WT2

fischal

Version: June 26, 2025

Kristallgitter	*kfz*	*krz*	*hdp*
Dichtest gepackte Ebene	4	---	1
Nebengleitebenen	---	6	---
Gleitrichtungen	3	2	3
Gleitsysteme	4 x 3 = 12	6 x 2 = 12	1 x 3 = 3
Metalle	Al, Cu, Ni, γ-Fe	Cr, W, Mo, α-Fe	Mg, Zn, α-Ti

Erholung und Rekristallisation

Abbau und Rekristallisation = f(Temp. / Zeit / Verformung)

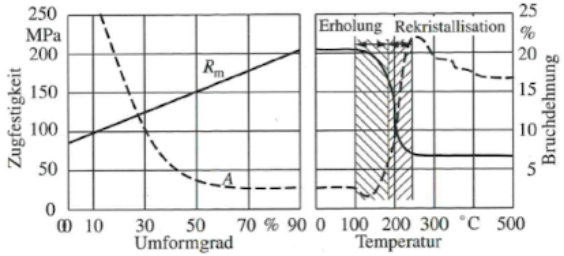
Erholung:

- Tendenz Defekte Auszuheilen: $T < 0.4T_s$
- Einbringen von Gitterbaufehler (Versetzungen)
- Keine Korngefügeänderung
- Umordnung von Versetzungen

Rekristallisation

- Tendenz Defekte Auszuheilen: $T > 0.4T_s$
- Kompl. Neuanordnung Gefüge
- Abbau von: Mech. Eigenschaften/ Spannungen
- Mindestverformung: 5%
- Grosser Verformungsgrad = kl. Körner
- Lange $t_{\text{Glüh}}$ = gr. Körner
- Hohe Temp. = gr. Körner

Sekundäre Rekristallisation: Hohe Temp. / Lange Zeit = Starkes Wachstum einzelner Körner.



Wärmebehandlungen

Veränderung von: Festigkeit, Härte, Zähigkeit, Verschleissbeständigkeit, Zerspanbarkeit, Eigenspannung, Gefügestruktur, NICHT E-Modul

Können IMMER Rückgängig gemacht werden.

Weichglühen

$T < A_1$ (723 ° C, Austinitisierungstemp.)

- Verminderung der Härt, Verbesserung Zerspanbarkeit
- Temperatur halten für mehrere Stunden und langsame Abkühlung
- Umf. Perlitlammellen zu Kugelförmigen Karbiden (niedr. Grenzflächenenergie)
- Gute Verformbarkeit/Zerspanbarkeit, Niedrige Zugfestigkeit

Normalglühen/Normalisieren

- Über 723 ° C erhitzen, langsam abkühlen
- Stahlgefüge wieder wieder Lamellenförmig
- Erhöht Festigkeit und Duktilität

Spannungsarm Glühen

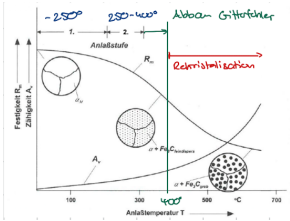
$\sigma_{\text{Eigen}} > 0Mpa$

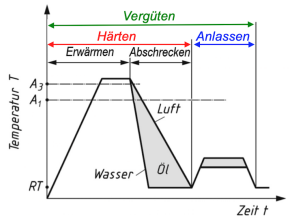
- Abbauung innere Spannungen, Achtung: Spannungsarm $\neq$ Spannungsfrei
- Temp. ca. 550-600 ° C bei ca. 2 h
- Langsame AbkühlungAbkühlung beim Schweissen

Härten und Vergüten

Veränderung Steifigkeit: $E = \alpha_1 \cdot E_1 + \alpha_2 \cdot E_2$
Zusammensetzung Festigkeit: Grundfestigkeit + Kaltverfestigung + Feinkornhärtung + MK-Verfestigung + Ausscheidungshärtung
Kaltverfestigung: Umformgrad (Walzen, Pressen, Tiefziehen usw.)
MK-Verfestigung: Gitterverspannung durch Fremdatome

- Ziel: hart, Verschleissbeständigkeit, stat./dyn. Festigkeit
- Voraussetzung: > 0.2 % C
- Austinitisieren $->$ Abschrecken $->$ kfz $->$ verspanntes trz $->$ Martensit
- Abkühlgeschwindigkeit: Wasser > Öl > Luft





Randschichthärten

Durchhärten = Spröde/gar nicht möglich $->$ Randschichthärten = Harte Randschicht, zäher Kern. Für **Niedrig/Unlegierte** Stähle

Induktionshärten:

- Wechselstrom mit hoher Frequenz (= geringe Härtetiefe)
- Abschrecken: Wasser
- + Berührungslos, schnell
- - Nur einfache Geometrien, individuelle Spule

Flamm-/Laserhärten

- Atecylen-Sauerstoff
- Schwierige Bauformen
- Dicke = f(t_{Vorschub})
- Laser für dünne Bauteile
- Automatisierbar

Einsatzhärten

- C < 0.2 %
- Bei 900 - 950 ° C Aufkohlen
- Abschrecken = Martensit in RS
- EHT einstellbar

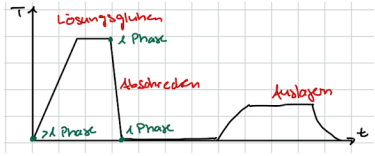
Nitrieren

- Bei 550 - 600°C 0.1 % N in Randschicht
- Kein Abschrecken
- Weniger Verzug
- Randschicht: 0.01-0.3

Ausscheidungshärten (Aluminium 2xxx, 6xxx, 7xxx)

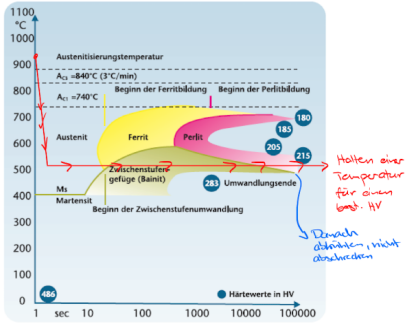
Min. 2 Phasen unterschiedlicher Chemischer Zusammensetzung

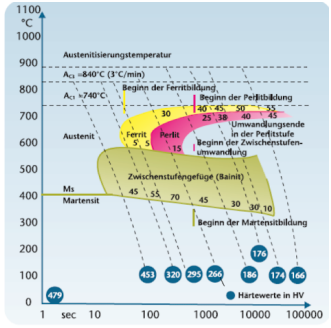
1. Lösungsglühen (= 1 Phase)
2. Abschreckung der Legierung (= 1 Phase)
3. Auslagerung (Warum/Kalt) Achtung: over Aging



ZTU-Diagramm

Reale Umwandlung des Gefüges. Fe-C Diagramm: Unendlich langsame Abkühlung.





Härteprüfung

Widerstand gegen plastische Formänderung durch Eindringen eines Prüfkörpers.
Mindestabstand Rand: 2.5d, 3d bei Legierungen/Stahl
Bezeichnung:
640: Vickershärtewert
HV: Prüfverfahren nach Vickers
30/20: Prüfkraft in kp (0.102 · F)/Haltezeit in s

Ermüdung

Brechen von Werkstoffen unter max. Festigkeitswert.

1. Risskeimbildung:

- Bildung im R_e Bereich
- Gleitbandbildung 45° zur Normalpannung (Abgleitung)
- Druck/Zug: Bildung Ex-/Intrusionen $->$ Entstehung Mikrorisse
- Überschreitung Dauerfestigkeit (KRZ) oder zyklische Belastung

2. Ermüdungsrisswachstum

- Mikrorisse wachsen als Schwingriss (senkrecht zur Normalspannung)
- Schwingstreifen entstehen auf Schwingbruchfläche (**NICHT sichtbar**)

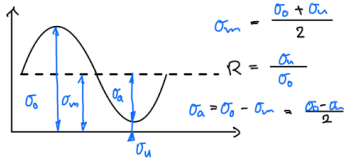
3. Bruch

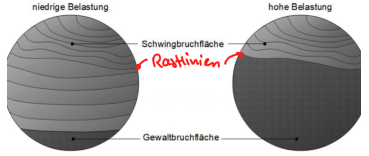
- Abnahme tragender Querschnitt. Lastverteilung auf kl. Querschnitt
- Überschreitung der $R_m -> $ Spröd/Duktilbruch

4. Bruchflächenmerkmale

- Abschätzung der dyn. Belastung
- Rastlinien: Oxidation, Änderung Betr. Bedingnung

Beanspruchungszyklen:
R=-1 (Wechsel), R=0 (Schwellend), R>1 (Druck)





Schwingfestigkeit, Wöhlerkurve, Dauer-/Zeitfestigkeit

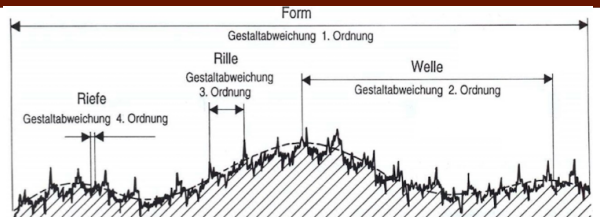
Wöhlerkurve, Dauer-/Zeitfestigkeit:

- kfz nicht Dauerfest
- 1.Kurzzeitf. 2.Zeitf. 3.Dauerf. (krz)
- $\sigma_d = \sigma_m \pm \sigma_a$
- σ_m = Druck: schliesst Risse
- σ_m = Zug: aufreissen

Schwingfestigkeit:

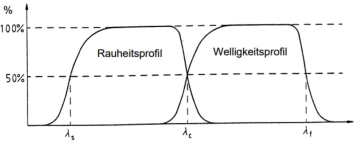
- + Polierte Oberfl.
- + Kugelgestrahlt
- + Oberfl. gehärtet
- - Korrosion
- - Rauigkeit
- - Kerben, Kanten

Oberflächen



Profilfilter:

- Trennt Rauheit/Welligkeit
- Erstellt Primär-/Welligkeits-/Rauheitsp.
- λ_s = Übergang Rauheit-Kurzwelligkeit
- λ_c = Übergang Rauheit-Welligkeit
- λ_f = Übergang Welligkeit-Form



Rauheitsgrössen:

Ra: Mittelwert
$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)|\, dx$

Rq: Quadratischer Mittelwert
$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x)\, dx}$

Rsk: Schiefe
$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l z^3(x)\, dx \right]$

Rku: Steilheit
$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} z^4(x)\, dx \right]$

RSm: Mitl. Rillenabstand
$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} x_{s_i}$

Rz: Zehnpunkthöhe
$R_z = R_p + R_v$
(gr. Spitze + gr. Tal)

Stähle

Legierung aus Fe und C, C < 2%, härtbar, schweissbar, E = 210GPa, günstig

Einteilung:
Verwendungszweck:

- Baustähle: tragende St.
- Werkzeugstähle: arbeitende St.
- Warmfeste Stähle: Hochbelastete St.
- Rostfreie Stähle: Cr $\geq$ 12%

Gefüge:

- **Ferritisch:** α-MK, KRZ, ferromagnetisch, Ausgeprägte R_e, Steilabfall der Zähigkeit
- **Perlitisch:** 0.8% C, ferromagnetisch
- **Austenitisch:** Mit Nickel bis RT stabil, γ-MK, KFZ, hohe C Löslichkeit, kein Steilabfall, nicht ferromagnetisch
- **Martensitisch:** C übersättigt, TRZ verzerrt, hart

Stahlbezeichnungen

Unlegierte Stähle: S355JR

- Keine Angabe zu chemischer Zusammensetzung
- S = Stahlbau, P = Druckbehälter, L = Rohrleitungsbau, B= Betonstahl
- Zahl (355) = R_e, Zusatz (JR,KR,LR) = Kerbschlagarbeit

Unlegierte Stähle mit Wärmebehandlung: C45E

- Mangangehalt < 1%
- Zahl / 100 = C-Gehalt in %
- Zusatz: E = max S-Gehalt, S=Federn, T=Werkzeuge, W=Schweissen

Niedriglegierte Stähle: 11MoCrV7-2-4

- 1.Zahl / 100 = C-Gehalt in %
- Legierungszusätze / Faktor nach Elementen:
  - **4:** Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
  - **10:** Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ti, V, Zr, Tal
  - **100:** Ce, N, P, S
  - **1000:** B

Hochlegierte Stähle: X20Cr13

- X = Hochlegiert (mind. 1 Legierungselement $\geq$ 5%)
- 1.Zahl / 100 = C-Gehalt in %
- Legierungszusätze ohne Faktoren, direkt in %
- 10% Ni = Stabilisiert Martensit bei RT
- $\geq$ 12% Cr = Rostfrei, stabilisiert Ferrit

Eisengusswerkstoffe

Legierung aus Fe und C, C > 2%, Gut zerspanbar (aufgrund des Graphits)
Bezeichnung: EN-GJL-400-15
GJL = Lamellengrafitguss
400 = Zugfestigkeit R_m
15 = Mindestbruchdehnung in %

GJL

- Lamellengraphitguss, **Einsatz:** Abgaskrümmer, Kurbelgehäise LKW
- Gute Dämpfeigenschaften, hohe Wärmeleitfähigkeit
- gering R_m, geringe Dehnung

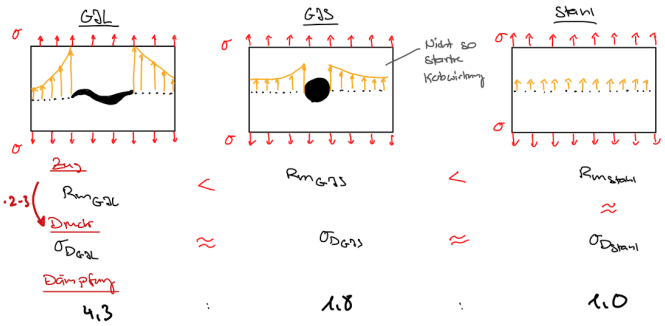
GJS

- Kugelgraphitguss, **Einsatz:** Zylinderblock Schiff, Gasturb.
- höhere Zugfestigkeit R_m als GJL
- Entstehung durch Impfen mit Mg ODER Ce

GJV

- Vermicular graphitguss, **Einsatz:** Bereich hoher Temp., Motoren
- Wurmförmiger Graphit, Zwischenstufe von Lammelar und Kugelig
- Geringere thermische Ausdehnung als GJS
- Höherer E-Modul als GJS
- Entstehung durch Impfen mit Mg UND Ce

GJM: Temperguss (Weisses Gusseisen)



Gefügebildung abhängig von Abkühlbedingung: Schnelle Kühlung = **Kurze Lamellen**
Austenitisches Gusseisen: Bis zu 36% Nickel, Einsatz hohe Temp. (Abgasturbolader)

Aluminium

Eigenschaften:

- 3. Häufigstes Element (1: O_2, 2: Si)
- Al_2O_3 sehr stabil, hoher Energieaufwand
- ϑ_S = 660°C, δ = 2,7 g/cm^3
- KFZ (Kein Steilabfall)
- E = 70 GPa, R_m = 40-210 MPa, A_a = 4-30%
- Gute Korrisionsbeständigkeit

Einteilung:

- Reinaluminium
- Aluminium gesintert
- Aluminiumlegierungen
  - **Ketlegierungen** (Umformen)
    - Härtbar: 2xxx, 6xxx, 7xxx
    - N. Härtbar: 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx
  - **Gusslegierungen**
    - Härtbar: AlSiMg, AlSiCuMg
    - N. Härtbar: AlSi, AlMg

Extrusion: 50-2000mm/s

Aluminiumbezeichnungen

Nach EN: AW 2024 T6

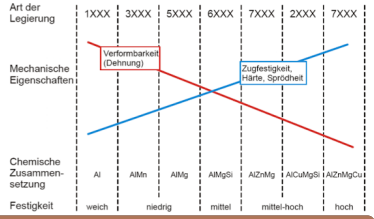
- AW: Kletlegierung, AC: Gusslegierung
- 4-Stellige Zahl: Hauptleg. El., weitere Leg.El.
- T1-T9: Wärmebehandlungen

Nach DIN: AlZn4.5Mg1

- Jeweilige Legierung + Anteil in %
- Hier: 4.5% Zink
- und: 1% Magnesium

Legierung nach Anwendungsbereich:

- Fz-Bau: 6xxx
- Flugzeugbau: 2xxx, 6xxx, 7xxx

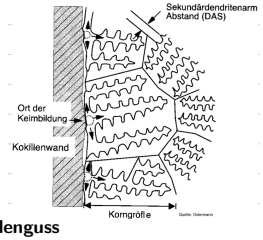


Aluminium Gusslegierungen

- **95%** = Al-Si Legierungen
- Wahl des Gussverfahrens: **Bauteile/Jahr vs. Gewicht**. Viele Bauteile: Druckguss, Wenige/Schwere Bauteile: Sandguss
- Beurteilung Spiralkokille; Füllvermögen = Aussage über Giessbarkeit
- Hohe Gehalte an Leg.El. (Si und Mg)

Gussgefüge:

- Keimbildung = Dendriten
- Einstellung: Dendritenarmabstand, Sekundärdendriten Abstand, Korngrösse
- Entstehung: Untereutektisch-Eutektisch (11.7%)
- Übereutektisch: Silizumausscheidung



Sandguss

- Füllung durch Gewichtskraft
- Geringe Abkühlgeschwindigkeiten
- Grosse, ungleichmässige Si-Kristalle
- Versprödung

Kokillenguss

- Form aus Stahl (Hohe Abkühlgeschw.)
- Erstarrt Feinkörnig
- 10-13% Si

Druckguss

- Leg. mit niedrigem T_s
- Hohe Formschliesskräfte
- Hohe mechanische und thermische Belastung der Stahl Form
- Bsp: AlSi9Cu3, AlSi12Cu1, AlSi10Mg
- Sehr hohe Stk. pro Jahr

Thixocasting

- Tiefere Temp. = weniger Lunker/Poren
- Kombination Giessen/Schmieden
- Bereich: S+α (40/60), 5-7% Si
- Prozessschritte:
  1. Erhitzen in 2Phasengebiet
  2. Rohlingherstellung
  3. Schmieden in thixotropen Zustand
- Vorteile: Formfüllung, Schwindung, Temp, Wandstärken

Pulvermetallurgische Alu-Legierungen

- Dispersationshärtung mit Oxide, Karbiden, Nitriden, intermetallischen Phasen
- Vorteil: Stabil über 160°C, kein over-Aging
- Nachteil: hohe Kosten
- Bez. X8019, X = Experimentell

Aluminiumschaum

- Metallpulver + Metallhydrid
- Pulvermetallurgisch: Heissgepresst + erhitzt auf $T_{\text{Schmelz (Vormaterial)}}$ = Aufschäumung des Gemenges
- Schmelzmetallurgisch: Gas einblasen
- Hohe Energieabsorption

Oxidation und Korrosion

Korrosion

- Deckschicht aus Al_2O_3
- Keramisch, sehr hart
- Sehr dünn: $t = 10^{-10} m = 1\text{Å}$
- Verstärkung: Chromatieren, Eloxieren
- $t = 0.01\mu m$: Poren, Spalte: Kein nutzen zur Korrosionsbeständigkeit

Anodisierung (Eloxieren)

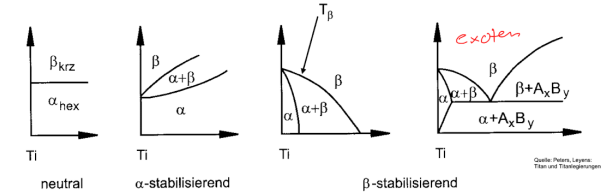
- 1. Reinigen
- 2. Beizen (entf. Oxid)
- 3. Anodisieren
- 4. Verdichten (Böhmit, Färben, PTFE)
- t variiert nach Elektroly, Verfahrenspar.
- Bildung Deckschicht: 2/3 in Grundwerkstoff, 1/3 nach aussen

Titan

Eigenschaften:

- 4. Häufigstes Element (Rutil TiO_2)
- ϑ_S = 1668°C, δ = 4.5 g/cm^3
- Hdp (α-Ti), Krz ($\beta - Ti$)
- E=115GPa, R_m=240MPa, A_A=24%
- Gute Korrosionseigenschaften
- Biokomatibilität

Legierungen	α	$\alpha+\beta$	β
Dichte	+	+	−
Festigkeit	−	+	++
Duktilität	−	+	+/−
Bruchzähigkeit	+	−/+	+
Zeitsandfestigkeit	+	+/−	+
Korrosionsverhalten	++	+	+/−
Oxidationsverhalten	++	+	−
Schweißbarkeit	+	−/+	−
Kaltverformbarkeit	−	−	−/+



Sn, Zr | Al, O, N, C | Mo, V, Ta, Nb | Fe, Mn, Ni, Cu, Si, H

Gefüge
Lammelar: (Titanmartensit)

- Abkühlung oberhalb β-Transustemp. (882°C)
  - Schnell: Feinlammelar
  - Langsam: Grobnadelig, gr. Lamellen
- α = hell, β = dunkel

Globular:

- Resultat aus Rekristallisation
- Kaltverformt und Lösungsgeglüht
  - Lang: Grob Globular
  - Kurz: Fein Globular
  - Temp.dicht unter β-Transus: Bimodal

fein	grob	Eigenschaft	lamellar	globular
/	/	Elastizitätsmodul	/	+/- (Textur)
+	−	Festigkeit	−	+
+	−	Duktilität	−	+
−	+	Bruchzähigkeit	+	−
+	−	Rissbildung	−	+
+	−	Rissausbreitung	+	−
−	+	Zeitstandfestigkeit	+	−
+	−	Superplastizität	−	+
+	−	Oxidationsverhalten	+	−

Magnesium

Eigenschaften:

- 6. Häufigstes El. (als Dolomit, Magnesit)
- ϑ_s = 650°C, δ = 1.74 g/cm^3, HDP
- E=45GPa, R_m=80-180MPa, A_A=1-12%
- Exz. Giessbarkeit, schlechte Korrisionsbeständigkeit
- Schwingungs- und Geräuschdämpfung
- Gut Zerspanbar

Bezeichnung: QE22A-T6

- Leg. Gehalt in %
  - 2% Silber/Seltene Erden
  - N = Ni, P = Pb, Q = Ag, R = Cr, S = Si, T = Sn
- Nachgest. Buchstaben = Entwicklungsstand
  - A = zu wenig f. Prototyp
  - B = Prototyp, C = Kleinserie, D = Grossserie
- Wärmebehandlungen: gem. Aluminium

Verarbeitung:

- 90% = Gussbauteile, davon 70% Mg-Al (AZ91, AM50 AM 60)
- Keine Affinität zu Stahl: hohe Lebensdauer von Werkzeugen/Formen
- Knetlegierungen: M2, AZ31, AZ61, AZ80, ZK30, ZK 60, WE43, WE54
- Herstellung durch Extrusion/Schmieden

Druckguss: Dünnwandig bis 0.8mm − > Getriebegehäuse, Lenkräder, Laptopgehäuse (30m/s)
Squeeze-Casting: Geringere Fliessgeschwindigketi (0.5m/s), Weniger Verwirbelungen/Porosität
Thixocasting: Weniger Lufteinschöüsse/Schwindnung, niedrigere Temperaturen
Knetlegierungen: hdp = Schlechte Kaltumformung. T>225°C: Aktivierung weiterer Gleitsysteme
Zerspanbarkeit: Stahl (1750 N/mm^2) < Gusseisen (1200 N/mm^2) < Alu (500 N/mm^2) < Magnesium (250 N/mm^2)