

Diffusion: J = Teilchenfluss [Atome/cm²s] $\frac{dC}{dx}$ = Konzentrationsgefälle [Atome/cm³]
 D = Diffusionskoeffizient [cm²/s] D_0 = Diffusionsparameter (Mat. konst.) [m²/s]
 Benötigt Aktivierungsenergie Q , Platzwechselvorgänge
 Arrheniusgl. $V = \text{Konst.} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$
 Fick'sches Gesetz $J = -D \frac{dC}{dx}$
 Diffusionsstrecke $x = \sqrt{D \cdot t}$
 Diffusionskoeffizient $D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$

(reines Atom) (mit Fremdatom) $R = \text{Gaskonst.} = 8.314 \text{ J/mol K} = 0.008314 \text{ kJ/mol K}$
 Selbstdiff., Fremddiff., Leerstellendiff., Zwischengitterdiff. Q = Aktivierungsenergie [kJ/mol]

Versetzungskern, Korngrenzendiff., T = Temperatur in Kelvin 273K + °C
 Von hoher Konzentration zu tiefer Konzentration t = Zeit in Sekunden

Kristallerholung und Rekristallisation Isotropie
 (thermisch aktivierte Vorgänge) Erholung $T < 0.4 T_s$

Rekristallisation $T > 0.4 T_s$
 • Keine Änderung Korngefüge
 • Neue, spannungsarme Körner wachsen und ersetzen verformte Körner
 • Ein Reset für das Metallgefüge nach starker Verformung
 • Korngrösse gezielt einstellen
 • Versetzungen können sich umordnen und teilweise auflösen
 • Ausheilung dimensionsstabilisierender Fehler

Voraussetzungen

• Mind 5% Kaltverformungsgrad
 • Temp. Tammansche Regel: Metalle $T = 0.4 T_s$ $T_s [K] = 273 K$
 Legierungen $T = 0.5 T_s$
 Einkristall: Gefüge ohne Korngrenzen
 Legierungen $T = 0.5 T_s$

Genügend Zeit für Diffusion (Gleichzeit)
 Je grösser Verformungsgrad $\rightarrow$ umso kleiner neue Körner
 Je länger Glühdauer $\rightarrow$ umso grösser Körner
 Je höher Temp. $\rightarrow$ desto grösser Körner

Sekundärrekristallisation $n < 6$ verformend, $n = 6$ stabil, $n > 6$ wachsend

Bei hohen Temp. und hohen Verformungsgraden
 Sehr grosse Körner entstehen $\rightarrow$ kleine verschwinden

Wärmebehandlung Zähigkeit

Änderung von Festigkeit, Härte, Zerspanbarkeit, Eigenspannungen, Zähigkeit, Verschleissbestand $E = \text{Modul}$

Ferrit (Kfz): Lücken klein und Verzerrung gross
 > Nur wenig C lösbar, max. 0.02% bei 723 °C
 Austenit (Kfz): Lücken grösser und Verzerrung gering
 > Max. 2.06% Kohlenstoff bei 1147 °C

Normalglühen
 Feines Korn

Langsames Erwärmen, bestimmte Zeit halten auf T , Herabsetzung von Härte und Festigkeit
 Verbesserung von Zähigkeit und Umformbarkeit
 Abbau von Eigenspannungen
 Erwärmen 30-50 °C über GSK-Linie, 30 min halten

Spannungsarmglühen

Innere Spannungen/Eigenspannungen abbauen
 Erwärmen auf 550-650 °C, 2h halten, langsam abkühlen
 Elastische Dehnungen werden in plastische Dehnungen umgewandelt

Härten und Vergüten von Stählen

Härten unter St. 0.5% C 20-50K über 60
 0.5% $\rightarrow$ 850 °C
 Voraussetzung: C-Gehalt > 0.2-0.3%, Abschrecken
 Härte und verschleissfeste Oberfläche
 Erhöhen von statischer und dynamischer Festigkeit
 Erhitzen und Halten auf Härte Temp. = Austenitisieren
 Abkühlen = Abschrecken (Diffusionsgeschwindigkeit verringern)

Erhitzen und Halten auf Härte Temp. = Austenitisieren
 Abkühlen = Abschrecken (Diffusionsgeschwindigkeit verringern)

Nur noch langsame Abkühlung an Luft
 Etwas schneller mit bewegter Luft
 Mittelschnell im Ölbad

↳ Neues Gefüge aus verzerrtem Ferrit und vielen eingelagerten Eisen-Kohlenstoff-Kristallen (Zementit)
Abschrecken in Wasser
 Martensit bildet sich
 Kfz klappt in Trz um
 Gesamter Kohlenstoff zwangsgeköst
 Sehr hart und sehr spröde

ZTU-Diagramm

Kontinuierliche Abkühlung
 Normal ohne Unterbrechung
 Isotherme Temp.führung abschrecken
 halten (Bainitisieren)

Härtbarkeit
 • Neigung des Stahls, durch Abschrecken, härter zu werden
 • Aufhärtbarkeit (Grösste durch Härte erzielbare Härte)
 • Härte des reinen Martensit
 • Hängt nur von C-Gehalt ab
 • Einhärtbarkeit Tiefe, bis in die ein Stahlbauteil hinein gehärtet wird, 2mm wirtschaftlich
 • Durch Legierungselemente beeinflusst
 • Stahl gilt als gehärtet, wenn Mindesthärte z.B. 50HRC

Durchhärtung
 Härte Martensit hängt von C-Gehalt ab
 Je höher Legiert Stahl, desto grösser Martensitbereich

Härten Guideline

• Nur so schnell wie nötig abkühlen
 • So gleichmässig wie möglich
 • Innerhalb grosser Serie immer gleich abkühlen
 • Direktes Härten: Kontinuierliches abkühlen aus Austenitbereich ohne Unterbrechung
 • Einfach und kostengünstig
 • Hohe Eigenspannungen und Verzerrung
 • Warmbadhärten: in Salzbad bis knapp oberhalb Martensitstarttemp., kurz halten, dann in Öl oder Luft

Isothermisches Umwandeln von Stahl (Bainitisieren)

Probe abschrecken und anschliessend auf gleicher Temp. halten bis vollständig umgewandelt
 Gebrochene Härten: zuerst in Wasser bis ca. 300-400 °C, dann weiter im Öl
 • Geringe Eigenspannungen, weniger Härterisse
 • Viel Erhärzung nötig
 • Geringe Verzerrung
 • Geringe Rissgefahr

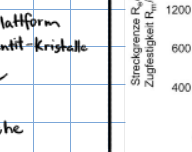
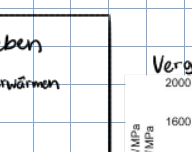
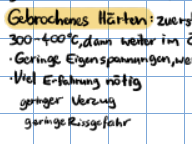
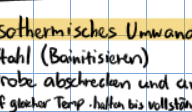
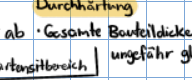
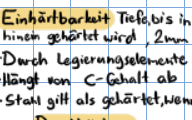
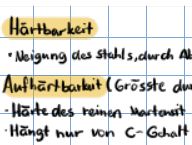
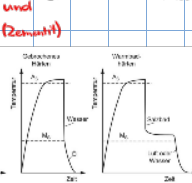
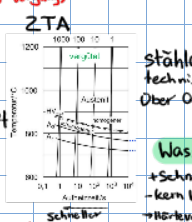
Wärmebehandlung Zähigkeit
 Änderung von Festigkeit, Härte, Zerspanbarkeit, Eigenspannungen, Zähigkeit, Verschleissbestand $E = \text{Modul}$

Normalglühen
 Feines Korn

Langsames Erwärmen, bestimmte Zeit halten auf T , Herabsetzung von Härte und Festigkeit
 Verbesserung von Zähigkeit und Umformbarkeit
 Abbau von Eigenspannungen
 Erwärmen 30-50 °C über GSK-Linie, 30 min halten

Spannungsarmglühen

Innere Spannungen/Eigenspannungen abbauen
 Erwärmen auf 550-650 °C, 2h halten, langsam abkühlen
 Elastische Dehnungen werden in plastische Dehnungen umgewandelt



Härten unter St. 0.5% C 20-50K über 60
 0.5% $\rightarrow$ 850 °C

Unterschiedliche Abkühlmedien: Gezieltes Gefüge
 Stahl definierte Härte erreicht
 Kochsalzlösungen unterdrücken Dampfblasenbildung
 Max. Betriebstemp. = kleiner als Anlasstemp.

Stähle unter 0.2%
 technisch nicht mehr härter
 über 0.7% steigt Härte noch kaum

Wasserhärtung:
 • Schneller Martensit am Rand
 • Kern kühlt langsamer $\rightarrow$ Bainit oder Perlit
 • Härteverlauf parabolisch

Nitrierhärten:
 Stickstoff bindet mit Legementen
 zu harten Nitriden
 Härte Oberfläche, gute Gleit, korrosions-
 eig.

Härtbarkeit
 • Neigung des Stahls, durch Abschrecken, härter zu werden
 • Aufhärtbarkeit (Grösste durch Härte erzielbare Härte)
 • Härte des reinen Martensit
 • Hängt nur von C-Gehalt ab
 • Einhärtbarkeit Tiefe, bis in die ein Stahlbauteil hinein gehärtet wird, 2mm wirtschaftlich
 • Durch Legierungselemente beeinflusst
 • Stahl gilt als gehärtet, wenn Mindesthärte z.B. 50HRC

Durchhärtung
 Härte Martensit hängt von C-Gehalt ab
 Je höher Legiert Stahl, desto grösser Martensitbereich

Härten Guideline
 • Nur so schnell wie nötig abkühlen
 • So gleichmässig wie möglich
 • Innerhalb grosser Serie immer gleich abkühlen
 • Direktes Härten: Kontinuierliches abkühlen aus Austenitbereich ohne Unterbrechung
 • Einfach und kostengünstig
 • Hohe Eigenspannungen und Verzerrung
 • Warmbadhärten: in Salzbad bis knapp oberhalb Martensitstarttemp., kurz halten, dann in Öl oder Luft

Isothermisches Umwandeln von Stahl (Bainitisieren)
 Probe abschrecken und anschliessend auf gleicher Temp. halten bis vollständig umgewandelt
 Gebrochene Härten: zuerst in Wasser bis ca. 300-400 °C, dann weiter im Öl
 • Geringe Eigenspannungen, weniger Härterisse
 • Viel Erhärzung nötig
 • Geringe Verzerrung
 • Geringe Rissgefahr

Wärmebehandlung Zähigkeit
 Änderung von Festigkeit, Härte, Zerspanbarkeit, Eigenspannungen, Zähigkeit, Verschleissbestand $E = \text{Modul}$

Normalglühen
 Feines Korn

Langsames Erwärmen, bestimmte Zeit halten auf T , Herabsetzung von Härte und Festigkeit
 Verbesserung von Zähigkeit und Umformbarkeit
 Abbau von Eigenspannungen
 Erwärmen 30-50 °C über GSK-Linie, 30 min halten

Spannungsarmglühen
 Innere Spannungen/Eigenspannungen abbauen
 Erwärmen auf 550-650 °C, 2h halten, langsam abkühlen
 Elastische Dehnungen werden in plastische Dehnungen umgewandelt

Vergüten Härten und anschliessendes Anlassen

→ Hohe Festigkeit und Hohe Zähigkeit

Band-schichthärten Austenitisieren der Oberfläche mit anschliessender abschrecken

Ohne Änderung der chem. Zusammensetzung: Flammhärten, Induktionhärten, Strahlhärten
 mit: Einsatzhärten: Aufkohlen, tiefe ca. 2mm, abschrecken, Bruch nicht katastrophal
 Nitrieren: Nitride (Verbindungen mit Stickstoff), verzug und eigenspannungen gering, Oberfläche sehr hart

Kristallbaufehler:

Nulldimensional: Leerstellen
 Zwischengitter Atoms, kleines
 grosses Substitutionsatom
Ein-dimensional: Linienfehler, Versetzungen
 Reihen können nacheinander Energieschwellen
 überwinden $\rightarrow$ 100-1000x geringerer Kraftaufwand
Zwei-dimensional: Korngrenzen, Phasengrenzen
 Verschiedene Kristalle, Zwillingsgrenzen
 (symmetrische Korngrenzen) $\rightarrow$ erhöht
 mechan. Eigenschaften.
Drei-dimensional: Lunker, Teilchen ausscheidung.

Verfestigungsmechanismen:

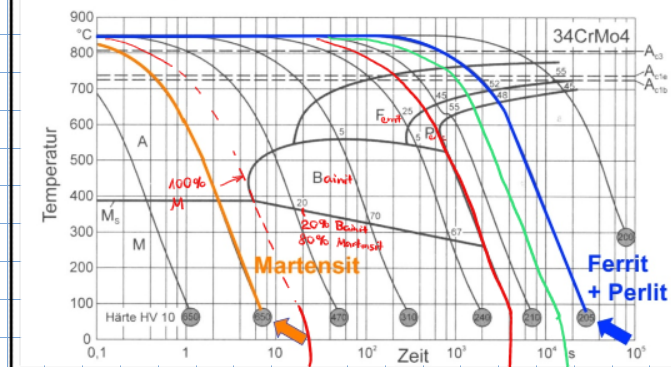
• Gitter Grundstruktur $\rightarrow$ Nachkristall-Versetzungen: 8 Körner $\rightarrow$ Ausscheidung
 • **Mischkristalle:** Fremdatome Zulegen $\rightarrow$ Substitution
 oder Zwischengitteratom $\rightarrow$ Spannung im Gitter
 $\rightarrow$ Erhöht Verfestigungsbewegung
 • **Versetzungen:** Plastische Verformung, Stauen an
 Gitterfehler, Kaltverformung: Versetzungen
 blockieren sich gegenseitig
 • **Korndurchmesser:** unedele Übergänge behindern
 das Gleiten, Feinkorn $\rightarrow$ hohe Festigkeit!
 • **Ausscheidungen:** übersättigter Mischkristall,
 Ansammlungen an einer Flanke $\rightarrow$ Grösse
 der Teile optimal blockieren Versetzungen.

Ausscheidungshärten

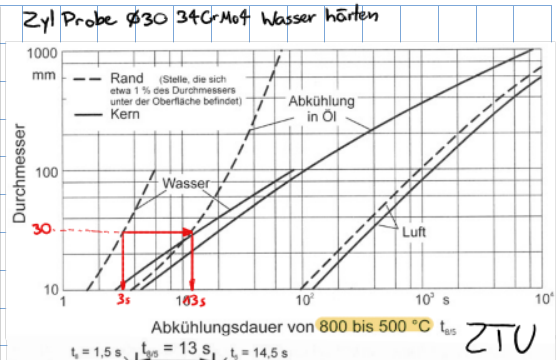
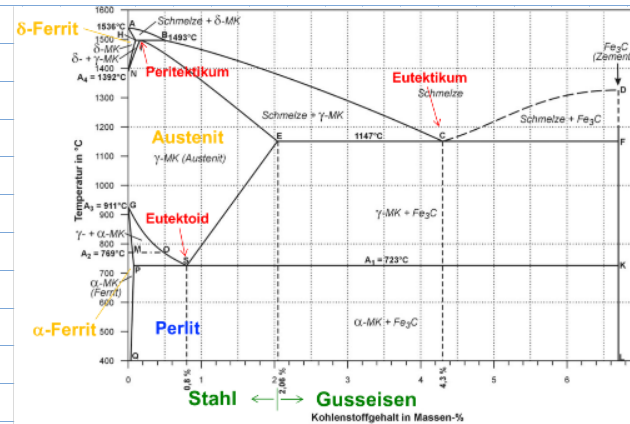
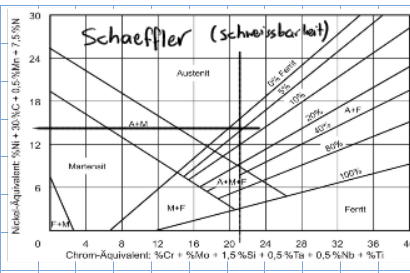
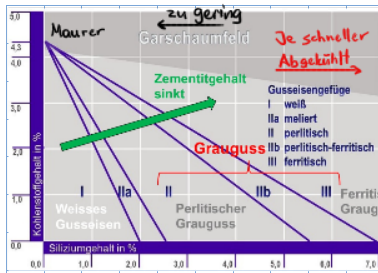
Schneiden von Ausscheidungen, Versetzung schneidet durch Ausscheidungen
 Umgehen von Ausscheidungen (Orvan-Mechanismus) Versetzungen biegen um Ausscheid. herum

1. Lösungsglühen 500-550 °C Legierungselemente lösen sich im Aluminium $\rightarrow$ ein homogenes
 MK-Gefüge
 2. Abschrecken, Legierungselemente haben keine Zeit sich wieder auszuscheiden
 (warm schnell
 3. Auslagern, Bildung fein verteilter zern/Ausscheidungen Kaltanlag. langsam, 150-200 °C

Reales ZTU-Diagramm von Stahl 34CrMo4



Härten Martensit hart, spröde
Vergüten Martensit + Ferrit zäh, fest
Glühen Ferrit + Perlit weich, umformbar



C im Stahl auf Zwischengitterplätzen
Stähle
 HS 10-4-3-10

Wolfram, Molybdän, Vanadium, Cobalt
 Unleg. Stähle → C kein Legierungselement
 Niedrigleg. kein Leg. Element über 5%
 Hochleg. mind. 1. Element über 5%

Legierungselemente:

Austenit γ-Stabilisatoren (Nickel) Kfz
 Ni, Co, Mn, V

Ferrit α-Stabilisatoren (Chrom) Kfz
 Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W

Chrom ab 13% Korrosionsbeständig
 Nickel Äquivalent:

$\%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn + 7.5\%V$
 Chrom Äquivalent:

$\%Cr + \%Ni + 1.5\%Si + 0.5\%Ta + 0.5\%Nb + \%Ti$
 Wört bei % einsetzen

Verhältnis $Cr/Ni = \frac{Cr}{Ni}$

Zug mind. 12% Chrom → dünnedichte
 Chrom oxidschicht, kein Abplatzen, 1000HV

Feinkornbaustahl → Feinkornverfestigung
 kein als Start, nicht nötig hoch T walzen,
 Zugabe von Elementen

Stahlguss → zähflüssig, erstarrt Grobkörnig
 höhere Festigkeit als Gusseisen

Metastabiles Fe-Fe₃C, rasche Abkühlung
 Si < 0.5%, helle Bruchfläche, weiss erstarrt

Stahl/Weisses Gusseisen, Gebunden als Fe₃C
 Stabiles System Fe-C, Graphit, Si > 0.5%

Sehr langsame Abkühlung, dunkle Bruchfläche
 Graues Gusseisen

GJL-Lamellen, GJS-Kugel, GJV-Vermici
 Bevorzugt → Lamellen (Spannungsspitzen)
 Kugeln verteilen Kraft besser

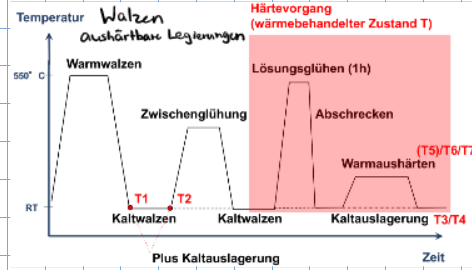
GJL - Bei Erstarrung → Kohlenstoff scheidet
 als Lamelle aus, 2.5-3.6% C, 1.2-2.7% Si
 Grundgefüge: Perlit, teilweise Ferrit, Eigenschaften:

Rel. spröde, Gute mech. Dämpfung, gute Haltbarkeit
 Gute spanende Bearbeitung, lokal Druckbelastung

GJS - Höhere Zähig., Festigkeit als GJL
 Schlechte Dämpfung als GJL, 0.05% Mg voraussetz.

Oberflächenpannung erhöht, Geringer Gehalt an
 S, Al, Pb → Kugelformbildung, leichtfruchtigen

Mn, Cu, Sn beeinflussen Festigkeit und Härte
 3.2-3.8% C, 2-2.9% Si



Magnesium oxidschicht schützt nicht vor weiterer Oxidation
 Schutzgas, Kornfeinung Zirkon wenn aluminiumfrei
 TiC, AlN, Al₄C, SiC wenn Aluminium haltig

Leichtestes Strukturmetall $\delta = 1.74 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, Leichtbaustoff
 Selbstentzündungsgefahr, Vorsicht mit Wasser

Leg. Al-Zn-Mg, Al-Si, Zink Al₂O₃, falls 60-70, Mg gehalt < 1%
 Al erhöht Zugfestigkeit und Härte, Verb. Gussbarkeit

Zink Verb. Gussbarkeit, Festigkeitsteigerung,
 Aluminium Elektrolyse Redox reaktion Nicht 2. häufigste

Kryolith Na₃AlF₆, red Ts auf 950-1000°C Element extrahiert
Spulgasbehandlung Gas in SM gelassen,
 Verunreinigungen werden entfernt

Gießen: Kornfeinung Titan-Bor Stab in SM
 verteilt sich, bildet Kerne → Feines Korn

Boizen → Pressen, Barten → Walzen
Eigenschaften: Al₂ = 1/3 Stahl Gewicht, 1/3 Emodul St

64% Leitfähigkeit von Kupfer
 Doppelt so hohe Wärmeleitfähigkeit pro kg vgl. Cu

Alu → Kfz, kein einfluss auf kerbschlagarbeit
 Höhere Festigkeit bei tiefen Temp.

Leg: Mg, Mn MK nicht aushärtbar
 Cu, Si, Zn Ausscheidungen aushärtbar

Knetleg. EN AlMg-XXXX
 Warmwalzen T > 0.4 T_s, Kalt T < 0.4 T_s

Gussleg. EN AlSi-XXXX
 AlSi 95% aller Gussstücke, Gut Gussbar,
 Hohe Korros., Gute Schweißbarkeit, Geringe Erstarrungs

Langsame Abkühlung → grobe Si-Nadeln, Dendriten
Veredelung: Natrium, Strontium, bessere mech.

Eigenschaften, Gießeigenschaften
 Faseriges eutektisches Silizium

Je niedriger Aktivierungsenergie th akt. vorg. desto schneller vorgang v
 Je höher Temp bei th akt. vorg. desto langsamer vorgang x

T bei Normalglüh 100°C zu tief → keine Austenitbildung
 langsame Abkühlung an Luft Diffusion mehr Zeit, A₃, A₁ ca 40-30°C tiefer

Mittelschnelle Abkühlung Ölbad, Eisenmaße nicht mehr diffundieren, zähflüssige Ferrit
 0.3% C Korrekte Glühzeit 845-865°C, C-Gehalt Phasen $\alpha \approx 0.35\%$, Mangan Gehalt 2.0%

Alu bei 120°C im Einsatz, Atome diffundieren weiter von kl zu gross Ausscheid → Überhütung
 Dünne Lamellen bei Perlit = schnelle Abkühlung, geringe Diffusion C-Atome

AlCu 4% Cu, 540°C gegläht, langsam abgekühlt, 3T ausgelagert, zu hohe Auslage T
 Abschrecken fehlt

Randschichthärtungen: Dicke Induktionhärtungen über Frequenz von Wechselstrom
 Flammhärtungen voraussetz: St. mehr als 0.2% Kohlenstoff

Versetzungen im Gitter ermöglichen Pl. Verformung, bestimmen Festigkeit
 Kaltverformung: ① Zugfestigkeit, Streckgrenze, Härte, ② Bruchdehnung, Bruchdehnung, = E-Modul

Ziele Rekristallisation: Neubildung Gefüge, Verb. Verformbarkeit, Einstellen Korngröße, Versetzungarme Körner
 Beeinflussung gelöster Leg. Härte stahl: Ms verringert sich durch Leg. Elemente, Durch Leg. Elemente, Umwandlungen später

Abkühlgeschw. eines Leg. St. kleiner als unleg.
 ZTU: Härte, Prozentuale Zusammensetzung, Umwandlungsbeginn, Austenitisierungstemp

Ursache Ermüdung: zyklische Belastung, Bildung Extrusion/Intrusion, Abkühlen, Überschreiten
 Dauerfestigkeit

Schwingstufen: Bestandteil Schwingstufen, Belastungsänderung Stillstand, Ansaug. Rissausbreitung
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingfestigkeit: ① Oberflächenhärtungen, Kugelstrahlen, Polieren, ② Korrosion, Grobdehnung, Sandstrahlen
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingstufen: Bestandteil Schwingstufen, Belastungsänderung Stillstand, Ansaug. Rissausbreitung
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingfestigkeit: ① Oberflächenhärtungen, Kugelstrahlen, Polieren, ② Korrosion, Grobdehnung, Sandstrahlen
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingstufen: Bestandteil Schwingstufen, Belastungsänderung Stillstand, Ansaug. Rissausbreitung
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingfestigkeit: ① Oberflächenhärtungen, Kugelstrahlen, Polieren, ② Korrosion, Grobdehnung, Sandstrahlen
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

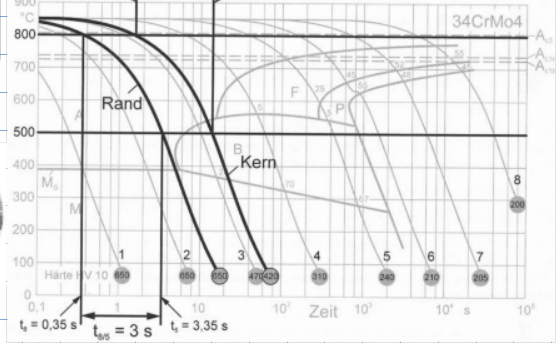
Schwingstufen: Bestandteil Schwingstufen, Belastungsänderung Stillstand, Ansaug. Rissausbreitung
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

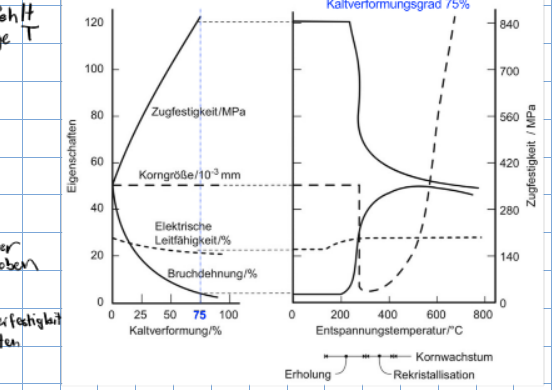
Schwingfestigkeit: ① Oberflächenhärtungen, Kugelstrahlen, Polieren, ② Korrosion, Grobdehnung, Sandstrahlen
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen

$R = \frac{\sigma_{\text{unten}}}{\sigma_{\text{oben}}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$, Risskeimbildung, transkristallin, Gewaltbruch, Zugfestigkeit

Schwingstufen: Bestandteil Schwingstufen, Belastungsänderung Stillstand, Ansaug. Rissausbreitung
 Rastlinien: Änderung Belastungsamplitude, oxidation während Stillständen



Abgrenzung Rekristallisation zur Erholung
 Kaltverformungsgrad 75%



ZTA
 Aufheizgeschwindigkeit K/s

