nationalen Normungsbehörden.</p> <p>➤ Neben den genannten Bezeichnungen erhalten alle in europäischen Normen enthaltenen Werkstoffe eine eigene Werkstoffnummer (DIN EN 10027-2). Auf Wunsch können auch nationale Stahlorten eine Werkstoffnummer erhalten. Zuständigkeit und Vergabe wie für Kurznamen geregelt.</p> <p>➤ Firmeneigene Bezeichnungen der Stahlhersteller (z.B. Orvar, Calmax, Dominal ...) sind in einigen Bereichen verbreitet</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 13</small>

	Wichtige Stahlgruppen - Baustahl (DIN EN 10025:2004)	
<p>Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustahl (DIN EN 10025:2004)</p> <p>Unlegierte Baustähle (DIN EN 10025-2:2004) Zählen überwiegend zu den unlegierten Qualitätsstählen. Allgemeine Baustähle sind nach ihren mechanischen Eigenschaften eingeteilt und müssen über eine gute Schweißbarkeit verfügen. In der Norm finden sich Angaben zu:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Chemischer Zusammensetzung ➤ Kohlenstoffäquivalent (Schweißbarkeit) ➤ Mindeststreckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung ➤ Kerbschlagarbeit <p>Es wird in folgende Stahlgruppen unterschieden:</p> <p>Teil 2: unlegierte Baustähle</p> <p>Teil 3: normalgeühten/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle</p> <p>Teil 4: thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle</p> <p>Teil 5: Stähle mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 11</small>

	Für eine Wärmebehandlung geeignete Stähle	
<p>Automatenstähle (DIN EN 10087:1999) Automatenstähle sind durch gute Zerspanbarkeit und gute Spanbrückigkeit gekennzeichnet. Dies wird im Wesentlichen durch hohe Massenanteile an Schwefel (>0,1%, in Verbindung mit Mn), ggf. gemeinsam mit weiteren Zusätzen, z.B. Pb, erzielt werden. Automatenstähle sind nicht schweißbar und bedingt für eine Wärmebehandlung geeignet. Beispiel: 11SMn30 (1.0715), 11SMnPb30 (1.0718), 38SMn28 (1.0706)</p> <p>Walzgerstähle (DIN EN ISO 683-17:2000) Walzgerstähle besitzen eine gute Beständigkeit bei Walzbeanspruchung und sind für eine Wärmebehandlung vorgesehen. Es wird unterschieden in:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Durchhärtende Stähle: 100Cr6 ➤ Einsatzhärtende Stähle: 18CrNiMo7-6 ➤ Induktionshärtende Stähle: C56E2 ➤ Nichtrostende Stähle: X19CrMo17 ➤ Warmharte Stähle: X82WCrV6-5-4 <p>Federstähle (DIN EN 10089:2003) Federstähle sind wegen ihrer Eigenschaften für die Herstellung von Federn geeignet. Hierzu benötigen sie eine hohe Elastizitätsgrenze, was beispielsweise durch ein Vergüten eingestellt wird. Der Bereich von 46-50 HRC wird auch als „Federhart“ bezeichnet. Zur Verbesserung der Federneigenschaften können noch Si, Mn, Cr, Mo oder V zulegiert sein. Beispiel: 61SiCr7 (1.7108), 52CrMoV4 (1.7701)</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 14</small>

	Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027-1:2005) Bezeichnung nach Festigkeit																									
<p>Alte Benennung: St + Angabe der Mindestzugfestigkeit in kp/mm² (1 kp entspricht 10 N) z.B.: St 37 = Baustahl mit einer Mindestzugfestigkeit von 37 kp/mm²</p> <p>Neue Bezeichnungen: Buchstabe für Stahlgruppe + Angabe der Streckgrenze in MPa + Zusatzsymbole für Kerbschlagarbeit, Verwendungszweck, Herstellung oder Verarbeitung z.B.:</p> <table border="0"> <tr> <td>E</td> <td>Stähle für den Stahlbau</td> <td>S235</td> <td>(= St 37 alt)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>Maschinenbaustähle</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>Stähle für Druckbehälter</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>Betonstähle</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>Stähle für Leitungsrohre</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Buchstabe für Stahlgruppe + Angabe der Zugfestigkeit in MPa z.B.:</p> <table border="0"> <tr> <td>Y</td> <td>Spannstahl (S1770)</td> </tr> <tr> <td>HT</td> <td>kaltgewalzte Flachzerzeugnisse</td> </tr> </table>			E	Stähle für den Stahlbau	S235	(= St 37 alt)	E	Maschinenbaustähle			P	Stähle für Druckbehälter			B	Betonstähle			L	Stähle für Leitungsrohre			Y	Spannstahl (S1770)	HT	kaltgewalzte Flachzerzeugnisse
E	Stähle für den Stahlbau	S235	(= St 37 alt)																							
E	Maschinenbaustähle																									
P	Stähle für Druckbehälter																									
B	Betonstähle																									
L	Stähle für Leitungsrohre																									
Y	Spannstahl (S1770)																									
HT	kaltgewalzte Flachzerzeugnisse																									
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 11</small>																								

	Für eine Wärmebehandlung vorgesehene Stähle	
<p>Vergütungsstähle (DIN EN 10083:2003) Bei den Vergütungsstählen handelt es sich bis auf wenige Ausnahmen um Edelmetalle. Vergütungsstähle sind Maschinenbaustähle, die sich aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung zum Härten eignen und im vergüteten Zustand gute Zähigkeit bei gegebener Zugfestigkeit aufweisen. Beispiele: C45 (1.1710), 42CrMo4 (1.7225), 51CrV4 (1.8159) Die Härbarkeit ist zusätzlich spezifiziert in normal (N) oder eingeschränkt in niedrige (N+) bzw. hohe Härbarkeit (N++) angegeben werden.</p> <p>Einsatzstähle (DIN EN 10084:1998) Einsatzstähle sind Stähle mit verhältnismäßig niedrigem Kohlenstoffgehalt, die für Bauteile verwendet werden, deren Randschicht vor dem Härten üblicherweise aufgekehrt oder carbonitriert wird. Solche Stähle sind nach der Behandlung gekennzeichnet durch eine Randschicht mit hoher Härte und einem zähen Kern. Beispiele: C15 (1.0401), 16MnCr5 (1.7131), 20MnCr5 (1.2162), 1.7147, X19CrNiMo4 (1.2764)</p> <p>Nitrierstähle (DIN EN 10088:2001) Nitrierstähle sind Stähle, welche über eine kontrollierte Menge an zwei oder mehr der Nitridbildner Al, Cr, Mo oder V enthalten und besonders für das Nitrieren geeignet sind. Sie werden i.d.R. im vergüteten Zustand verwendet. Beispiele: 31CrMoV9 (1.8519), 34CrAlNi7 (1.8550)</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 12</small>

	Nichtrostende Stähle (DIN EN 10088:2001)	
<p>➤ Korrosionsbeständige Stähle Korrosionsbeständige Stähle sind Stähle mit guter Beständigkeit gegen gleichmäßige oder punktuelle Korrosion durch Umgebungswirkung. Der Schutz wird bei mehr als 10,5% Cr durch spontane Bildung einer Chromoxidschicht erreicht.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ferritische: X8Cr17 (1.4016) • Martensitische: X46Cr13 (1.4034) • Ausscheidungshärtende: X19CrNiMo16-5-1 (1.4418) • Austenitische: X5CrNi18-10 (1.4301) • Austenitisch-ferritische (Duplex): X3CrNiMoN27-5-2 (1.4460) <p>➤ Hitzebeständige Stähle Hitzebeständige Stähle haben eine gute Beständigkeit gegen Oxidation und den Einfluss von heißen Gasen und Verbrennungsprodukten oberhalb von 550°C. Es bildet sich eine schützende Schicht aus Chrom-, Silizium- und Aluminiumoxid auf der Oberfläche (reduziert auch Korrosion durch Schwefel). Bei reduzierenden Atmosphären wird ein erhöhter Ni-Gehalt verwendet (geringere Kohlenstoff- und Stickstoffaufnahme, aber höherer Angriff durch Schwefel).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ferritische: X10CrAlSi7 (1.4713) • Austenitische und austenitisch-ferritische: X15CrNiSi25-21 (1.4841) <p>➤ Warmfeste Stähle Warmfeste Stähle haben eine hohe Zeitstandfestigkeit bei mechanischer Langzeitbeanspruchung oberhalb 500°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Martensitische: X22CrMoV12-1 (1.4923) • Austenitische: X3CrNiMoBN17-13-3 (1.4910) 		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 13</small>

	Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027-1:2005) Bezeichnung nach Eigenschaften	
<p>➤ Angabe der Härte: Stähle für Schienen Buchstabe für Stahlgruppe + festgelegte Mindesthärte in HB z.B.: R Stähle für Schienen R350</p> <p>➤ Angabe der Umformbarkeit: Flacherzeugnisse für Kaltumformung D + Art des Walzens (C kalt; D warmgewalzt) + 2 Ziffern zur Charakterisierung des Stahls z.B.: DC01 bis DC07 (je höher die Ziffer, desto besser die Umformbarkeit)</p> <p>➤ Angabe der magnetischen Eigenschaften: Elektroblech und -band M + Höchstzulässiger Ummagnetisierungsverlust in W/kg x 100 + Art des Erzeugnisses z.B. M400-50A</p>		
<small>Dr. Dieter Müller</small>	<small>DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE</small>	<small>Folie 13</small>

Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027-1:2005)
Bezeichnung nach chemischer Zusammensetzung

➤ **Unlegierte Stähle** mit mittlerem Mn-Gehalt < 1% (ausgenommen Automatenstähle)

C + Angabe des C-Gehaltes in Gew. % geteilt durch 100 (+Zusatzsymbole)
z.B.: C45 unlegierter Stahl mit 0,45% Kohlenstoff

➤ **Unlegierte Stähle mit einem Mittel von 2 %Mn, unlegierte Automatenstähle sowie legierte Stähle** (ausgenommen Schnellarbeitsstähle), sofern der mittlere Gehalt der einzelnen Legierungselemente <8% ist (niedrig legierte Stähle)

Angabe des C-Gehaltes in Gew. % geteilt durch 100 + chem. Kurzzeichen der Legierungselemente in abnehmender Konzentration + Konzentration der vorstehenden Elemente geteilt durch den entsprechenden Faktor

Faktoren:	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
	Ce, N, P, S	100
	B	1000

z.B.: 42CrMo4 0,42% C, 1% Cr, Zusätze an Mo
40CrMnNiMo8-6 0,4% C, 2% Cr, 1,5% Mn, 1% Ni, Zusätze an Mo

Anmerkung: früher bezog man die Grenze zwischen niedrig- und hochlegiert auf die Summe der Legierungselemente mit 5%, nach der heutigen Definition muss mindestens 1 Legierungselement über 5% liegen.
z.B. aus X32CrMoV3-3 wurde 32CrMoV12-28

Inhalt Block 2

2 Die Wärmebehandlung der Stähle
2.1 Der atomare Aufbau von Eisen
2.2 Einteilung und Nomenklatur der Stähle
2.3 HERSTELLUNG DER STÄHLE
2.4 Qualität und Spezifikation der Stähle
2.5 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
2.6 Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
2.6.1 Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
2.6.2 Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
2.6.3 Der Zwitter – Bainitbildung
2.6.4 ZTA- und ZTU-Diagramme

Stahlerzeugung - Schmelzmetallurgie

Das Diagramm zeigt den Prozess der Stahlerzeugung in Schmelzmetallurgie. Es beginnt mit den Einsatzstoffen (Eisenerz, Koks, Zuschläge) in der Reduktion (Hochofen), gefolgt von der Stahlerzeugung (Konverter, Pflaurofen) und schließlich der Sekundärmetallurgie (Strangussanlage, Blockguss). Die Prozessschritte sind: Eisenerz, Koks, Zuschläge → Hochofen → Roheisen → Konverter (L.D. oder OBM-Konverter) → Rohstahl → Pflaurofen → Strangussanlage, Blockguss / Strangguss. Zusätzliche Schritte sind die Gewinnung von Schlacke, Gasen und weiteren Produkten.

Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027-1:2005)
Bezeichnung nach chemischer Zusammensetzung

➤ **Nichtrostende und andere legierte Stähle** (ausgenommen Schnellarbeitsstähle), sofern der mittlere Gehalt mindestens eines Legierungselementes 35% ist (hochlegierte Stähle)

X (wenn der Gehalt eines Elementes mehr als 5% beträgt) + Angabe des C-Gehaltes in Gew. % geteilt durch 100 + chem. Kurzzeichen der Legierungselemente in abnehmender Konzentration + Konzentration der vorstehenden Elemente in Gew. % (+ Zusatzsymbole)

z.B.: X38CrMoV5-1 0,38% C, 5% Cr, 1% Mo, Zusätze an V
X5CrNi18-10 0,05% C, 18% Cr, 10% Ni

➤ **Schnellarbeitsstähle** HS (oder PM) + Konzentrationsangabe der Legierungselemente W, Mo, V, Co in Gew. %

z.B.: HSS-E-2 6% W, 5% Mo, 2% V
HSS-E-2-5 6% W, 5% Mo, 2% V, 5% Co

Zusätzlich enthalten Schnellarbeitsstähle ca. 0,8-0,9 % C und ca. 4 % Cr

➤ **Sonstiges**
Bei allen Kurznamen wird Guß durch ein vorangestelltes G und pulvermetallurgischer Stahl durch ein PM gekennzeichnet. Es können noch weitere Symbole zur Kennzeichnung bestimmter Eigenschaften (z.B. Erschmelzung, Umformung, Wärmebehandlungszustand ...) angehängt sein

Stahlerzeugung in Deutschland

Die Karte zeigt die geographische Verteilung von Stahlwerken in Deutschland. Eine Liste von Unternehmen ist rechts daneben aufgeführt:

- 1 ArcelorMittal Hamburg
- 2 ArcelorMittal Bremen
- 3 Barmbeler Stahl/Tube
- 4 Gießerei/Anstalt
- 5 Salzgitter
- 6 Brilonerberger Elektrostahlwerke
- 7 Henschelberger Elektrostahlwerke
- 8 ArcelorMittal Eisenhüttenstadt
- 9 ThyssenKrupp Steel Europe
- 10 Hüttenwerke Krupp Mannesmann
- 11 ArcelorMittal Ruhrort
- 12 ThyssenKrupp Nirosta
- 13 Deutsche Edelstahlwerke
- 14 Edelstahlwerke Buderus
- 15 Stahlwerke Trüdingen
- 16 ESF Elbe-Stahlwerke Forstg.
- 17 IGH Eisenhütte
- 18 Dillinger Hütte
- 19 Saarstahl
- 20 Badische Stahlwerke
- 21 Lech-Stahlwerke

Die Hochofenlinie

Das Flussdiagramm zeigt den Materialfluss in der Hochofenlinie: Eisenerz, Koks, Wind, Zuschläge → Hochofen → Roheisen → Konverter (L.D. oder OBM-Konverter) → Rohstahl → Pflaurofen → Strangussanlage, Blockguss / Strangguss. Nebenprodukte sind Gicht, Schlacke, Schlacke, Gase und Schlacke.

Bezeichnung der Stähle (DIN EN 10027-2:1992)
Werkstoffnummern

X.XXXX(X)

1. Stelle: Werkstoffgruppe (1.XXXX sind Stähle)
2. und 3. Stelle: Stahlgruppennummer
4. und 5. Stelle: Zählr. für die einzelnen Stähle
6. und 7. Stelle: weitere Zählnummern (bei Bedarf)

Beispiel für Stahlguppen

20	Cr-Stähle	35	Wälzlagerstähle
23	Cr-Mo, Cr-Mo-V	ab50	Bausstähle
24	W, Cr-W	70	Cr-haltig
27	Ni-haltig	72	Cr-Mo
32	Co-haltige Schnellarbeitsst.	85	Nitrierstähle
33	Co-freie Schnellarbeitsstähle		

Beispiele:
1.2345 ist X38CrMoV5-1; 1.7225 ist 42CrMo4
Gleiche Stähle können je nach Verwendungsgruppe unterschiedliche Werkstoffnummern besitzen.
z.B. 1.2067 und 1.3505 ist 100Cr6

Stahlerzeugung

Rohstahlerzeugung in Deutschland nach Verfahren

Das Diagramm zeigt die Entwicklung der Rohstahlerzeugung in Deutschland von 1950 bis 2010. Die Y-Achse zeigt die Erzeugung in Mio. t, die X-Achse das Jahr. Die Legende enthält: Hochofenerzeugung gesamt, SM-Verfahren, Thoma-Verfahren, Elektrostaht-Verfahren, Argon-Strangguss, Sauerstoff-Verfahren.

Stahlerzeugung - Hochofenprozess

Das Diagramm zeigt den Hochofenprozess mit den Stoffströmen und chemischen Vorgängen. Von oben: Kamin, Wind, erhitze, Gicht, gas, Hochofen, Gicht, verschluse. Von unten: Pflaurofen, Schlacke, Rohstahl, Blockguss, Strangguss. Chemische Reaktionen sind: FeO + 3 C → 3 Fe + 3 CO, FeO + 4 C → 3 Fe + 4 CO, FeO + 3 CO → 2 Fe + 3 CO2, FeO + 4 CO → 3 Fe + 4 CO2, 2 C + O2 → 2 CO, C + O2 → CO2, CO2 + C → 2 CO.

Hochofen

Hochofenabstich

Quelle: FH Eimshorn

Stahlerzeugung - Elektrolichtbogenofen

Quelle: FH Eimshorn

Stahveredelung

Quelle: FH Eimshorn

Stahlerzeugung - Konverter

Zusammensetzung von Roheisen: 90 bis 95% Eisen

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
4%	0,4%	1%	2%	0,1%

chemische Vorgänge im Konverter:

Verbleiben der Eisenlegierstoffe:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$4P + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5$$

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$$

$$Mn + O_2 \rightarrow MnO_2$$

Verbleiben geringe Mengen von Eisen:

$$4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$$

Zusammensetzung von Stahl (z. B. S 235 JR)

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
0,2%	0,04%	0,8%	0,05%	0,03%

Quelle: FH Eimshorn

Elektrolichtbogen

Quelle: FH Eimshorn

Strangguss

Quelle: FH Eimshorn

Konverter

Quelle: FH Eimshorn

Stahlerzeugung - Sekundärmetallurgie

Vakuumbehandlung: Verringerung des Gehaltes an gelösten Gasen

Absaugen, Vakuum, entgasender Strahl, Hebergas, Fördergas, zu entgasende Stahlschmelze

Pfannenbehandlung: Verringerung des Schwefelgehaltes

Entschwefeln: Einblasrohr, Kalk, Schlacke

Spülgasbehandlung: Schlacke, Spülgas, Argon

Quelle: FH Eimshorn

Strangguss

Quelle: FH Eimshorn

Kokillen- / Blockguss

Steigender Guss, Ober-guss, Kokille, abgezogene Kokille, erstarrter Stahlblock

Quelle: FH Elmshorn

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 37

Vakuum-Lichtbogenofen mit verzehrender Elektrode (VAR)

Vorteile:

- Optimale Blockstruktur
- niedrigste Gasgehalte
- gleichmäßige Verteilung verbleibender Einschlüsse
- hohe Isotropie

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 40

Mikroseigerungen – Herstellung Halbzeug

ESU-Qualität, Konventionell + gegülht, Konventionell + gewalzt

ISO/DC G max. : G min. < 1,3 M0 max. : M0 min. < 1,25

ISO/DC G max. : G min. < 1,15 M0 max. : M0 min. < 1,4

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 43

Elektroschlack-Umschmelzen (ESU)

Vorteile:

- Optimale Blockstruktur
- niedrigster Schwefelgehalt
- höchster Reinheitsgrad (nichtmetallische Einschlüsse)
- hohe Isotropie

Ausgangs-Stahlblock, gekühlte Kokille, Um-schmelz-Schlacke, Licht-bogen, umge-schmolzener Stahlblock

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 38

Stahlerzeugung Vorteile Sonderschmelzverfahren

Problem bei konventioneller Technologie

- Verunreinigungen (Anzahl, Typ)
- „Reinheitsgrad“
- Erstarrungsstruktur zu grob- inhomogen
- „Seigerungen“
- Kritische chemische Zusammensetzung (Ti, Al, C, H)

Beeinflusste Gebrauchseigenschaft

- Ermüdungs-Festigkeit
- Polierbarkeit
- Zerspanbarkeit
- Umformbarkeit
- Isotropie

Alternatives Herstellverfahren

Vakuum-schmelzen (DESU), ESU, Pulvermetallurgie, VLBO

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 41

Umformung

Warmumformung, Wärmebehandlung – Fertigstellung / Prüfung

Schmiedepresse, Langschmiedemaschine, Blockwalzwerk, Mehrlinienwalzwerk

Bearbeitung, Werkstoffprüfung, Lager, Versand

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 42

Druck-Elektroschlack-Umschmelzen (DESU)

Vorteile:

- Alle Vorteile des ESU
- Einstellung der Legierungszusammensetzung möglich
- Zusätzlich Zulegieren von N möglich (bis 0,8%)

Druck-Eichtung / Pressure sealing, Oberkopf / Furnace head, Zwischenbohle / Extension chamber, Elektrodenstange / Quade mit Ni, Al; 0,2 – 10 bar, Legierungr-Zuglegier / Alloy feeder, Pin / Stab, Elektrode / Electrode, Stromquelle / Power supply, Standkammer / Static mould, Schacke / Slag, Fließendes Metall / Liquid metal, Block / Ingot

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 39

Makroseigerungen in einem Knüppel

ESU-Qualität, Konventionell Geschmiedet+ gegülht, Konventionell gewalzt

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 42

Weiterverarbeitung des Stahls zu Halbzeug

- Umformung des erschmolzenen Stahls:
 - Walzen (flach, rund, Profil)
 - Ziehen
 - Schmieden
- Wärmebehandeln
 - Glühen
 - Vergüten
- Schälen
- Fräsen, Schleifen, Präzisionsflachstahl

Quelle: Bohler Edelstahl

Dr. Dieter Müller DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 45

Herstellung von PM-Stählen

Quelle: Böhrler Edelstahl

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 40

Mikrogefüge

pulvermetallurgisches Material: Fein und gleichmäßig angeordnete Karbide.

konventionell erschmolzenes Material: Große und zellig angeordnete Karbide.

Quelle: Böhrler Edelstahl

voestalpine eifeler Coating GmbH

voestalpine

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 40

Idealer / realer Werkstoff

Eigenschaften sind unabhängig von

- Geometrie
- Ort
- Richtung

→ **Isotropie**

Aber viele Werkstoffe haben

- Querschnittsabhängige Eigenschaften
- Unterschiedliche Eigenschaften Oberfläche/Kern
- Vorzugsrichtungen

→ **Anisotropie**

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 50

Pulververerdung

Pulververerdung mit

- Gas (Stickstoff, Edelgas)
- Wasser
- Flüssiggas

Quelle: Böhrler Edelstahl

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 47

Vorteile der PM-Stähle

Gleichmäßigkeit der Eigenschaften (Isotropie)
Keine Gefügeunterschiede über dem Querschnitt
Gleichmäßig fein verteilte Karbide
Sehr gute Zähigkeitseigenschaften bei hoher Härte
Geringe Richtungsabhängigkeit

„Gute“ Bearbeitbarkeit

Herstellung (Design) einer optimierten Zusammensetzung
Höhere Karbidanteile als durch Schmelzmetallurgie möglich
Lokal optimierte Zusammenstellung der Legierungskomponenten möglich

Nachteile
Kostenintensive Herstellung

Quelle: Böhrler Edelstahl

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 50

Einfluss der Erstarrung

Verteilung der eutektischen Karbide im konventionellen Gußblock

Quelle: Böhrler Edelstahl

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 50

Makrosegierungen

Schmelzmetallurgischer Stahl

PM-Stahl

Quelle: Böhrler Edelstahl

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 48

Inhalt Block 2

- Die Wärmebehandlung der Stähle
 - Der atomare Aufbau von Eisen
 - Einteilung und Nomenklatur der Stähle
 - Herstellung der Stähle
 - QUALITÄT UND SPEZIFIKATION DER STÄHLE**
 - Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
 - Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
 - Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
 - Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
 - Der Zwitter – Bainitbildung
 - ZTA- und ZTU-Diagramme

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 51

Anisotropie durch Erstarrung

Schmelze mit Konzentration C_1 kühlt ab. Bei T_1 bilden sich in der Schmelze α -Mischkristalle der Konzentration C_1 .

Bei weiterer Abkühlung reichert sich die Restschmelze durch den Verlust an A-Atomen mit B-Atomen an. Der sich bildende α -Mischkristalle reichert mit sinkender Temperatur mehr B-Atome bis zur Konzentration C_2 ein.

Bei T_2 kommt es zur eutektischen Erstarrung der Restschmelze.

Ergebnis ist ein Gefüge mit anisotropen Eigenschaften im Mikro- und Makrobereich

DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 54

Anisotropie durch Erstarrung

outer equiaxed zone
inner equiaxed zone
columnar zone

Quelle: MPA Stuttgart

Normen und Richtlinien zur Beurteilung der Stahlqualität

DIN 50600: Prüfung metallischer Werkstoffe; Metallographische Gefügebilder, Abbildungsmaßstäbe und Formate

DIN 50602: Mikroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen

DIN EN ISO 643: Mikrophotographische Bestimmung der scheinbaren Korngröße (ASTM-Richtreihen)

SEP 1520: Mikroskopische Prüfung der Carbidausbildung in Stählen mit Bildreihen

SEP 1572: Mikroskopische Prüfung von Automatenstählen auf sulfidische nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen

SEP 1575: Ermittlung des Streckungsgrades von nichtmetallischen Einschlüssen in sulfidischer Form

SEP 1614: Mikroskopische Prüfung von Warmarbeitsstählen

SEP 1615: Mikroskopische und makroskopische Prüfung von Schnellarbeitsstählen auf ihre Karbidverteilung mit Bildreihen

Korngrößenbestimmung

ASTM-Richtreihen
ASTM E 19-46: Austenitkorngröße
ASTM E 89-52: Ferritkorngröße
Entspricht SEP 1510-61

Z = Anzahl der Körner in einem Quadratroll bei 100-facher Vergrößerung
N = Richtreihennummer
ASTM Korngrößenkala: $Z=2^{N-1}$
Die ASTM-Korngröße Nr.1 gibt also ein Korn an, dessen Querschnitt bei 100-facher Vergrößerung ein Quadratroll beträgt

ASTM-Nr.	Stärke in μm^2	Stärke in mm^2	Rechenwert in μm^2
1	1	1	10000
2	2	2	5000
3	4	4	2500
4	6	6	1585
5	10	10	1000
6	16	16	625
7	25	25	400
8	40	40	250

Für Stähle: N=5 grobkörnig
N=5 feinkörnig

Quelle: MPA Stuttgart

Anisotropie durch Umformung

Ferrit-Perlitzelligkeit

Korngrößenunterschiede durch unterschiedliche Umformgrade nach dem Rekristallisationsglühen

Quelle: TU München

Nichtmetallische Einschlüsse (DIN 50602:1985)

Bildreihentafel
Es wird unterschieden in:

- SS: Sulfidische Einschlüsse in Strichform
- OA: Oxidische Einschlüsse in aufgelöster Form (Al-Oxide)
- OS: Oxidische Einschlüsse in Strichform (Silikate)
- OC: Oxidische Einschlüsse in globularer Form

Bestimmung des Reinheitsgrades
Verfahren M:
Mindestens 200 mm^2 müssen ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgt anhand der größten erkennbaren Einschlüsse.

Verfahren K:
Mindestens 100 mm^2 sind auszuwerten. Erfasst werden alle Einschlüsse ab einer festgelegten Größe. Diese werden nach Größe gewichtet und summiert. Dieser Wert liefert einen guten Anhaltswert für die Reinheit des Stahles.

Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1520-1998

Kennzahl der Reihe (Merkmalart)

Kennzahl der Stufe	1 Ferritanteil	2 Carbidgröße	3 Carbidnetzwerk	4 Carbidzeitigkeit
0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,3	0,3	0,3	0,3
5	0,5	0,5	0,5	0,5
9	0,9	0,9	0,9	0,9

100:1 Vergrößerung 1000:1 200:1 100:1

Anisotropie durch „Verunreinigung“

Nichtmetallische Einschlüsse

- Oxide
- Sulfide
- Phosphorseigerungen

Metallische Gefügebestandteile

- α -Phase
- Delta Ferrit
- Vorlegierungen
- Randentkohlung ...

Korngrößenbestimmung

Linienchnittverfahren

Richtreihen

Flächenzählverfahren

$\phi = 70,8 \text{ mm}$
 $A = 1000 \text{ mm}^2$

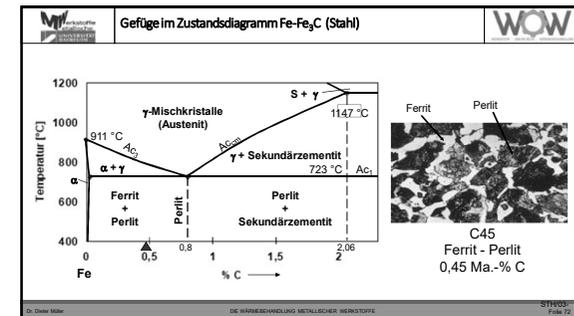
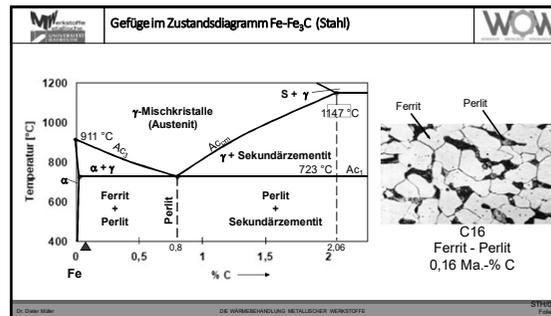
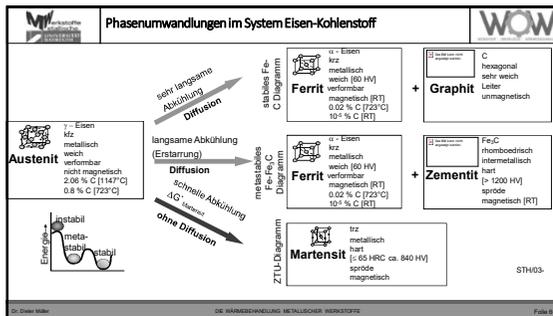
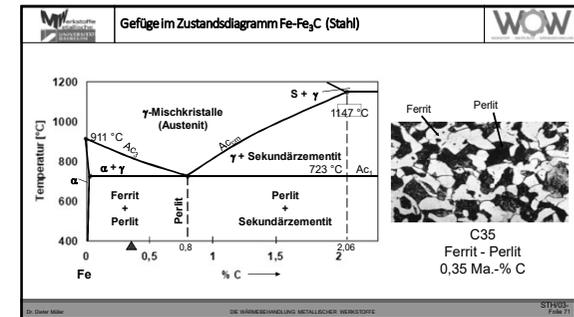
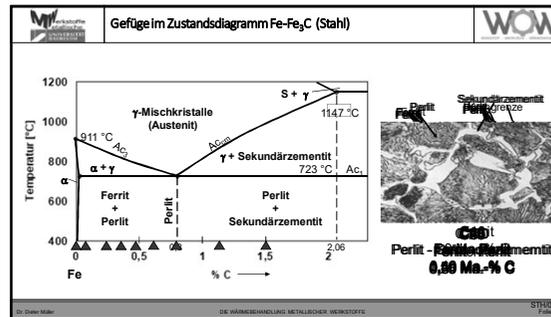
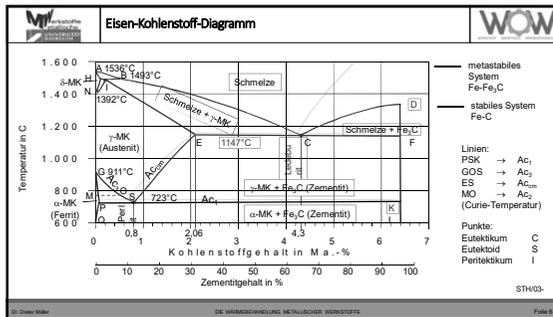
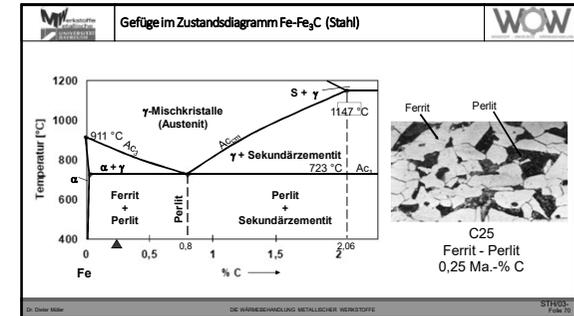
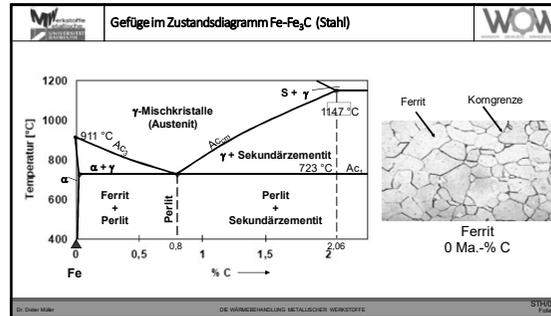
Richtreihe für das Gefüge von Warmarbeitsstahl nach SEP 1614

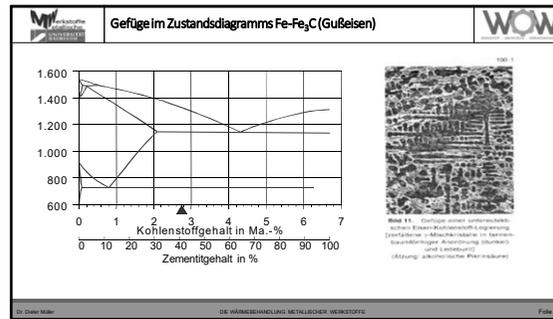
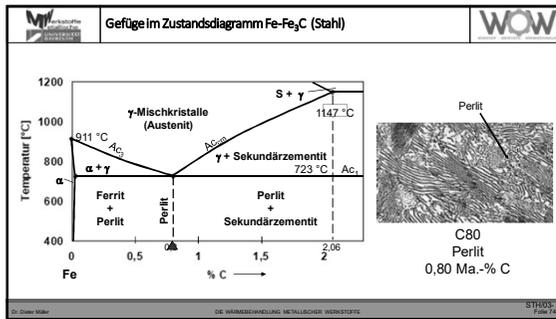
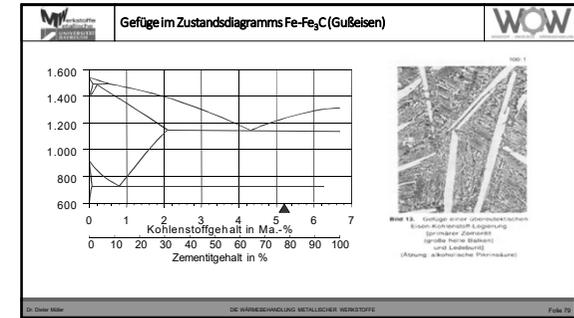
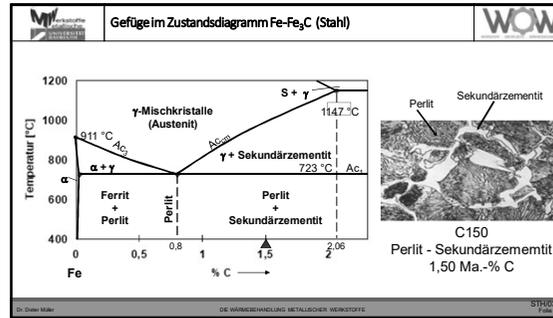
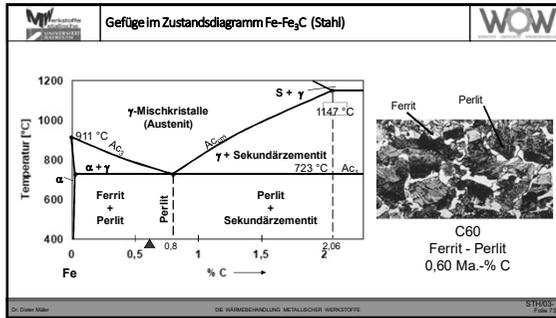
Beispiele zur Bewertung der Gefüge von gegläubten Warmarbeitsstählen

	GA	GB	GC	GD	GE	GF
1	GA1	GB1	GC1	GD1	GE1	GF1
2	GA2	GB2	GC2	GD2	GE2	GF2
3	GA3	GB3	GC3	GD3	GE3	GF3
4	GA4	GB4	GC4	GD4	GE4	GF4
5	GA5	GB5	GC5	GD5	GE5	GF5

Quelle: MPA Stuttgart

Inhalt Block 2	
2	Die Wärmebehandlung der Stähle
2.1	Der atomare Aufbau von Eisen
2.2	Einteilung und Nomenklatur der Stähle
2.3	Herstellung der Stähle
2.4	Qualität und Spezifikation der Stähle
2.5	DAS ZUSTANDSSCHAUBILD EISEN-KOHLENSTOFF
2.6	Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung
2.6.1	Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung
2.6.2	Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
2.6.3	Der Zwitter – Bainitbildung
2.6.4	ZTA- und ZTU-Diagramme

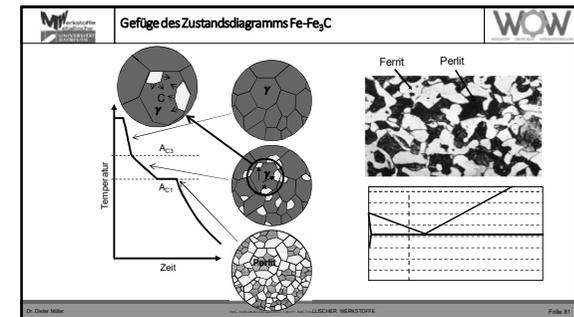
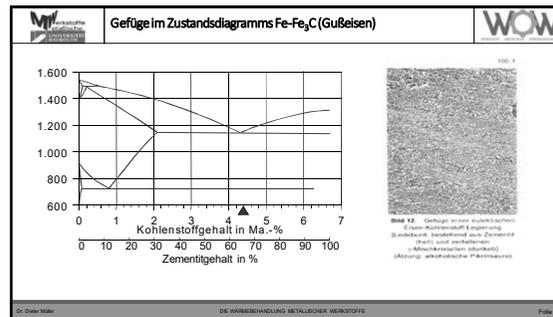
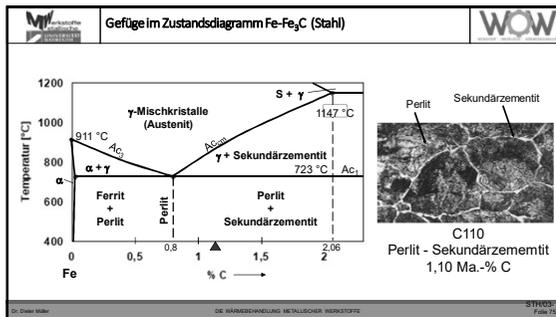




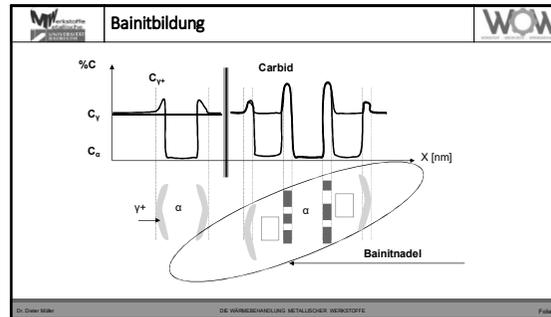
Inhalt Block 2

- 2 Die Wärmebehandlung der Stähle
- 2.1 Der atomare Aufbau von Eisen
- 2.2 Einteilung und Nomenklatur der Stähle
- 2.3 Herstellung der Stähle
- 2.4 Qualität und Spezifikation der Stähle
- 2.5 Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff
- 2.6 ATOMARE VORGÄNGE BEI DER GEFÜGEBILDAUNG**
- 2.6.1 DIFFUSIONSGESTEUERTE UMWANDLUNG – FERRIT-UND PERLITBILDUNG**
- 2.6.2 Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung
- 2.6.3 Der Zwitter – Bainitbildung
- 2.6.4 ZTA- und ZTU-Diagramme

Dr. Dieter Mahr DE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE S11403-Folie 80



Inhalt Block 2		WOW
2	Die Wärmebehandlung der Stähle	
2.1	Der atomare Aufbau von Eisen	
2.2	Einteilung und Nomenklatur der Stähle	
2.3	Herstellung der Stähle	
2.4	Qualität und Spezifikation der Stähle	
2.5	Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff	
2.6	Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung	
2.6.1	Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung	
2.6.2	Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung	
2.6.3	DER ZWITTER – BAINITBILDUNG	
2.6.4	ZTA- und ZTU-Diagramme	



Inhalt Block 2		WOW
2	Die Wärmebehandlung der Stähle	
2.1	Der atomare Aufbau von Eisen	
2.2	Einteilung und Nomenklatur der Stähle	
2.3	Herstellung der Stähle	
2.4	Qualität und Spezifikation der Stähle	
2.5	Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff	
2.6	Atomare Vorgänge bei der Gefügeumwandlung	
2.6.1	Diffusionsgesteuerte Umwandlung – Ferrit- und Perlitbildung	
2.6.2	Diffusionslose Umwandlung – Martensitbildung	
2.6.3	Der Zwitter – Bainitbildung	
2.6.4	ZTA- UND ZTU-DIAGRAMME	

