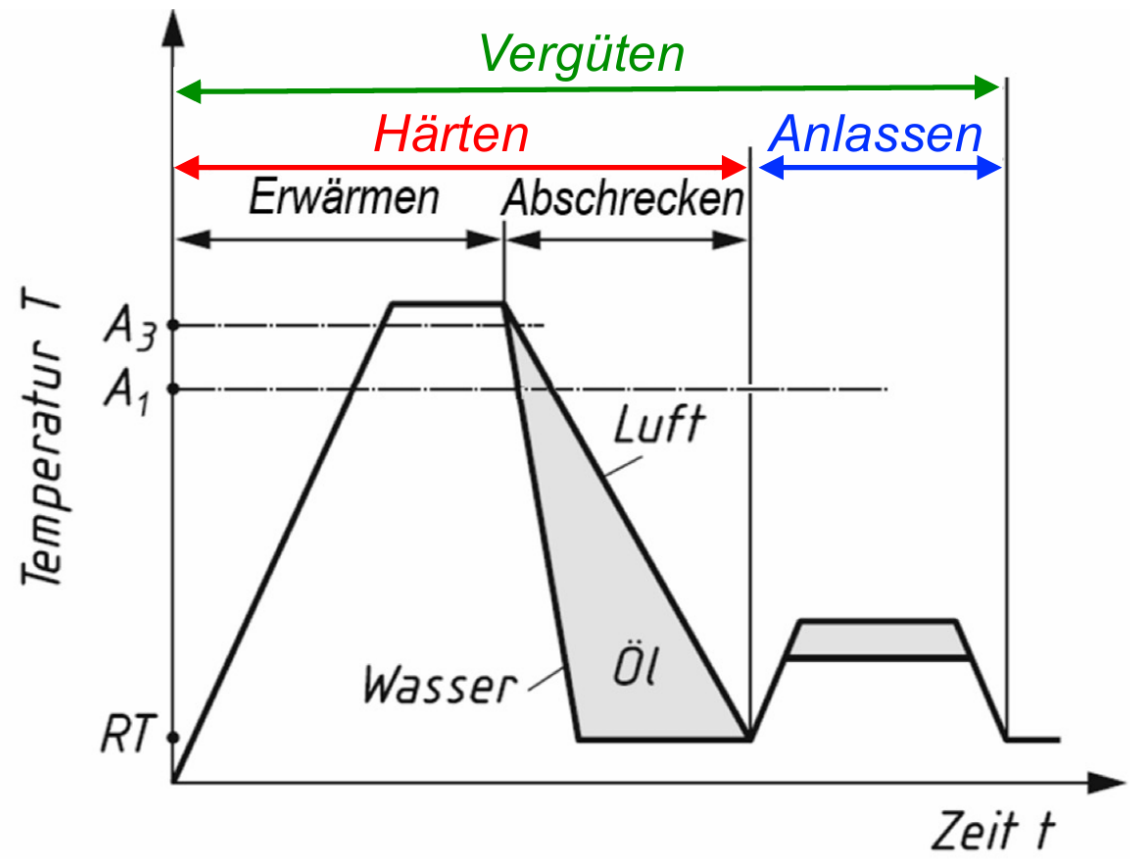


Wärmebehandlung

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



- **Glühen:** Langsames Erwärmen, Halten und langsames Abkühlen
⇒ Spannungsabbau, homogenes Gefüge, energetisch günstiger Zustand
- **Härten (Abschrecken):** Schnelles Abkühlen aus Austenitisierungstemperatur
Abschreckmedien: Wasser > Öl > Luft (abnehmende Abkühlgeschwindigkeit)
⇒ hohe Härte, jedoch hohe Eigenspannungen und Sprödigkeit
- **Anlassen:** Erwärmen gehärteter Stähle auf ca. 200–600°C max. A1
⇒ Spannungsabbau, geringere Sprödigkeit, höhere Zähigkeit
- **Vergüten:** Härten + Anlassen (500–700°C)
⇒ hohe Festigkeit bei guter Zähigkeit

Rückblick WT1:



Ferrit(krz): kleine Lücken, grosse Verzerrung→wenig C lösbar, max. 0.02% bei 723°C
Austenit(kfz): geringe Verzerrung→max. 2.06% bei 1147°C

Glühen

Normalglühen:

30-50°C oberhalb GOSK, 30min halten, langsam abkühlen (sonst Härten)

stark verformt, grobes Korn → feines Korn, mittlere Festigkeit, gute Zähigkeit, innere Spannungen abgebaut (**Festigkeit + Duktilität erhöhen**)

Überführen in Austenit → feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge
Struktur über Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst

Anwendung: Stahlguss, Baustahl, grosse Schmiedestücke

Weichglühen:

≤ 0.8% C = unterhalb PS-Linie (680-720°C), mehrere h halten

>0.8% C = um SK-Linie

Zementit mit Lamellen/Blattform = erschwerte spanende Bearbeitung
(Je höher C, desto härter und spröder)

↓ ↓ ↓
kugelige Zementitkristalle (umgeben von Ferrit) → geringe Grenzflächenenergie
gut verformbar und spanbar

Spannungsarmglühen:

Spannungen abbauen, 550-650°C, 2h halten

elastische Dehnungen → bleibende plastische Dehnungen **ohne Gefügeänderung**

Anwendung: spröder Werkstoff, Verzug durch spanen

Diffusion

Teilchen bewegen sich innerhalb der Gitterstruktur und verteilen sich regelmässig, Thermisch aktiviert

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad x \approx \sqrt{Dt} \quad D = D_0 e^{-Q/(RT)}$$

$$R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad T \uparrow \Rightarrow D \uparrow$$

Selbstdiffusion: gleiche Atome, Platzwechsel, Schwingung ausgleichen

Fremddiffusion: unterschiedliche Atome, Konzentrationsausgleich, normal

Mechanismen: Leerstellen (Platzwechsel), Zwischengitter (M+NM), Versetzungen (Diffusionskanal), Korngrenzen (ebener Kanal, Breite: 2x A-D)

Rekristallisation

Erholung ($T < 0.4T_s$)

keine Gefügeänderung, softe Eigenschaften zurückbilden

niedrige Temperatur: Punktfehler, E-Widerstand sinkt, Ausheilung 0D

höhere Temperatur: mechanische Eigenschaften teilweise, Versetzungsumordnung

Rekristallisation ($T > 0.4T_s$, Legierungen $\approx 0.5T_s$):

Neubildung spannungsfreier Körner, Abbau Kaltverfestigung, Gefügeänderung

mind. 5% V_g , genügend t für Diffusion

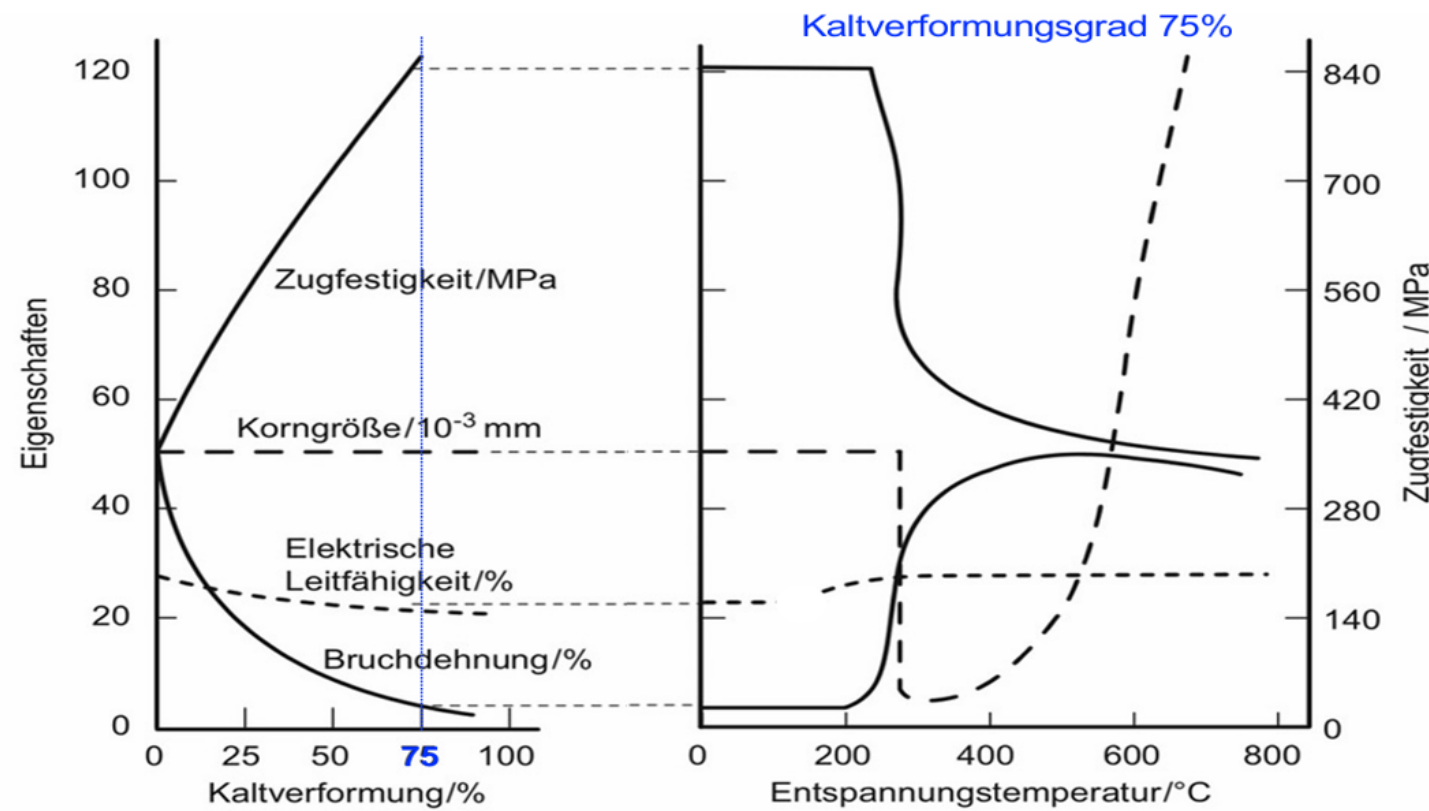
$$V_g \uparrow \Rightarrow d_K \downarrow \quad T, t \uparrow \Rightarrow d_K \uparrow$$

Sekundärrekristallisation:

Kornwachstum (grosse Körner wachsen auf Kosten kleiner)

gleichmässige Zunahme Körner, hohe T und V_g , stabil = 120°

$$n = 6 \text{ stabil} \quad n > 6 : \text{Wachstum} \quad n < 6 : \text{Schrumpfung}$$



Härteverfahren

Härte=f(Abmessung, Stahlsorte, Abkühlmittel)

A1 = Perlit - PS-Linie, **A3** = Ferrit - GS-Linie

sehr langsames Abkühlen: 30-50°C oberhalb GS-Linie

langsam an Luft: Ferrit&Perlit ca. 10-30°C tiefer, Umwandlung verzögert

bewegte Luft: Ferrit&Perlit ca. 100-150°C tiefer

Ölbad: Fe-Atome diffundieren nicht mehr in Kristallgitter

→ verzerrtes Ferrit und eingelagertes Zementit, ZWischengefüge / Bainit

Wasser: C zwangsgelöst, Martensit, hart und spröde

→ innerhalb 300-100°C von kfz-Austenitkorn zu trz-Gitter

Aufhärtbarkeit: grösste erreichbare Härte, f(C), <0.2%C nicht mehr härtbar

Einhärtbarkeit: Tiefe des Härtens, f(Legierung, C)

Durchhärtbarkeit: überall etwa gleiche Härte, Mitte mind. 50% Ms

Direktes Härten: kont. Abkühlung ohne Unterbrechung

+ kostengünstig und einfach, - Eigenspannungen

gebrochenes Härten:zuerst Wasser→Öl

+geringe Eigenspannungen, - viel Erfahrung

Warmbadhärten:Salzschmelzen über A3

+geringer Verzug und Rissgefahr

ZTU-Diagramm

- 100% Martensit ⇒ Härte unabhängig von der Abkühlgeschwindigkeit

- Martensithärte ≈ Funktion des C-Gehalts

- Legierungselemente ↑ ⇒ Härtebarkeit ↑

- Legierungselemente hemmen Ferrit-, Perlit- und Bainitbildung

- Nötige Abkühlgeschwindigkeit abhängig von C-Gehalt und Legierung

- Abkühlungsdauer = f(Probendicke)

- Härte = f(Abmessung, Stahlsorte, Abkühlmittel)

Härteprüfung:

$$HV = 0.102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad \text{mit} \quad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

normgerechte Angabe:

Härtewert / Prüfverfahren HV / Kraft in kp / Haltezeit der Kraft in s

z.B. 640 HV 30/20

Randschichthärten

Ziel: Harte Randschicht, zäher Kern (höchste σ am Rand)

Ohne Änderung der chem. Zusammensetzung (mind. 0.2% C)

Flammhärten: Härtetiefe= f(Vorschub), gut an Konturen anpassbar, Langsam

Induktionshärten: Wirbelströme, f(Frequenz), schnell & teuer

Strahlhärten: Laserhärten, f(Vorschub), Für dünne & kleine Flächen

Mit Änderung der chemischen Zusammensetzung

Einsatzhärten:

- Stähle mit $C < 0,2\%$, Glühen 900–950°C, in C-Atmosphäre

- Kohlenstoff diffundiert von außen in das Bauteil bis 2mm Tiefe

- Kohlenstoffangebot: $C = f(T, t)$

- Härtetiefe: $d = f(T, t)$

Nitrierhärten

- harte Nitride an OF, Verbindung mit N (Gasgemisch)

- Legierungselemente: Al, Cr, Mo, V, Ti (nicht Fe)

- N diffundiert bei 500–600°C in Stahl, bis ca. 0,5 mm

- Kein Abschrecken, hohe OF-Härte, geringer Verzug, Korrosionsbeständig, Gleiteigenschaft

Ausscheidungshärten

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{MK} + \sigma_v + kD^{-0.5} + \sigma_a$$

1. Lösungsglühen - Legierung in Lösung bringen (520°C, 30min)

2. Abschrecken - einfrieren = übersättigter MK

3. Auslagern - Bildung fein verteilter Zonen (warm/kalt)

Festigkeit abhängig = f(T, t), T=wärmebehandelt

Aluminium = 2xxx,6xxx,7xxx →EN-AW-6xxx-T6

mind. 2 Phasen unterschiedlicher chem. Zusammensetzung

Bezeichnungen mit T:

LG=lsg.-gegl., A=abgeschr., KV=kaltverf., KA=kaltausgel., WA=warmausgel.

T1:A+KA, T2:A+KV+KA, T3:LG+A+KV+KA, T4:LG+A+KA, T5:A+WA, T6:LG+A+WA,

T7:LG+A+WA(üh), T8:LG+A+KV+WA, T9:LG+A+WA+KV

Stähle

unlegierte Stähle:

reine Eisen-C-Verbindung, gewisse Elemente durch Erz: Mn, Si

$J0: KV \geq 27 \text{ J @ } 0^\circ\text{C}$, $J2: KV \geq 27 \text{ J @ } -20^\circ\text{C}$, $JR: KV \geq 27 \text{ J @ } 20^\circ\text{C}$

+N ⇒ normalgeglüht, E=P-Gehalt≤0.03% und S≤0.035%

Niedriglegierte Stähle:

keine Legierung über 5% (meist 0.1 bis 2%)

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

hochlegierte Stähle:

mind. 1 Elemente mit +5%, meist völlig andere Gefüge&Eigenschaften

Nichtrostender Stahl (ab 12%Cr):

Schicht haftet gut auf OF, Verletzung Schicht=Wiederaufbau, bis 1100HV

Feinkornbaustähle:

Festigkeit&Zähigkeit steigern (FK-Verfestigung)

γ-Stabilisator:

Ni = Austenitbildner (kfz) →fördert Kaltverformbarkeit

stabilisieren γ-Phase und vergrössern γ-Bereich

α-Stabilisator:

Cr = Ferritbildner (krz) →korrosionsbeständig ab 13%

stabilisieren α-Phase und vergrössern α-Bereich

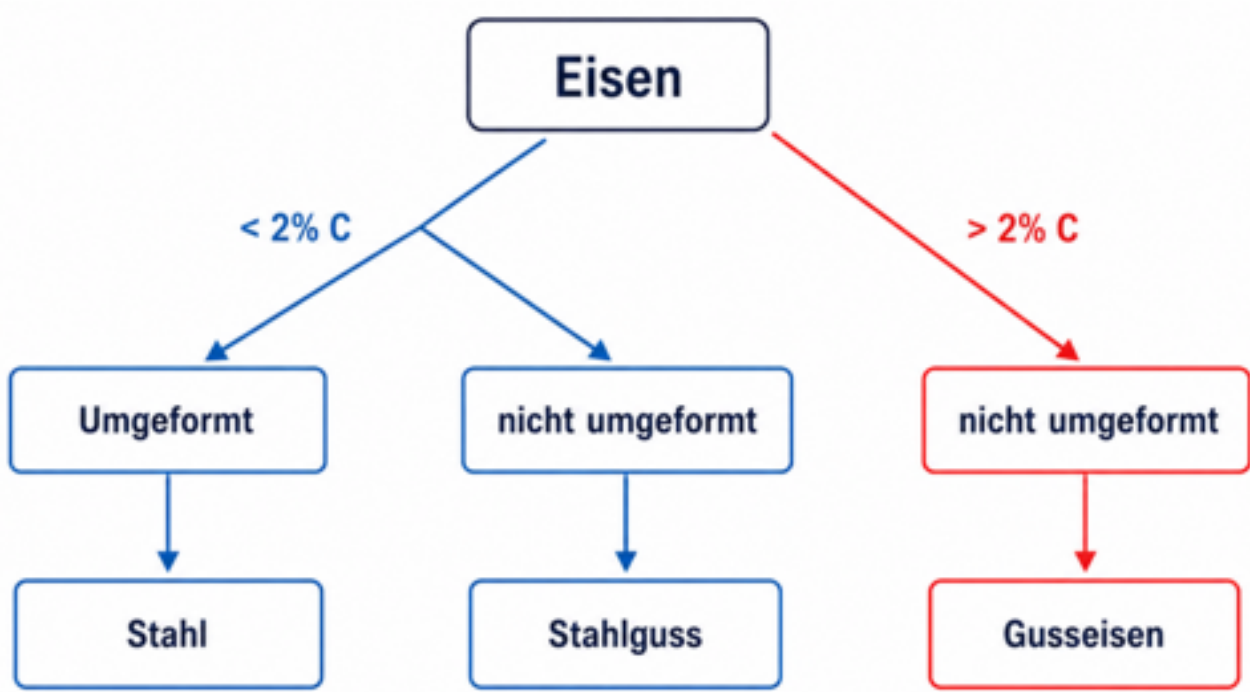
$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0.5 \cdot \%Mn + 7.5 \cdot \%N$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \cdot \%Si + 0.5 \cdot \%Ta + 0.5 \cdot \%Nb + \%Ti$$

Eisenguss

alle Stähle zum Giessen geeignet
Stahlguss: teuer&grösseres Schwindmass als Gusseisen, höhere Festigkeiten

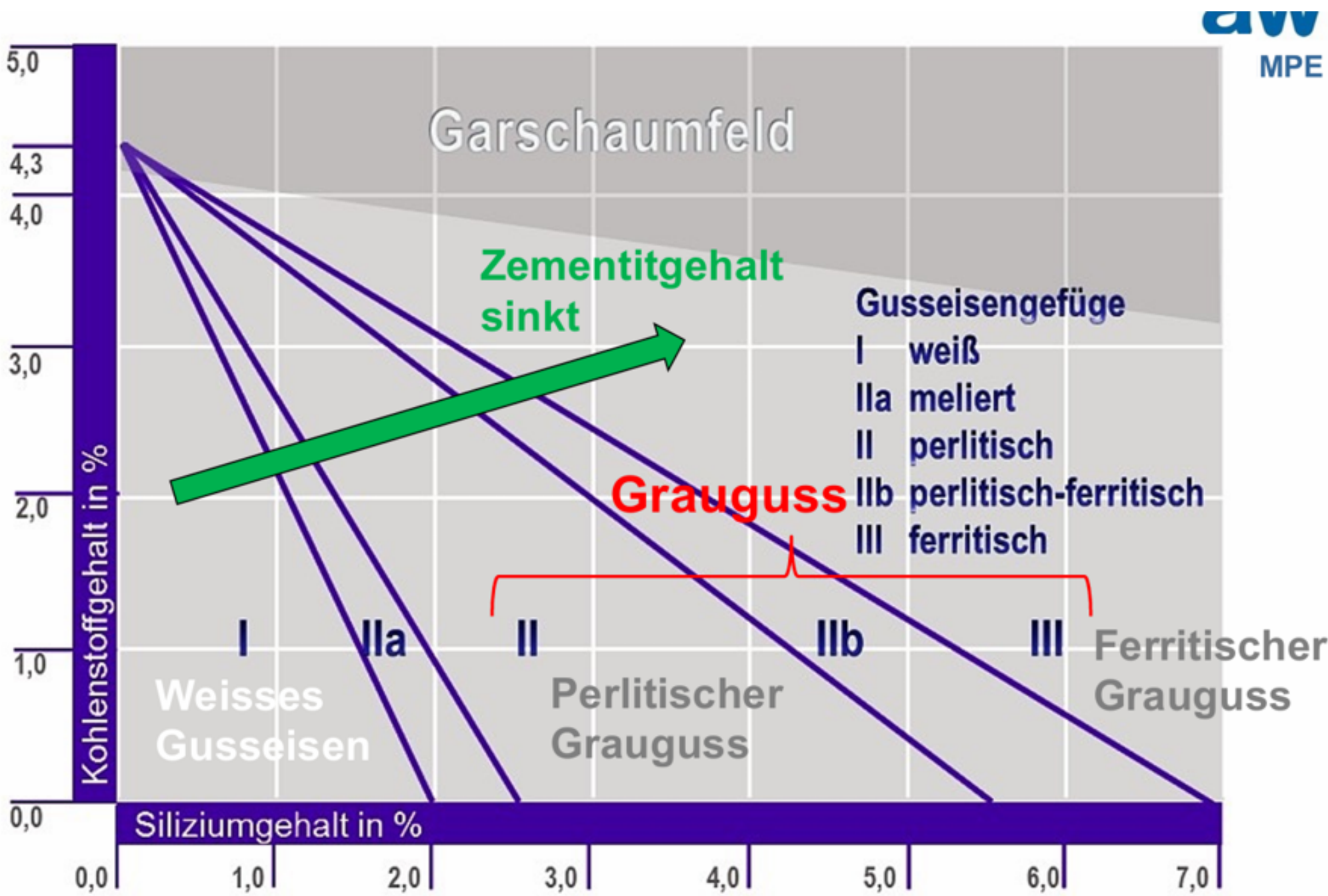
Metastabil	Stabil
Fe+Fe3C	Fe+C
Gebunden als Zementit	Graphit
Schnelle Abkühlung	langsame Abkühlung, >2%C, Si
Stahl & weisses Gusseisen	Graues Gusseisen



GJL: Lamellengraphit
Grauguss, Erstarrung = C scheidet sich als Lamellen aus, Grundgefüge=Perlit
mech. Eigenschaften abhängig von Erstarrungs-v, chem. Analyse
+: Dämpfung (Absorption Lamellen), Druckfestigkeit, Spanbarkeit
–: spröde (Kerbwirkung), Zugfestigkeit (Lamellen wie Risse)

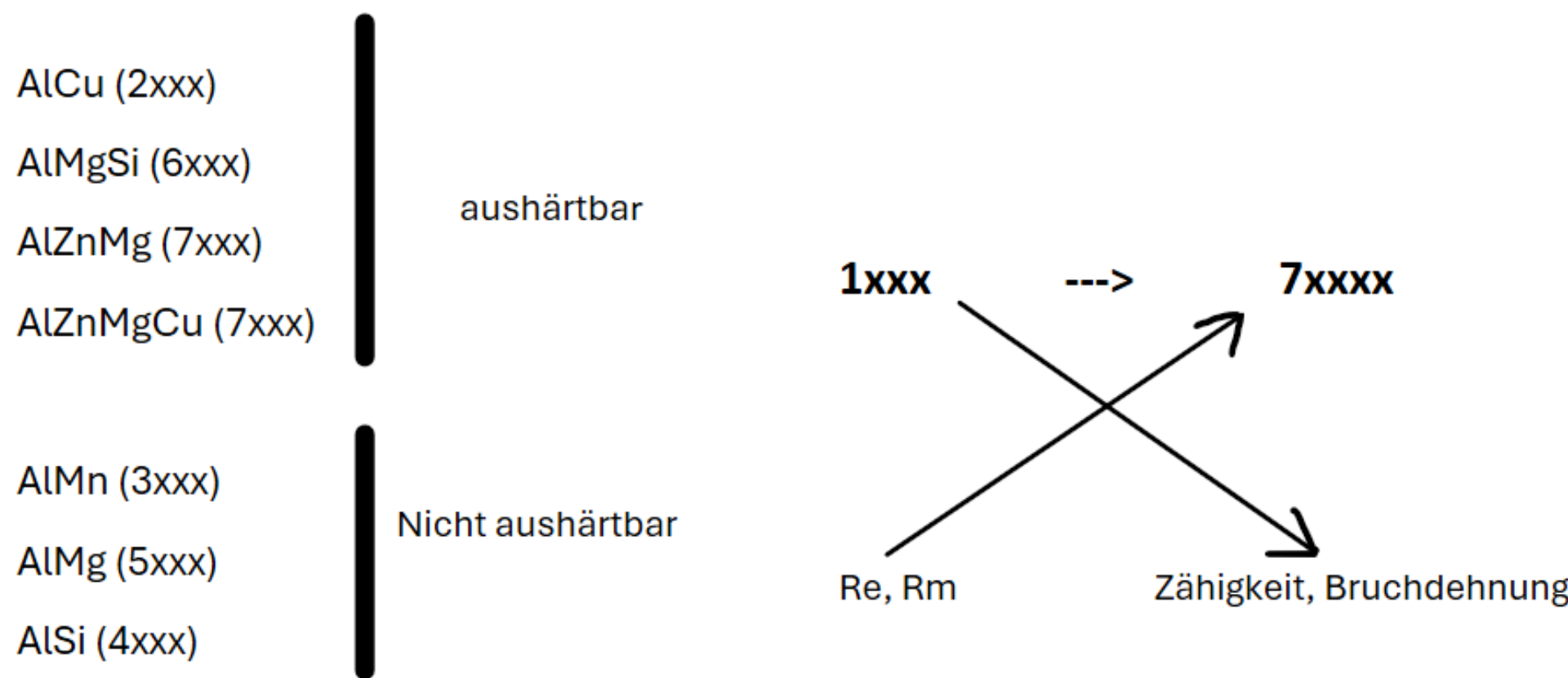
Bez.	Wandstärke	Rm
GJL-150	20–40	120
GJL-150	40–80	110
GJL-150	80–150	100
GJL-150	150–300	90
GJL-200	20–40	170
GJL-200	40–80	150
GJL-200	80–150	140
GJL-200	150–300	130
GJL-250	20–40	210
GJL-250	40–80	190
GJL-250	80–150	170
GJL-250	150–300	160
GJL-300	20–40	250
GJL-300	40–80	220
GJL-300	80–150	210
GJL-300	150–300	190
GJL-350	20–40	290
GJL-350	40–80	260
GJL-350	80–150	230
GJL-350	150–300	210

GJS: Sphäroguss:
Kugel = geringe Kerbwirkung, mind. 5% Mn, FeSiMn, Ferrit Perlit Gemisch
Schon geringste Mengen (Al, Pb, S) können Kugelbildung beeinträchtigen
+: Zähigkeit, Festigkeit, duktil (F&Z abhängig von Mn, Cu, Sn)
–: teuer, halbe Dämpfung wie GJL



Aluminium

krz, KV kaum abhängig von T, E=70000N/mm², E-leitend, 3x leichter als Stahl
Wärmeleitend, Reflektiv



AlSi-Legierung:
95% aller Legierungen, Eut. Punkt bei 12.5 Gew. % Si und 577 °C
langsame Erstarrung = grobe Si-Nadeln, komplexe dünnwandige Gussteile
+: Giessbarkeit, Korrosion, Schweißen, geringe Erstarrungsschrumpfung
Veredelung (Schmelzbehandlung):
feinfasigeres eutektisches Si, bessere mech. Eigenschaften und Gusseigenschaften
AW: Knetlegierung → Eignung zum Umformen
AC: Gusslegierung → Eignung zum Giessen

Magnesium

8-reichstliches Element (25% Mineralien, 75% Meerwasser), Leichtbauwerkstoff
Oxidfilm schützt nicht vor weiterer Oxidation
→Schutzgase: reduziert Verdampfungsrate, verhindert Brand, Oxidationsschutz
Kornfeinung: mit Zirkon, Keimbildung, 0.2%Zr = Korn von 1000 auf 200 qm
+: Bearbeitbarkeit, unbegrenzte Verfügbarkeit, Körperverträglich
–: entzündlich, nicht mit Wasser löschen
AZ91 = Magnesium- Legierung mit 9% Aluminium und 1% Zink
0 = <1% des Stoffes

Aluminium: erhöht Rm, Härte und Giessbarkeit, intermetallische Phase
Zink: erhöht Festigkeit und Giessbarkeit, reduziert Schweißbarkeit

Rauheit

Oberfläche immer charakteristische, betriebs- und fertigungsbedingte Topografie
Ziel: Solloberfläche, Haben: Istoberfläche

1. Ordnung: Formabweichung
2. Ordnung: Welligkeit
3. Rauheit (Rillen)
4. Rauheit (Riefen, Schuppen)
5. Rauheit/Gitteraufbau

Profilfilter – Rauheit von Welligkeit trennen:
λs-Filter: Übergang von Rauheit zu Anteile 5-6. Ordnung
λc-Filter: Übergang von Rauheit zu Welligkeit (cut-off)
λf-Filter: Übergang von Welligkeit zu Form 1. Ordnung
Primärprofil (P-Profil): nach Formentfernung und Anwendung λs
Welligkeitsprofil (W-Profil): P-Profil + λf und λc
Rauheitsprofil (R-Profil): P-Profil + λc

Arithmetischer Mittelwert Ra:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

- Spitzen & Riefen nicht unterscheidbar
- Keine Profilformen erkennbar

Quadratischer Mittelwert Rq:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx}$$

- empfindlich auf Spitzen&Riefen
- Standardabw. Profilhöhenverteilung

Schiefe Rsk, Steilheit Rku

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l |Z^3(x)| dx \right] \quad Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l |Z^4(x)| dx \right]$$

Grösste Höhe des Profils Rz:
Rp = Höhe der grössten Profilspitze Zp, Rv = Tiefe des grössten Profiltals Zv
Rz = sum(Rp,Rv)
Rsm:

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum X_s$$

- mittlerer Abstand Spitzen
- nur periodische Profile

Abbott-Kurve: Materialanteilsverteilung eines Oberflächenprofils
mit Rvk (red. Riefentiefe), Rpk (red. Spitzenhöhe), Rk (Kernrauheitstiefe)

Ermüdung

Risskeimbildung Stadium I:
Gleitbandbildung <45°, Extrusionen&Intrusionen bilden sich, Mikrorisse
Ermüdungsrisswachstum Stadium II:
Mikrorisse →Schwingrisse, transkristallin, senkrecht zur max. Normalspannung
Ende des Ermüdungsrisswachstum Stadium III:
Restquerschnitt nimmt ab→Bruch (Stadium IV)

Schwingstreifen (SII): mikrofraktisch, Ermüdung
Rastlinien: makrofraktisch, bei Änderung der Betriebsbedingungen, Stillstand
→Beanspruchungsänderung→Änderung Riss-v→Oxidation

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad \sigma_a = \sigma_o - \sigma_m \quad R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

Wechselbeanspruchung: R= -1
Zugschwellbereich: 0<R<1, Druckschwellbereich: ∞ <R>1

Wöhler-Diagramm:
Kurzzeitfestigkeit: 10⁰ – 10¹ N, Zeitfestigkeit: 10¹ – 10⁶ N
Dauerfestigkeit: krz ab 10⁶ N und T < 0.4T_s, kfz ab 10⁷ N (Durchläufer)

$$\sigma_D = \sigma_m + \sigma_a \quad \sigma_m \text{ höher} = \text{bricht schneller}$$

