

Stahl

– Technische Produkte –



Caroline Röhr
AGP-Begleit'vorlesung' (AC-III)

26. November 2025

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie


Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

Metalle: Eigenschaften und Anwendungen

- ▶ Element(kombinationen): $A2+A2(+A2...)^1 + C$
- ▶ Konstruktions-Werkstoffe: 99.95 % aller primär erzeugten Metalle/Legierungen
 - ▶  Graphik von Agenda World Economic Forum
- ▶ Stahl, Stahl, Stahl (1.9×10^6 t/a)... für
 - ▶ Bau/Architektur (ca. 52 %)
 - ▶ Maschinenbau (17 %)
 - ▶ Verkehr, Automobilbau (17 %)
 - ▶ Verfahrenstechnik
 - ▶ ...
- ▶ \mapsto Metallurgie (Eisen- und Stahlherstellung) ³
- ▶ \mapsto Metallographie (Werkstoffkunde, Angewandte anorganische Festkörperchemie, AGP)

Metall	t (Welt/a) ²
Fe	2.995.000.000
Al	70.000.000
Mn	55.600.000
Cr	37.200.000
Cu	20.000.000
Zn	12.000.000
Ti	9.500.000
Pb	4.000.000
Ni	2.200.000
Sn	290.000
<i>Ln</i>	29.000
Re	58
Erzmenigen	

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

¹: s. AC-III v. 29.10.2025; ²: 2023, nur Primär; ³: Ergänzung zu AC-II-Vorlesung

Struktur↔Eigenschafts-Bezug bei metallischen Werkstoffen

Stahl

C. Röhr

- ▶ kristallin ↔ Kristallchemie relevant
- ▶ reine, häufige, einfach herstellbare, luftstabile Metalle ↔ keine optimalen mechanischen Eigenschaften (s.u.)
 - ▶ reines Fe: spröde, rostend
 - ▶ reines Cu, Al: sehr duktil
- ▶ ↔ Legierungen mehrerer Elemente, interstitielle 'Carbide'
- ▶ starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Gefüge
 - ▶ Multiparameterraum durch mechanische und/oder thermische Umformprozesse
 - ▶ Versuche, Versuche, Versuche (viel Empirisches ↔ 'Ingenieur-Kunst')
 - ▶ Voraussage/Berechnung schwierig
- ▶ aber praktisch EXTREM WICHTIG
 - ▶ Normungen (s. 'Stahlschlüssel'¹)
- ▶ Dimensionen (+ Untersuchungsmethoden)
 - ▶ idealer Einkristall: pm (Röntgenbeugung)
 - ▶ Baufehler: pm bis nm (TEM)
 - ▶ Gefüge μm bis mm (optische Mikroskopie, Mikrogramme)
- ▶ Beispiel für ein Gefügebild

 1.0038, S235JR (Baustahl)

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammenfassung

Kriterien für die Auswahl metallischer Werkstoffe

- ▶ **Produktion: Generelle/wirtschaftliche Kriterien**
 - ▶ Verfügbarkeit, Möglichkeiten und Kosten der Reduktion (Metallurgie)
 - ▶ Wiedergewinnung, 'Recycling', *E*-Einsatz, Umweltverträglichkeit
- ▶ **Schmelzpunkte, thermisches Verhalten** (L: Phasendiagramme)
 - ▶ Schmelzverarbeitung (inkl. Gefügeeinstellung)
 - ▶ Umformen: Giessen und Schweißen (Druckgiessen, Formenguss, Sandgiessen, Kokillengruss, Stranggiessen), Erodieren, Löten
 - ▶ Anwendung
- ▶ **Korrosionsfestigkeit, chemische Beständigkeit**
 - ▶ häufig reine Oberflächeneigenschaft (s. Al, Mg)
 - ▶ speziell im Apparatebau (H-Versprödung etc.)
 - ▶ Toxizität, Umweltverträglichkeit
- ▶ **weitere physikalische Basis-Eigenschaften**
 - ▶ Dichte
 - ▶ Wärme- und elektrische Leitfähigkeit
 - ▶ Magnetismus
- ▶ **mechanische Eigenschaften** (für Umformung und Anwendung)
 - ▶ Steifigkeit, Härte, Dehnbarkeit, ...
 - ▶ 'Umformbarkeit' (Ziehen, Walzen, Pressen, Schmieden)
 - ▶ Zerspanbarkeit (Drehen, Fräsen)
- ▶ **?? Kenngrößen ??**
 - ▶ technisch (aus Spannungs-Dehnung-Kurve): Zähigkeit, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung ... ↓
 - ▶ abhängig zusätzlich von *T* ('Warmfestigkeit'), *t* ('Kriechen'), *ν* Frequenzen ('Dauerschwingfestigkeit')

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

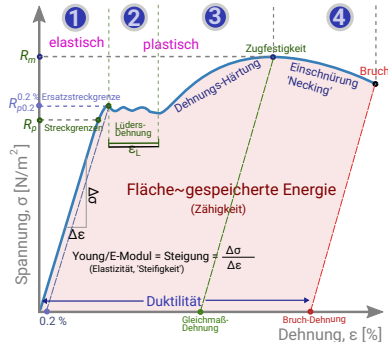
Zusammenfassung

Messung: technische Spannungs-Dehnungs-Kurve

- ▶ Zugversuch
- ▶ typische technische Spannungs-Dehnungs-Kurve für duktile Materialien ⇒
- ▶ Bereiche:
 - ① HOOK-B.: elastisches Verhalten
 - ② LÜDERS-B.: plastisches Verhalten
 - ③ Gleichmassdehnungs-B.: Dehnungs-Härtung
 - ④ Einschnür-B. ('Necking')
- ▶ Übergangspunkte/Steigungen
 - ↪ technische Kenngrößen für mechanische Eigenschaften

🔗 gute Erklärung

🔗 Erklär-Video



Kenngröße	Al (rein)	Stahl (1.4301)
E [GPa]	69	200
$R_{p0.2}$ [MPa]	40	190
R_m [MPa]	75-110	500-700
A (Bruch-Dehnung) [%]	25	45
HBW^2	22-35	215

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

¹ 1 MPa = N/mm^2 = 0.001 GPa = 10 bar (1 kg/mm^2); ² BRINELL-Härte

- ▶ Produktionsprozesse (D und weltweit)
 - ▶ 70 %: Hochofen (BF, Blast furnace)
 - ▶ 30 %: Elektrostahl (EAF, Electric Arc Furnace)
- ▶ hoher Energieverbrauch (Kohle, Strom)
- ▶ CO₂-Anfall (insgesamt: 11 % der globalen CO₂-Emission)
 - ▶ BF: 1880 kg/t
 - ▶ EAF: 400 kg/t (variabel durch Schrott-Anteil)
 - ▶ DRI: 990 kg/t (bei Erdgas-Betrieb)
- ▶ Produktion
 - ▶ ca. 40 % Recycling
 - ▶ Hauptproduzenten: China, Indien, Japan, US, Russland, Südkorea, D
 - ▶ Preis: 900 \$/t
 - ▶ 1900 · 10⁶ t/a (Welt); 44 · 10⁶ t/a (Deutschland)
(seit ca. 5 Jahren konstant)
 - ▶ keine Konzentration auf einzelne Hersteller
- ▶ viele weitere Zahlen
 - ▶ [world-steel-in-figures](#)
 - ▶ [globalenergymonitor.org](#)

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Stahlerzeugung im Rennofen (1556)¹

Eisenerze von besonderer Güte werden in einem Ofen erschmolzen, der einem Treibofen nicht unähnlich ist. Der Herd ist 3 1/2 Fuß hoch und je 5 Fuß lang und breit. In seiner Mitte besitz er eine Vertiefung (Siegel) von 1 Fuß Tiefe und 1 1/2 Fuß Durchmesser.

Wenn der Meister (auch Kenner genannt) zu diesem Zwecke sein Werk und seine Arbeit beginnt, wirft er zunächst Holzkohlen in den Siegel und streut dann über diese eine eiserne Schaufel voll zerkleinertes Erz, gemischt mit Kalk, der noch nicht mit Wasser abgelöscht worden ist.

zur PSA:

Damit ihm die Glut des Feuers das Gesicht nicht verbrenne, wie es leicht geschehen kann, bedeckt er es vollständig mit einer Filzkappe mit Löchern, durch die er hindurchsehen und atmen kann.

Weiterlesen im Original lohnenswert ¹



Der Herd A. Der Beschickungshaufen B. Der Schlackenabfluß C. Der Eisenklumpen (Masse) D. Die Holzhämmer E. Der große eiserne Hammer F. Der Amboss G.

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

¹ G. Agricola, *De re metallica libri XII; Zwölf Bücher zum Berg- und Hüttenwesen*, S. 366, deutsche Übersetzung (1928)

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

① Einleitung: Metalle als Werkstoffe

② Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

③ Metallographie: Stähle als Werkstoffe

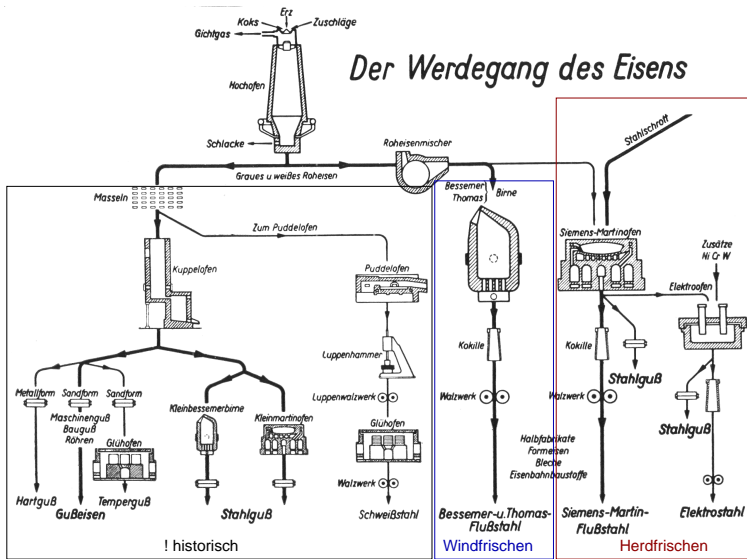
Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

④ Zusammenfassung und Literatur

Übersicht (historisch)



Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Rohstoffe (pro t Roheisen)

- ▶ **Erze** (ca. 2 t)
 - ▶ Roteisenstein (Hämatit, Fe_2O_3)
40-65 %Fe
 - ▶ Magneteisenstein (Magnetit, Fe_3O_4)
45-70 %Fe
- ▶ **Kohle bzw. Koks** \Rightarrow Kokerei (1 t)
- ▶ **Zuschläge** ('Möller') ($\frac{1}{2}$ t)
 - ▶ Kalk (bei 'saurem' Gestein, d.h. viel SiO_2)
 - ▶ Schicht/Tecto-Silicate (bei 'basischem' Gestein, d.h. viel CaCO_3 etc.)
- ▶ alle festen Bestandteile in Klumpen (5-10 cm \varnothing)
- ▶ **'Wind'**: vorgewärmte, mit O_2 angereicherte Luft; 1300°C , 4 bar ($5\frac{1}{2}$ t)
 \Rightarrow 3 Winderhitzertürmen



Roteisenstein



Magneteisenstein

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

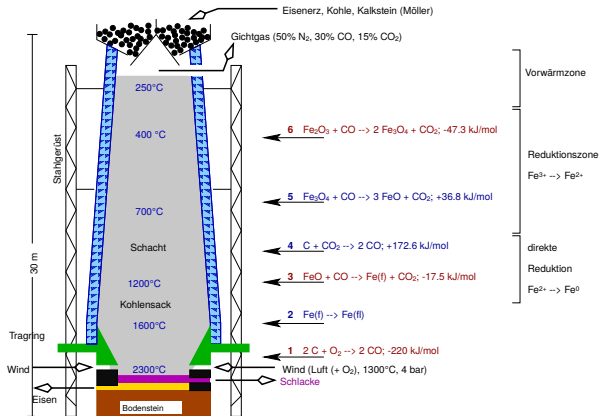
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Roheisen-Erzeugung: Hochofen-Prozess (BF)

- ▶ **Hochofen** (Gegenstromprinzip)
 - ▶ ausgemauerter Schachtreaktor, kontinuierlich, Fe-Abstich diskontinuierlich
 - ▶ ca. 40 m hoch, unten 15 m breit
 - ▶ Schachtniegung angepaßt an Volumenänderung der Füllung
 - ▶ abwechselnd befüllt mit Koks, Erz und Zuschlägen



- ▶ **Betrieb** (Reaktions-Schritte/Gleichungen; von unten nach oben)
- ▶ **Produkte**

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Hochofen-Prozess (BF), Forts.

- ▶ **Hochofen** (Gegenstromprinzip)
- ▶ **Betrieb** (Reaktions-Schritte/Gleichungen; von unten nach oben)

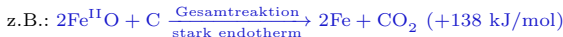
- ① Anzünden der untersten Koks-Schicht:



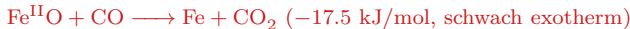
stark exotherm, treibt die Gesamtreaktion

- ② Schmelzen von Fe: $\text{Fe(f)} \xrightarrow[\text{endotherm}]{\text{schwach}} \text{Fe(l)}$

↓ Schritte ③ + ④ > 900°C: $\text{Fe}^{2+} \xrightarrow[\text{stark endotherm}]{\text{direkte Reduktion}} \text{Fe}^0$



- ③ direkte Reduktion (Rkt. von CO mit dem Erz)



- ④ Einstellen des BOUDOUARD-GG (CO-Nachbildung)



(GG: bei 700°C $\text{CO} \approx \text{CO}_2$)

↓ Schritte ⑤ + ⑥ < 700°C (Reduktionszone): $\text{Fe}^{3+} \xrightarrow[\text{schwach exo.}]{\text{Reduktion}} \text{Fe}^{2+}$

Reduktion mit dem letztem CO keine CO-Neubildung mehr,

BOUDOUARD-GG liegt links

- ⑤ $\text{Fe}_3^{\text{II,III}}\text{O}_4 + \text{CO} \longrightarrow \xrightarrow[\text{schwach endo.}]{\text{Reduktion}} 3\text{Fe}^{\text{II}}\text{O} + \text{CO}_2; +36.8 \text{ kJ/mol}$

- ⑥ $3\text{Fe}^{\text{III}}_2\text{O}_3 + \text{CO} \xrightarrow[\text{schwach exo.}]{\text{Reduktion}} 2\text{Fe}_3^{\text{II/III}}\text{O}_4 + \text{CO}_2; -47.3 \text{ kJ/kmol}$

- ▶ **Produkte**

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Hochofen-Prozess (BF), Forts.

- ▶ **Hochofen** (Gegenstromprinzip)
- ▶ **Betrieb** (Reaktions-Schritte/Gleichungen; von unten nach oben)
- ▶ **Produkte**
 - ▶ 1 t Roheisen: 2-4 %C (spröde, nicht schmiedbar)
↳ Weiterverarbeitung s.u.
 - ▶ 7 t 'Gicht': 50 % N₂, 30 % CO, 15 % CO₂
↳ Restbrennwert!
 - ▶ 1 t Schlacke: Ca-Silicate/Aluminate (Insel/Ketten-Silicate)
↳ Straßenbau
- ▶ **E-Verbrauch**
 - ▶ 21 GJ/t

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Stahl-Gewinnung

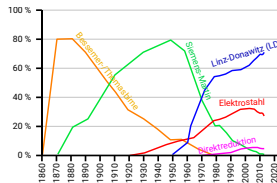
- ▶ Stahl = durch Abschrecken härgbares Fe
 - ▶ C-Gehalt (< 2%; Entkohlung ↓)
 - ▶ Legieren (mit 'LE' wie Mn, Cr, V, Ni, W, Mo ...)
 - ▶ Umschmelzen, 'Casting' (Formgebung)

① Windfrischen

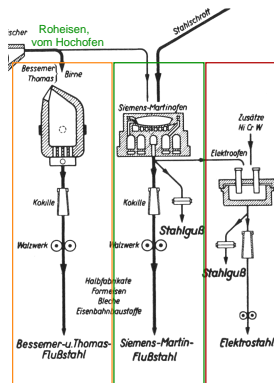
- ▶ vollständige Entkohlung mit O_2 /Luft, dann Rückkohlung
- ▶ Apparate: kippbare Konverter, bis 300 t
- ▶ früher: Einpressen von Luft (BESSEMER/THOMAS-Birne)
- ▶ heute: Aufblasen von reinem O_2 [Linz-Donawitzer (LD)-Verfahren]
- ▶ Betrieb:
 - ▶ Oxidation (ca. 15 min)
 - ▶ Konverter kippen, Schlacke abgießen
 - ▶ zur Rückkohlung: Zugabe von 'Spiegel'eisen oder Ferromangan

📺 Video zu Installation und Inbetriebnahme eines LD-Konverters

② Herdfrischen



150 Jahre Stahl-Herstellung



Detail (hist.)

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

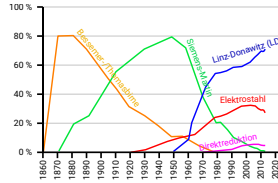
Vom Roheisen zum Stahl

- ▶ Stahl = durch Abschrecken härgbares Fe
 - ▶ C-Gehalt ($< 2\%$; Entkohlung \downarrow)
 - ▶ Legieren (mit 'LE' wie Mn, Cr, V, Ni, W, Mo ...)
 - ▶ Umschmelzen, 'Casting' (Formgebung)

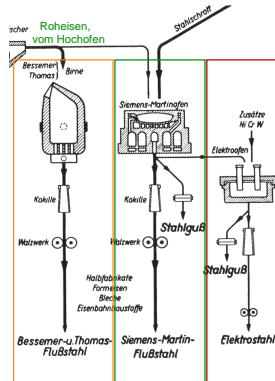
① Windfrischen

② Herdfrischen

- ▶ Entkohlung direkt bis zum gewünschten C-Gehalt
- ▶ Zugabe von Roh-Fe + Schrott (40 % Recycling!)
- ▶ früher: **SIEMENS-MARTIN**-Ofen
(+ Schrott, heiße Flammengase über Schmelze)
- ▶ heute: **Elektrostahlwerk** (EAF)
- ▶ Lichtbogenschmelzen \downarrow



150 Jahre Stahl-Herstellung



Detail (hist.)

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

① Einleitung: Metalle als Werkstoffe

② Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

③ Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

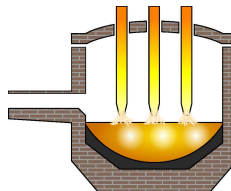
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

④ Zusammenfassung und Literatur

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

- ▶ Schmelzen im Lichtbogen
 - ▶ Zugabe von Schrott, Betrieb ausschliesslich mit Schrott möglich (scarp-EAF)
 - ▶ bis ca. 80 t/Batch, Batch-Dauer ca. 1 h
 - ▶ Wechsel- oder Gleichstrom
 $U = 400 - 900 \text{ V}$; $I = 44 \text{ kA}$ (60 MVA)
 - ▶ E -Verbrauch: 440 kWh/t (1.6 GJ/t)
 - ▶ verschiedenste Ofen-Konstruktionen
- 🔗 [Video zum EAF](#)
- ▶ [Wikipedia](#) zum Lichtbogenofen



Lichtbogenofen (EAF)

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

① Einleitung: Metalle als Werkstoffe

② Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

③ Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

④ Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

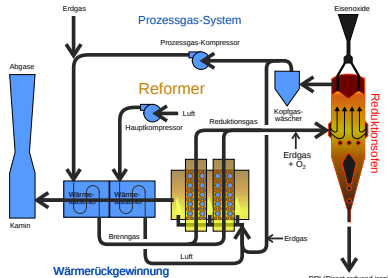
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

Direktreduktion (DRI, Midrex-Prozess)

- ▶ DRI = Direktreduktions-Eisen
- ▶ bekannt seit 1968
- ▶ 700-900 °C, Reduktion in fester Phase
- ▶ Reduktionsmittel flexibel
 - ▶ Kohle
 - ▶ Erdgas/Methan
 - ▶ H₂
- ▶ Nachteile
 - ▶ sehr reine Erze erforderlich (keine Schlacke!)
 - ▶ Einstellen des C-Gehaltes
 - ▶ bisher nur bei günstigem Erdgas wirtschaftlich
 - ▶ anschliessendes Schmelzen nötig
 - ▶ ↳ Weiterverarbeitung in Elektrostahlöfen



Midrex-Prozess

Reaktionsschritte:

- ▶ Reduktion:
$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$$
$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \longrightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$$
- ▶ Carbonisierung:
$$3\text{Fe} + \text{CO} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{H}_2\text{O}$$
$$3\text{Fe} + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2$$
- ▶ Reformierung
$$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \longrightarrow 2\text{CO} + \text{H}_2$$
$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$$

'Grüner Stahl'

- ▶ Projekte der Stahlhersteller zur 'Decarbonisierung' (z.B. EU)
- ▶ CDA-Pathways (Carbon direct avoidance)
 - ▶ vor allem Midrex-Verfahren mit reinem grünem H_2 (Elektrolyse mit erneuerbaren Energien)
 - ▶ seltener auch Wirbelschicht-Öfen
 - ▶ z.T. massiv finanziell gefördert, bisher nur Pilotanlagen
- ▶ alle wichtigen Stahlhersteller beteiligt (**Übersicht EU-Projekte**)
 - ▶ AcelorMittal (Steelanol, Gent, Belgien, Pilotanlage seit 5.2023; weitere Projekte in Bremen, Eisenhüttenstadt)
 - ▶ thyssenkrupp: Carbon2Chem (ab 5.2024); tkH2Steel
 - ▶ Tata Stell: IJmuiden HIsarna, Zeremis Carbon Lite (EU); EASyMelt (Indien Jamshedpur)
 - ▶ **SHS** (Saar-Holding-Saar, Dillingen): DR, Power4Steel
 - ▶ **Salzgitter AG: SALCOS**
 - ▶ SSAB (Schweden): HYBRIT
 - ▶ **BLAST** (Norwegen)
- ▶ Probleme
 - ▶ zumeist DRI-Verfahren (Nachteile s.o.)
 - ▶ Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff
 - ▶ Strom: Verfügbarkeit und Kosten
 - ▶ Schwankungen der Stahlpreise/Zölle
 - ▶ staatliche Unterstützungen ?
- ▶ Aktuelles (8.10.2025) s. z.B. **GMK Center**

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

Stähle: Einteilung, Werkstoffbezeichnungen (DIN EN 10027-1)

▶ 1. Hauptgruppe: unlegiert

Grenzwerte an Nicht-Fe-Elementen per DIN EN 10020 festgelegt
Bezeichnung mit Hinweis auf Verwendung und Eigenschaften, z.B.

S: Stahlbau

P: Druckbehälterbau

L: Rohrleitungsbau

E: Maschinenbaustähle

mit Angabe von Eigenschaften

▶ z.B. Baustahl: S235JR (235 = Mindeststreckgrenze in N/mm²)

▶ Gefügebilder (Fa. Schmitz, 1.0038)

▶ 2. Hauptgruppe: legiert, nichtrostend

▶ < 1.2 % C, 10.5 % Cr + mehr oder weniger andere Elemente

▶ weitere Einteilung nach Ni-Gehalt (Grenzwert: 2.5 % Ni)

▶ Bezeichnung inkl. chem. Zusammensetzung

- Cnn: unlegiert mit Mn < 1% nn = C-Gehalt * 100

- Xnn: legiert mit Mn > 1%:

- weitere Elemente, mit genormten Faktoren multipliziert

z.B. Cr: ×4, Mo ×10 - z.B. X10CrMo9-10



Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

Erläuterungen, anhand des Phasendiagramms Fe-C

- ▶ Fe + Kohlenstoff (C) \mapsto Phasendiagramm Fe-C **PD Fe-C**
 - ▶ rote gestrichelte Kurven: thermodynamisch stabil
 - ▶ schwarz (praktisch/kinetische) Phasengrenzen
- ▶ reines Fe: Martensit-Umwandlung **PU Martensit/Austenit**
- ▶ C-Gehalte der Fe-Formen
- ▶ reine Phasen, inkl. metastabilem (!) Zementit, Fe_3C **EK Phasen**
- ▶ Phasengemische: Perlit **im REM** und Ledeburit
- ▶ vier Bereiche, getrennt durch **PD Fe-C**
Ferrit – Eutektoid (Perlit) – Eutektikum (Ledeburit) – Zementit (Fe_3C)
- 1+2: Stähle: hohe Schmelzpunkte, < 1.7 Gew.-% C (25 Atom-% Fe_3C)
 - 1: < 0.8 % C, untereutektoid/unterperlitisch, Gefüge aus Ferrit ($\alpha\text{-Fe}$) und Perlit
 - 2: 0.8-2.0 % C: übereutektoid/überperlitisch, Gefüge aus Perlit und Sekundär-Zementit
- 3+4: weisses Eisen/Gusseisen: niedrigerer Schmelzpunkt
 - 3: 2.0-4.4 %C: untereutektisch: Gefüge aus Perlit und Sekundärzementit in Ledeburit, nur Guss-Eisen
 - 4: 4.3-6.67 %C: übereutektisch: Primärzementit in Ledeburit, ohne technische Anwendung
- ▶ C-Gehalt und technologische Eigenschaften **Technisches**

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

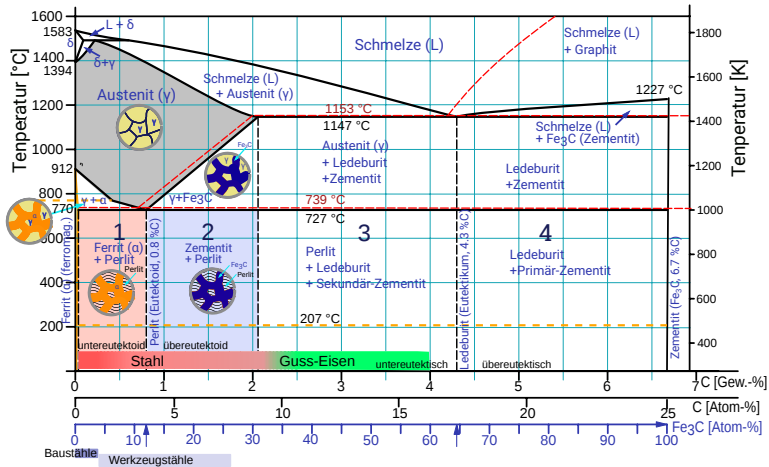
Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Fe-C Diagramm



Fe-C erläutert

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:

Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

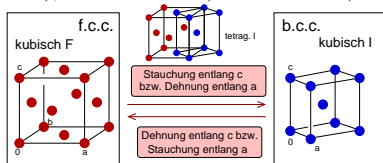
Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

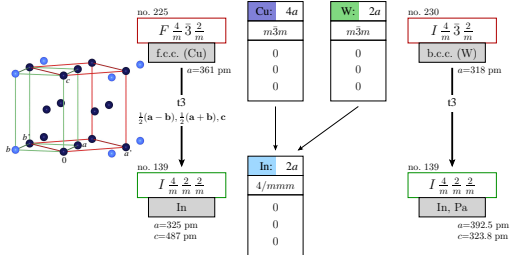
Martensit–Austenit-Phasenumwandlung

- ▶ Martensit–Austenit als Namensgeber, auch für andere displazive Phasenumwandlungen/Scherungen
- ▶ bei Fe und Stählen:

f.c.c.-Fe (γ , Austenit, HT) \Leftrightarrow b.c.c.-Fe (α , Martensit, LT)



- ▶ kristallographische Gruppe-Untergruppe-Bezüge dazu



Fe–C erläutert

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

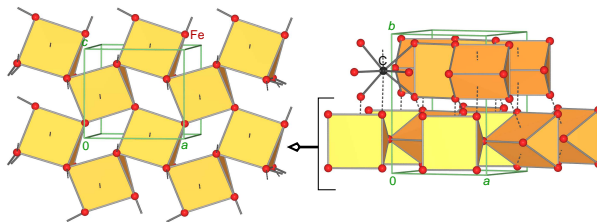
Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

reine, einkristalline Phasen im Fe–C Diagramm

Eigenschaft	Ferrit	Austenit	Zementit	Graphit
Phase	α -Fe	γ -Fe	Fe_3C	C
Struktur	b.c.c.	f.c.c.	$Pnma \downarrow$	hexagonal
Härte	weich, 60 HV	unleg. nur $>723^\circ\text{C}$	hart, 800 HV	sehr weich
Umformbarkeit	ausreichend	sehr hoch	keine (spröde)	keine
Sonstige	ferromagnetisch	paramagnetisch		Schmierstoff

Kristalline Phasen in Fe–C-Legierungen



Struktur von Fe_3C

Fe–C erläutert

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Einfluss des C-Gehaltes auf technologische Eigenschaften

- ▶ Giessen
 - ▶ ausreichend niedriger M_P erst bei $C > 3\%$
 - ▶ niedriges Schwindmaß (bei 1.0-1.5 %)
 - ▶ hohes Schwindmaß (bei 1.5-2 %)
 - ▶ Stahlguss: ($<1.2\%$) wegen Ausscheidung von γ -MK nicht dünnwandig vergießbar
- ▶ Warm-Umformung
 - ▶ C-arm bei hohen T leichter umformbar
 - ▶ Umform- T im Austenitgebiet unterhalb der Solidus-Linie,
 - ▶ Gefüge homogen austenitisch, bei höheren C-Gehalten zweiphasig durch Sekundärzementit
- ▶ Kalt-Umformen
- ▶ Spanen
 - ▶ Schnittkraft und Schneidverschleiss steigen mit Zementit-Gehalt, bei kugeligem Zementit aber vermindert,
 - ▶ Graphit (Gusseisen-Sorten) erleichtert Spanen durch Schmierwirkung
- ▶ Schweissen
 - ▶ Stähle mit hohem C-Gehalt und kleiner Bruchdehnung rissgefährdet
- ▶ Härten, Vergüten
 - ▶ $>0.2\%$: Härtesteigerung durch Abschrecken möglich, steigt bis 0.8% C, dann konstant

Stahl

C. Rühr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Renofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

häufige Legierungselemente in Stählen

- ▶ Stahl: 0.4-1.7 Gew.-% C
- ▶ qualitätsmindernde Fe-Begleiter: P, S, O, N, H (gering!!)
- ▶ Gesamtgehalte an LE < 5 % (> 5%: hochlegierte Stähle)
- ▶ Mischkristallverfestigung durch LE, in Ferrit bzw. Austenit löslich
- ▶ LE, die Austenit-Gebiet erweitern: Mn, Ni, Co ('Austenit'-Bildner)
 - ▶ homogenes Gefüge aus γ -Mischkristall (f.c.c.)
 - ▶ niedrige Dehngrenze, stark umformbar
 - ▶ zäh, auch bei tiefen Temperaturen
 - ▶ nicht ferromagnetisch
 - ▶ umwandlungsfrei, d.h. kein Härten und Vergüten möglich
 - ▶ Beispiel: Edelstahl V2A (1.4301; X5CrNi18-10) (s.u.)
- ▶ LE, die das Austenit-Gebiet verkleinern: Ti, V, Cr, Mo, Si, Al ('Ferrit'-Stabilisatoren)
 - ▶ b.c.c. ('Austenit'-Zerfall \mapsto Perlitbildung)
 - ▶ z.B. Fe-Cr-System: > 13 % Cr: ferritische Stähle
 - ▶ ferromagnetisch
- ▶ sehr sehr komplex durch zusätzliche Ausscheidung ...
 - ① ... intermetallischer Phasen **Interm. Phasen**
 - ② ... binärer, ternärer Fe/LE-Carbide **Carbide**

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

technologische Wirkung häufiger Legierungselemente

Eigenschaft	Legierungselement										
	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	Si	Mn	S	P
Zugfestigkeit	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Streckgrenze	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Kerbschlagzähigkeit	✗		✗		✓	✗	✓	✗		✗	✗
Verschleissfestigkeit	✓	✗		✓	✓	✓	✓	✗	✗		
Warmumformbarkeit	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	
Kaltumformbarkeit				✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗
Zerspanbarkeit		✗		✗			✗	✗	✗	✓	✓
Warmfestigkeit	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			
Korrosionsbeständigkeit	✓				✓					✗	
Härtetemperatur	✓			✓	✓		✓	✓	✗		
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Nitrierbarkeit	✓		✓	✓	✓		✓	✗	✓		
Schweißbarkeit	✗	✗	✓		✓		✗		✗	✗	✗

✓: Erhöhung; ✗: Verminderung

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

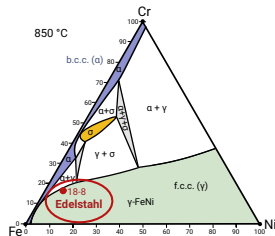
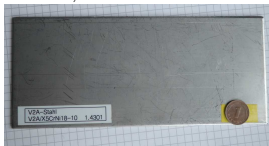
Zusammen-
fassung

Intermetallische Phasen; Beispiel: Cr/Ni-Stähle (z.B. V2A)

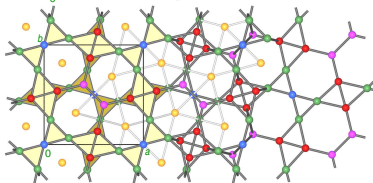
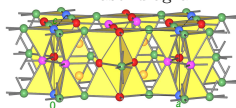
Stahl

C. Röhr

- ▶ 'V2A'; X5CrNi18-10 (1.4301):
0.5 % C; 18 % Cr und 10 % Ni



Phasendiagramm Fe-Ni-Cr



Kristallstruktur der σ -Phase

- ▶ im Phasendiagramm Fe-Ni-Cr \Rightarrow
- ▶ intermetallische Phase: $\sigma \Rightarrow$
- ▶ Edelstähle nach Primärphase
 - ▶ austenitisch: Nr. 1.4301 - 1.4541, alle f.c.c.
 - ▶ ferritisch: b.c.c.; 10-12 % Cr, kein Ni, aber Ti-haltig, wenig C (z.B. X2CrTi12, 1.4512)
- ▶ weitere Infos/Links
 - ▶ Gefügebilder (Fa. Schmitz)
 - ▶ Fa. Thyssen-Krupp
 - ▶ Fa. Struers
 - ▶ www.stahlportal.com

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

Carbide der Legierungselemente

► LE und ihre Carbide [(Härte/HV): Strukturtyp/Abb.]:

Ti: TiC (3200): NaCl

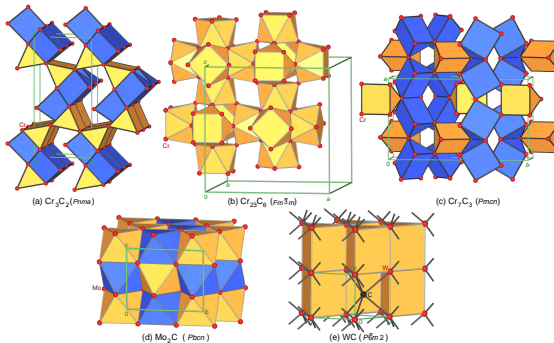
V: VC (2800): NaCl

Nb: NbC (2800): NaCl

Cr: Cr_3C_2 (2150) (a), Cr_{23}C_6 (b) und Cr_7C_3 (c)

Mo: Mo_2C (1500): Defekt-NiAs (d)

W: WC (2400): Struktur s. Kap. 10 (e)



► !! C-Gehalt beeinflusst zusätzlich Wirkung der LE stark

► !! Wirkung zweier LE \neq Summe beider Einflüsse (ternäre Carbide!)

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

1 Einleitung: Metalle als Werkstoffe

2 Metallurgie: Gewinnung von Roheisen und Stahl

Historisches: Rennofen

Hochofen-Prozess (BF)

Elektro- und Sekundärstahl (EAF)

Direktreduktion (DRI)

3 Metallographie: Stähle als Werkstoffe

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

4 Zusammenfassung und Literatur

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen- fassung

Zusammenfassung

- ▶ Eisen als wichtigster metallischer Werkstoff, 98 % als Stahl (mit Cr, Ni, Mn, V, ... + C)
- ▶ gute Verfügbarkeit der Rohstoffe
- ▶ mechanische Eigenschaften (Gefüge) sehr variabel einstellbar
- ▶ **Herstellung** bekannt seit ca. 1500 (s. Agricola)
- ▶ Primärstahl auch heute noch immer 70 % Hochofen-Prozess (BF) mit LD-Entkohlung, 30 % Lichtbogen-Ofen (EFA) mit Schrott-Zusatz
- ▶ ca. 10 % des globalen CO₂
- ▶ insgesamt ca. 40 % Recycling (Schrott)
- ▶ Direktreduktion als Alternative, da flexible Brennstoff, ggf. 'grüner Wasserstoff' möglich
- ▶ Stahl als **Werkstoff**
 - ▶ C-Gehalte, Fe-C-Phasendiagramm
 - ▶ austenitische – martensitische Stähle
 - ▶ Bedeutung von Legierungselementen \mapsto Substitutionshärtung, Carbide
- ▶ technologische Aspekte (Umformtechnik ...)

Stahl

C. Röhr

Einleitung

Metallurgie

Historisches:
Rennofen

Hochofenprozess
(BF)

Elektro- und
Sekundärstahl
(EAF)

Direktreduktion
(DRI)

Metallographie

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Zusammen-
fassung

- ▶ 'Stahlfibel', Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (2002)
- ▶ 'Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry', Wiley-VCH, Weinheim (8 Artikel), z.B.
 - ▶ Hans Bodo Lungen, Peter Schmöle, 8. CO₂-Mitigation Technologies in Iron and Steelmaking
- 🔗 www.stahlseite.de
- 🔗 www.industriedenkmal.de (schöne historische Fotos)
- 🔗 [Wikipedia zum Hochofen](#)
- 🔗 [alter 'Lehrfilm'](#) (gutes, aber altes Filmmaterial)
- ▶ ... und natürlich ...
- 🔗 [die Maus zum Stahl](#)

... die 'Riedel's der Werkstoffwissenschaften/Metallographie ...

- ▶ Günter Gottstein, Sandra Korte-Kerzel: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Physikalische Grundlagen*, Springer, 2025.
- ▶ Erhard Hornbogen, Hans Warlimont, Birgit Skrotzki: *Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, Springer, 2018.
- ▶ Donald R. Askeland: *Materialwissenschaften*, Spektrum, 2010.
- ▶ Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright: *The Science and Engineering of Materials*, Cengage Learning, 2014.
- ▶ Wolfgang Weissbach u.A.: *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr*, Springer, 2018.
- ▶ Heinrich Oettel, Gaby Ketzer: *Schumann Metallografie*, Wiley-VCH, 2025.