

Werkstofftechnik

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut Werkstoffwissenschaften

1. Semester

Dieses Script ist eine Mitschrift der Vorlesung von Frau Dr. Simmchen, geschrieben von Philipp Ivic (philipp.ivic@gmx.net) im WS 2005/06 an der TU Dresden. Das Script erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit noch Richtigkeit der in ihm angegebenen Informationen. Ich übernehme keine Haftung für Schäden irgendwelcher Art (schlechte Noten, evtl. sogar Exmatrikulation etc.), die durch eventuell falsche Informationen aus diesem Script entstanden sind.

Letzte Änderung: 03. Februar 2006

Prüfungsvoraussetzung: Praktika (Zustandsdiagramme, Gefügeuntersuchung, Härteprüfung, Zugversuch)
Vorbereitung Praktikum: www.tu-dresden.de/mw/iww/iww.html
Praktikumsgebäude: Schumannbau, Westhof, A20-A29
Gruppeneinteilung vor erstem Praktikum, SCHU/A20
Praktikumsgruppe/Zeit: Mi, 19. Oktober, 12.10 - 12.40 Uhr
Bei Verhinderung: SCH/A29, Fr. Galle, Hr. Sadowski (Mo 8.30 – 9.15, Fr. 14.30 – 15.30)
Skript: www.tu-dresden.de/mwiww/wz.html → Lehre
Literatur: Simmchen/Riehle - „Grundlagen der Werkstofftechnik“

Praktikum Gefügeuntersuchung

Begriffe:

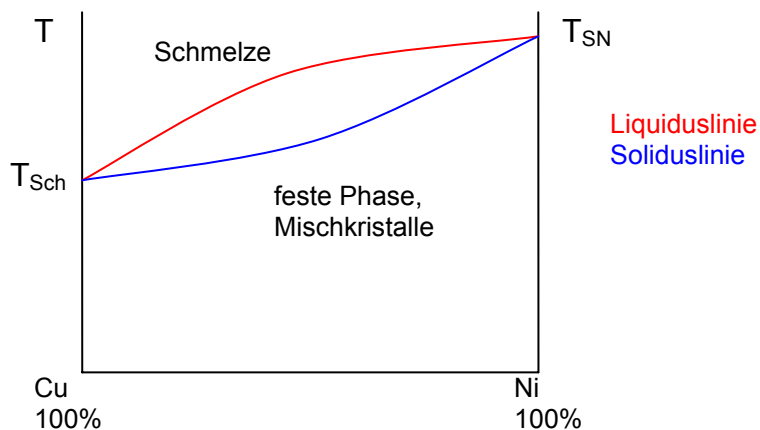
Material → Herstellung von Erzeugnissen für technische Verwendung → Werkstoff
zur Ausführen von Arbeitsprozessen
Weiterverarbeitung zu konstruktiv vorgedachtem Gegenstand

Festkörper: Schmelze → Absenken der Temperatur → Festkörper ($T_{\text{Schmelztemperatur}}$)
– Erstarrung: Keime (kleine Würfel, reines Metall, flächenzentriert/raumzentriert)

Gefüge bestimmt Eigenschaften eines Stoffes

Zustandsdiagramme

2 Metalle: Cu-Ni



Härteprüfung

Werkstoffeigenschaften

- physikalische: Dichte
- chemische: Normalpotential → Korrosion
- mechanische:
 - Härte (= Widerstand gegenüber Eindringen härterer Körper)
 - Festigkeit (= Widerstand gegen Verformung (elastisch, plastisch/bleibend))

Zugversuch

Idealgitter: 0-dimensionale Fehler
1-dimensionale Fehler: Versetzungen
2-dimensionale Fehler: Korngrenze

$$\frac{F}{A} = \sigma$$

τ – Schubspannung

21.10.05

1 Einführung

1.1 Historische Entwicklung der Werkstoffe

1.2 Werkstoffbegriff

Festkörper

1.3 Werkstoffverbrauch, Werkstoffverfügbarkeit, Recycling

1.4 Aufgaben und Eigenschaften von Werkstoffen

28.10.05

Allgemeine Eigenschaften

Metalle

- gute Leitfähigkeit für elektrischen Strom und Wärme
- Temperatur steigt → Leitfähigkeit sinkt
- Reflexion für Licht → metallischer Glanz
- Plastisch verformbar auch bei tiefen Temperaturen
- Gute oder weniger gute chemische Beständigkeit
- Kristalliner Aufbau

Halbleiter:

- Temperatur steigt → Leitfähigkeit steigt
- Bsp.: Silicium, Germanium, GaAs

Keramik/Glas:

- Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe
- Schlechte elektrische Leiter bzw. Isolatoren
- Bei tiefen Temperaturen sehr spröde
- Nicht plastisch verformbar
- Amorphe (Glas, durchsichtig) oder kristalline (Keramik) Struktur
- Hohe Schmelztemperatur
- Chemische Beständigkeit

Polymere:

- Schlechte elektrische Leitfähigkeit – Nichtleiter
- Bei tiefen Temperaturen spröde
- Bei höheren Temperaturen zum Teil plastisch verformbar
- Geringe Dichte
- Schmelzen oder Zersetzen (→ Pyrolyse) bei hoher Temperatur
- Bei relativ niedrigen Temperaturen

2 Grundlagen der Werkstoffverarbeitung und – Anwendung

2.1. Aufbau der Werkstoffe

Struktur: Kristallstruktur, Molekülstruktur
Geometrische Anordnung der Bausteine
Atome, Moleküle, Ionen

Gefüge: - amorphe Bestandteile
- kristalline

Gefügegrenzen, Phasengrenzen

2.1.1 Aufbau des freien Atoms

Kern: Protonen, Neutronen positiv, Durchmesser 10^{-15} m
Hülle: Elektronen negativ, Durchmesser 10^{-10} m; 0,1 nm

z-Ordnungszahl = Zahl der Protonen, Zahl der Elektronen

Atomhülle: System von erlaubten Energieniveaus für Elektronen

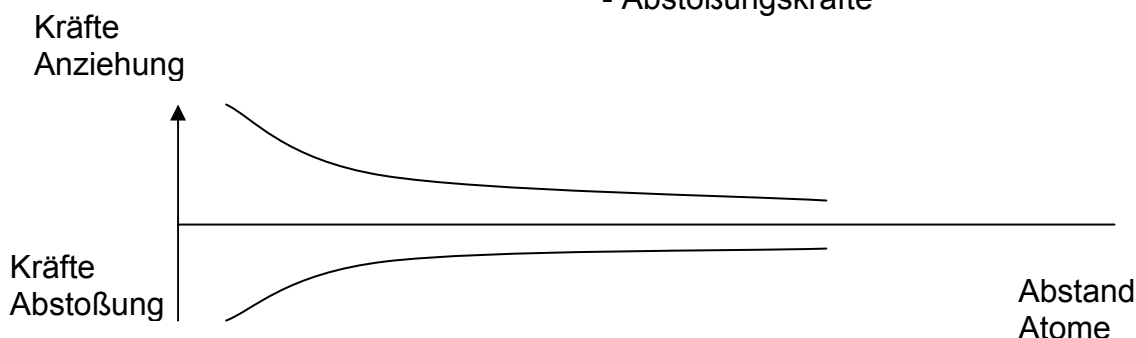
Hauptquantenzahl	Nebenquantenzahl	Magnetquantenzahl	Spinquantenzahl
$n=1,2,3\dots7$	$l=0,1,2,3$	$M_l = -l\dots+l$	$m_s = +1/2, -1/2$
K, L, M	s, p, d, f		

2.1.2 Bindungen im Festkörper

Bindungen zwischen Atomen: - gleichartige
- verschiedenartige

Ziel: Energieeinsparung

Wechselwirkungskräfte: - Anziehungskräfte
- Abstoßungskräfte



- Für Trennung:
- Energiezufuhr
 - thermische Energie → Schmelzen, Sublimation
 - hohe mechanische Energie
 - Überwinden der Bindungskräfte
 - Bruch

Hauptvalenzbindungen

Ionenbindungen

Abgabe oder Aufnahme von einem oder mehreren Elektronen

positiv → Kation

negativ → Anion

räumliche Anordnung: Ionengitter

Anordnung durch geometrische Gesichtspunkte bestimmt

Eigenschaften: neutral → keine freien Elektronen → schlechte Leitfähigkeit für

Wärme und Elektrizität → Isolatoren

Mechanische Eigenschaften:

- schlecht oder nicht verformbar
- Bruch an Spaltflächen
- → spröde

04.11.05

Atombindung/kovalente Bindung

Annäherung von 2 Atomen – gemeinsame Elektronenhülle

Orbitale → räumliche Anordnung, bestimmte Formen → gerichtete Bindungen

Bsp.: Kohlenstoff: Grundzustand $1s^2 2s^2 2p^2$ → Elektronenübergang $1s^2 2s^1 sp^3$ 4

ungepaarte Elektronen „ sp^3 -Hybridisierung“, Orbitalbildung; C ist tetraedisch angeordnet → Diamant

C wird 4-bindig, Polymere, Ketten

Eigenschaften:

- hohe Härte
- hohe Sprödigkeit
- hohe Schmelztemperatur
- Isolatoren

Metallbindungen

Atomrümpfe und Elektronengas → gemeinsame Nutzung

Ungerichtete Bindung, dichte Anordnung → gute plastische Verformbarkeit

Nebervalenzbindungen

- Wasserstoffbrückenbindung – feste Nebervalenzbindung
z. B. H_2O – Verbindung zweier Wassermoleküle
- Van-der-Waals Bindung – Dipolbindung durch Schwingungen der Elektronen
→ Anziehung

2.1.3 Entstehung fester Körper

Flüssiger Zustand: regellose Verteilung der Bestandteile (Atome, Ionen, Moleküle)

ändert sich mit der Zeit

Kurzzeitig Bindungen → Nahordnung, ständiger Wechsel

Abkühlung: freie Beweglichkeit der Bestandteile nimmt ab

Bestimmte Temperatur: keine Beweglichkeit mehr, fester Zustand

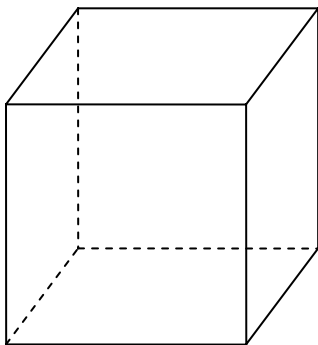
amorph
 $T < T_F$ Einfriertemperatur
Keine direkte Gestalt

kristallin
 $T < T_K$ Kristallisationstemp.
dreidimensional periodische
Anordnung \rightarrow Fernordnung
Energieärmer als amorpher
Zustand
Metalle – kristallin
amorph:
- Abkühlung der Temperatur $>$
5000 K/s
- Größe und Gestalt der
Bausteine
- Bindungsverhältnisse

Eingefrorene Flüssigkeit

Kristall: homogen
 anisotrop: unterschiedliche Eigenschaften in unterschiedlichen
 Richtungen

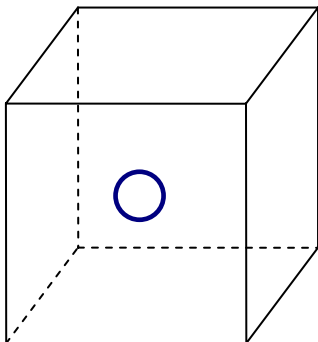
2.1.4 Strukturen von Metallen und Legierungen



Gitter
Kristallgitter
Kristallstruktur
Struktur

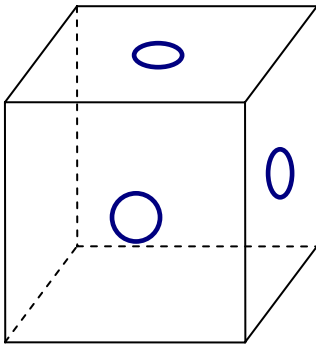
Verschiedene Kristallstrukturen: kubisch ($a=b=c$, 90°), tetragonal ($a=b \neq c$, 90°),
rhombisch ($\neq 90^\circ$)

Kubisch-raumzentriertes Gitter (krz)



Elementar Zelle EZ
Anzahl Atome $1 + 8 \cdot 1/8 = 2$
Atome/EZ
Alpha-Fe, Cr, V, Mo, Beta-T, Na, K

Kubisch-flächenzentriertes Gitter fz



$$a_0 = \frac{4}{\sqrt{2}} * r$$

$$8 * \frac{1}{8} + 6 * \frac{1}{2} = 4 \text{ Atome / Elementarzelle}$$

$$\text{Packungsdichte: PD} = \frac{\text{AnzahlAtome / EZ} * \text{VolumenAt}}{\text{VolumenderEZ}}$$

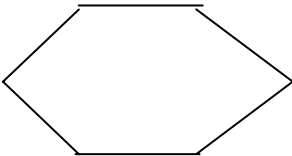
$$\frac{4 * \frac{4}{2} \pi * r^3}{a_0^3}$$

PD = 0,74 im krz Gitter

PD = 0.68 im kfz Gitter (Cu, Au, Ni, Gamma-Fe)

Hexagonal dichteste Packung hdP

Basisfläche: Sechsecksäule dichteste Packung
6 Atome/EZ ,Pd = 0,74, Zn, Mg, alpha-Ti, Be

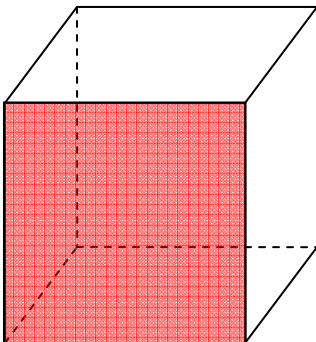


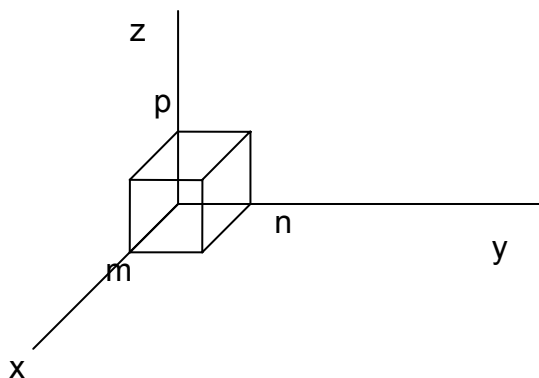
Polymorphie: Vielgestaltigkeit, allotrope modifikationen, möglich bei bestimmten Temperaturen Gitterwechsel.

Millerische Indizes

Flächen bezeichnen

Ebenen mit Atomen besetzt, Netzebenen





$m \cdot a$ $n \cdot b$ $p \cdot c$ Schnittpunkt mit Achsen
 Bildung Kehrwert
 $1/m$ $1/n$ $1/p$
 Multiplikation mit kleinstem gemeinsamen Vielfachen
 Ebene: (hkl)

Indizes:

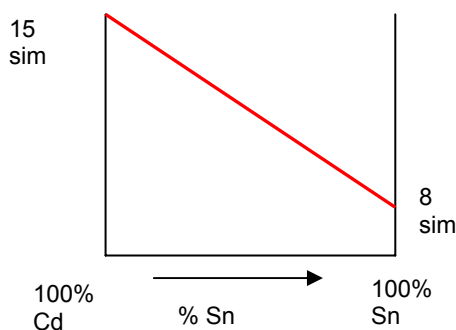
- 100: Würfelebene
- 110: Rhombendodekaederebene (Diagonale Fläche)
- 111: Oktaederebene (Fäche zweier in einer Ebene liegender Punkte zu einem Eckpunkt der gegenüberliegenden Ebene)

Leistungsstrukturen und Eigenschaften

technische Stoffe:

- Verunreinigungen: Fremdatome
- Legierungen: Legierungsatome

Kristallgemisch: jedes Element bildet eigene Körner
Elektrische Leitfähigkeit



Änderung ist proportional den
 Volumenteilen
 Kein Einfluss der Größe und Anordnung
 der Kristallite

Mischkristall

Grundmetall A – Gitter

Aufnahme von Fremdatomen A \rightarrow alpha-Mk
B \rightarrow betta

Austauschmischkristall – Substitutions-Mk

Fremdatome besetzen reguläre Gitterplätze

Atome Grundmetall und Fremdatome müssen ähnlich in Größe und Eigenschaften sein.

Verteilung der Atome: statistisch, geordnet

Mischbarkeit:

- unbegrenzt (Bedingung: beide Metalle gleicher Gittertyp „isotyp“, Unterschied in Atomradien $< 15\%$, geringe chemische Affinität; „Regel von Hume-Rothery“)
- begrenzt

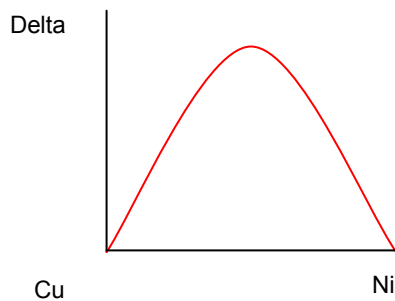
Cu: $a=3,61 \cdot 10^{10}$
Gitterkonstante; "Vegardsche Regel"

N: $a=3,524 \cdot 10^{10}$

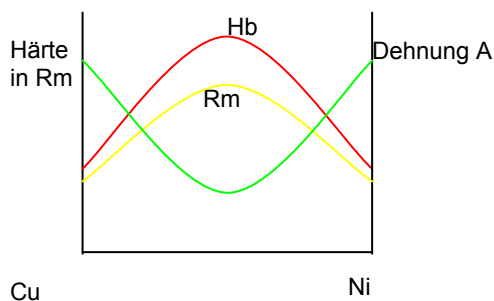
lineare Änderung der

$\Delta \hat{O}_{\text{Atom}} \rightarrow$ Verspannungen im Gitter \rightarrow Grenzspannung \rightarrow Löslichkeit

Eigenschaften



Maximum alpha 50%
Praxis: reines Cu \rightarrow Leiterwerkstoff
Cu-Ni-Legierung: Cu Ni 44
Widerstandslegierung „Konstantan“



Überstrukturen

Bildung beim Abkühlen bei bestimmter Temperatur

Schmelze \rightarrow fester Zustand, Erstarrung

Keine Überstruktur

\rightarrow Verhinderung durch schnelles Abkühlen

\rightarrow Temperaturerhöhung: Bildung Überstruktur

18.11.05

Einlagerungsgemischkristall

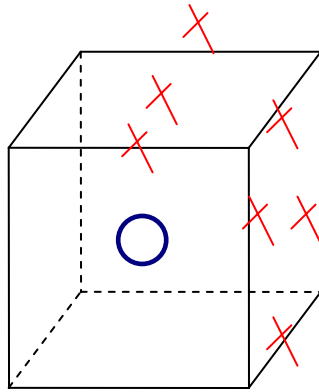
Interstitielle Atome (Grundmetall mit großem Atomdurchmesser, eingelagertes Atom mit kleinem Durchmesser)

Bed. 1: $\frac{\text{Durchmesser des eingelagerten Atoms}}{\text{Durchmesser Grundmetall}} < 0,59$

Bed. 2: Grundmetall ist Übergangsmetall
erfüllt für Einlagerungsatome C, N, O, H, B

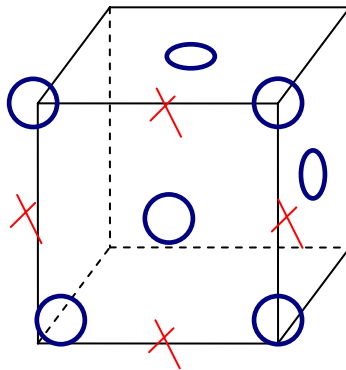
Beispiel Eisen:

- krz



Möglichkeit für C-Atome:
Kante: $0,13 * a$
Mitte: $0,1475 * a$

- kfz



Möglichkeit für C-Atome:
 $0,135 * a$
Löslichkeit für
Einlagerungsatome kfz größer
als im krz Gitter
Gittervorspannungen →
beschränkte Löslichkeit

Mit abnehmender Temperatur nimmt die Löslichkeit für die Einlagerungsatome ab.
Beispiel: relativ hohe Löslichkeit bei hoher Temperatur fast gar keine Löslichkeit bei tiefer Temperatur (z.B. RT)
→ Glühen und Abschrecken
→ Bei Raumtemperatur übersättigten Mischkristall

Intermetallische Phasen

- Eigenes Gitter – meist kompliziert aufgebaut
- Ganzzahlige Atomverhältnisse

Beispiel: Fe und C: 3Fe-Atome + 1 C-Atom → Fe_3C

Fe_3C : 6,67% C

Möglichkeit der Abweichung von Stöchiometrie

Beispiel: TiC

$\text{TiC}_{0,28}$

$\text{Fe}_2\text{N}_{1-x}$ $x=0 \dots 0,5$

Me/Me oder Me/Nichtmetall lückenlose Mischkristallreihe TiC und TiN (goldfarbig) → Ti-Carbonitrid

Eigenschaften:

- Je weniger ähnlich den Metallen je komplizierter Kristallaufbau je mehr komplizierter Atomverhältnis je mehr Atomarten mit unterschiedlichen Eigenschaften

Typische Eigenschaften:

- Hohe Härte

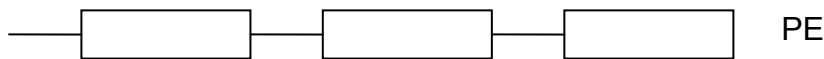
- Hohe Sprödigkeit
- Hohe Verschleißfestigkeit
- Hohe Schmelztemperatur

	TiC	TaC
Ts	3140°C	3880°C
Härte	3200HV	1800 HV

2.1.5 Strukturen polymerer Werkstoffe

Konstitutionen

- Aufbau aus Struktureinheit
- Chemisches Aufbauprinzip
- Art der Substituenten und Endgruppen
- Art der monomeren Grundbausteine
- Symmetrische Struktureinheiten



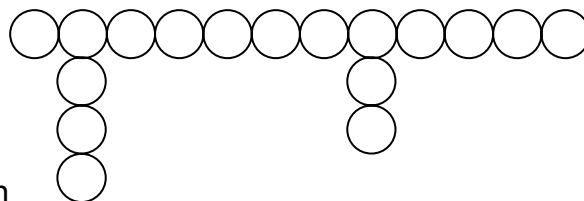
- PA
- Unsymmetrische Struktureinheiten

- regelmäßig



Kopf-Schwanz
PP, PVC, PS

- Co-Polymere mehrere Sorten von



- Pfropf-Polymeren
- Fadenförmige Makromoleküle PE durch Niederdruckpolymerisation
- Verzweigte Makromoleküle PE Hochdruckpolymerisation
- Vernetzte Makromoleküle → Aufspaltung von Doppelbindungen
Schwefelbrücken, Polyisopren durch Bestrahlung

- Konfiguration:

räumliche Anordnung von Atomgruppen:

a-taktisch: statistische Anordnung der Substituenten

Syndiotaktisch: regelmäßig alternierend

Isotaktisch einseitig regelmäßig – Seitengruppen nur auf einer Seite

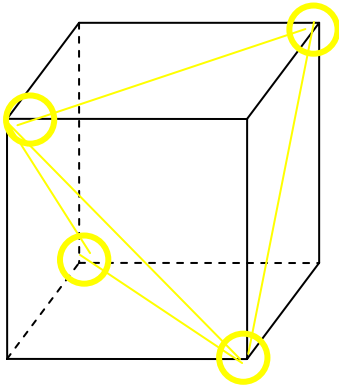
Kristallisation: begünstigt syndiotaktisch und isotaktisch

Konfirmation
Zick-zack-Anordnung

2.1.6 Strukturen keramischer Werkstoffe

Metall-Verbindung mit Nichtmetall

Al_2O_3 , SiO_2



Tetraeder $[\text{SiO}_4]$
Raumgitter – Kristallin und amorph

25.11.05

Strukturen keramischer Werkstoffe

Kristalline Struktur: Raumgitter mit regelmäßiger Anordnung der Atome

Mg , Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC

Eigenschaften sind richtungsabhängig

Amorphe Keramiken:

Lichtdurchlässig, keine Richtungsabhängigkeit

2.1.7 Realstruktur kristalliner Festkörper

Idealkristall: regelmäßige Anordnung der Atome, wiederholt sich \rightarrow 3D

Gewollte Störungen: z. B. Mischkristalle, unterschiedliche Durchmesser der Atome

Einkristall \rightarrow Vielkristall: Grenzen = Störungen

Gitterbaufehler: - Kristallisationsverlauf
- Anwesenheit von Fremdatomen

Weitere Möglichkeiten für Erzeugung von Gitterfehlern_

- mechanische Einwirkung
- thermische Einwirkung
- Bestrahlung

Auswirkungen

Beeinflussung von

- Festigkeit
- plastischer Verformbarkeit

- Stapelfehler: hdP AB AB: Sechseckanordnung, in Lücken liegen die nächsten Atome
 kfz ABCABABC Anordnung, in Lücken liegen die nächsten darauf das nächste Atom
- Phasengrenzen
 2 Phasen

2.1.8 Gefüge

Besteht aus Bestandteilen des Werkstoffes

Zusammenhänge

1. Gefüge – chemische Zusammensetzung
2. Gefüge – Behandlungszustand
3. Gefüge – Eigenschaften

Vorgeschichte z. B. Gussgefüge – Primärgefüge

Verformungsgefüge – Sekundärgefüge

Metallographie

makroskopisch - bloßes Auge

mikroskopisch - Lichtmikroskop (1500x), Elektronenmikroskop (REM, 50000)

Realstruktur TEM

02.12.05

Gefügeuntersuchung:

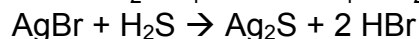
Makrogefüge: z. B.: Poren

Seigerungen (Konzentrationsunterschiede in Legierungen
 – z. B. Schwefel im Stahl)

Bruchflächen

Randschichten

BAUMANN-Methode zur Überprüfung der Seigerung: Fotopapier + 5%ige H_2SO_4



Ag_2S wird braun bei Seigerungen.

Mikrogefüge

Präparation → Gefügeparameter werden ermittelt

Präparation (Schliffherstellung):

- Probeentnahme z.B. durch Schleifen, Sägen, Schneiden, elektroerrosiv
- Keine Gefügeveränderung der Probe, z.B. durch Wärme oder Kaltverformung
- Lage der Probe

gewaltes Gefüge: Längsschliff, Querschliff

- Probengröße

- Schleifen:

Einbetten in Harz

Einspannen in Schliffklammer

- Schleifpapier SiC grob → fein
- Reinigen der Proben
 - auf Tüchern z.B. mit Al₂O₃, Diamant, Gleitmittel, elektrolytisch (Titan)
 - polierte Oberfläche Poren (Sinterwerkstoff, Guss), Risse, nichtmetallische Einschlüsse, Graphit, Schlacken, Oxide
 - Gefügeentwicklung:
 - Ätzlösungen
 - potentiostatisches Ätzen
 - thermisches Ätzen
 - Aufdampfen dünner Schichten
 - Ionenätzen

Gefügebewertung

- qualitativ
 - Geometrie: Größe der Körner, Anordnung, Form
 - Mengen
 - Verteilung
 - Behandlungszustand: Wärmebehandlung, glühen, härten, gewalzt, gegossen
 - Schadensbeurteilung (Korrosion, ...)
- quantitativ
 - Messen von Gefügeparametern
 - Umrechnung: 2-D → 3-D
 - Vergleich Richtreihen → in DIN

2.2 Zustandsdiagramme

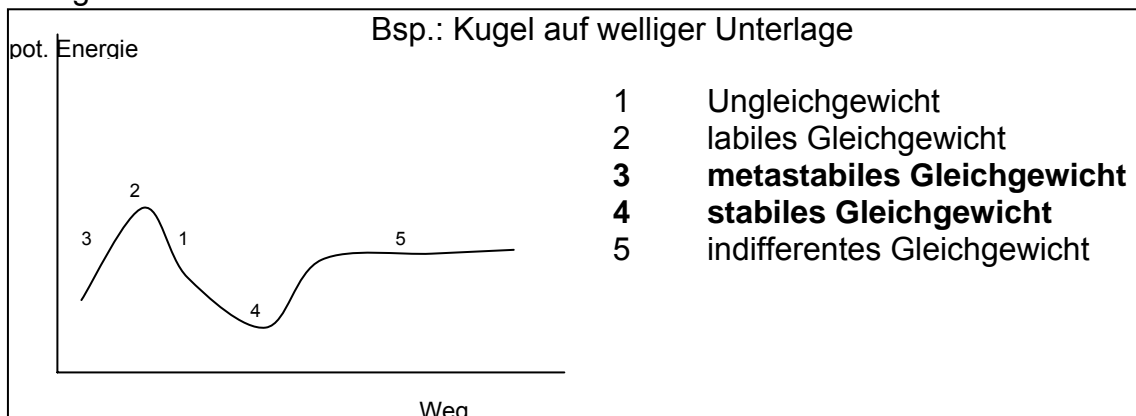
2.2.1 Thermodynamische Grundlagen

Werkstoffe können in unterschiedlichen Zuständen vorliegen (Polymere, amorph, kristallin, Schmelze, Kristalle)

Gleichgewichtszustand: stabil

Ungleichgewichtszustand: Bestreben spontan in stabilen Zustand überzugehen. gekennzeichnet durch

Energiezustand.



Begriffe

- Werkstoff: stoffliches System
- Phase: Bestandteile, aus denen das System aufgebaut ist
→ Bezüglich chemischer Zusammensetzung, Struktur und physikalischer Eigenschaften homogen
- Komponente: Stoffe, aus denen Phasen aufgebaut sind
→ Atome oder Moleküle

- 1 Komponente: Einstoffsystem (H₂O, fest, flüssig, gasförmig; ...)
- 2 Komponenten: Binäres System
- 3 Komponenten: Dreistoffsystem, ternär

nur 1 Phase: homogenes System
 Mischkristalle
 Au-Ag, Cu-Ni

mehrere Phasen: heterogenes System

Energieniveau des Systems
 freie Enthalpie G
 System strebt Minimum an

Zustandsgrößen T, p, c
 Gleichgewichtszustände sind abhängig von Temperatur, (Druck) für technische Normalbedingungen; Konzentration (bei Werkstoff bleibt annähernd gleich)

→ Ungleichgewichtszustand
 Schnelle Temperaturwechsel
 Praxis: amorpher Zustand kommt nur zu Stande bei schneller
 Temperaturänderung
 teilkristalliner Zustand
 gehärteter Stahl

→ steigende Temperatur und langsame Temperaturwechsel → Annäherung am Gleichgewichtszustand
 Temperaturänderung schnell oder langsam → Einstellung von gewünschten Eigenschaften

2.2.2 Übergang in den festen Zustand

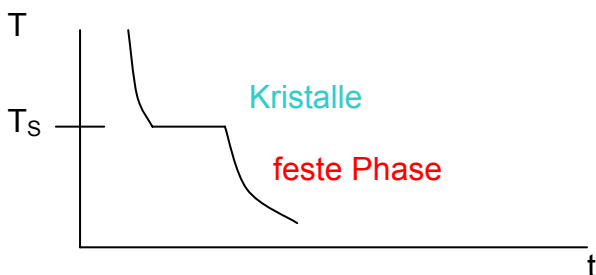
Werkstoff liegt hauptsächlich im festen Zustand vor.
 Herstellung: Übergang flüssig – fest.

08.12.05

fester Zustand: - starke Wechselwirkungen zwischen Atomen, Molekülen oder Ionen
 - Anteile von potentieller und kinetische Energie

erhöhen der Temperatur → Schwingungen um Gleichgewichtslage nehmen zu → innere Energie des Stoffes nimmt zu
 Enthalpie (Wärmeinhalt) ist größer geworden
 erhöhen der Temperatur bewirkt größeres Volumen
 bei Schmelztemperatur T_S hohe Unordnung → Zusammenhalt geht verloren → Schmelze; dazu weiterhin erforderlich: zusätzliche Energie: Schmelzenergie (Schmelzwärme)

Vorgänge beim Erstarren
 Schmelze → in den festen Zustand

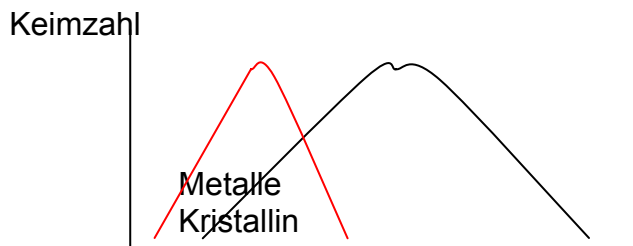


$$T = T_0 \cdot e^{-at}$$

T₀ Anfangstemperatur
 a Abkühlungskonstante

Vorgänge bei T_S

1. Keimbildung: - Unterkühlung, arteigene Keime
- zugeben von artfremden Keimen, höhere T_S → Impfen
2. Keimwachstum

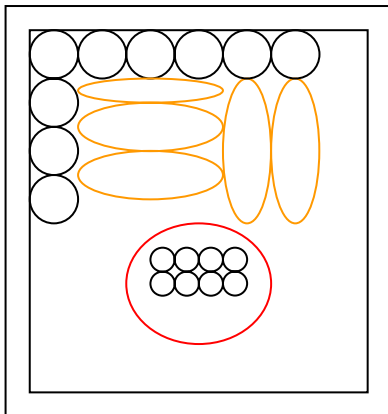


Keimzahl sinkt mit größerem Temperaturunterschied weil T niedriger

Wachstumsgeschwindigkeit

Unterkühlung ΔT
→ amorph

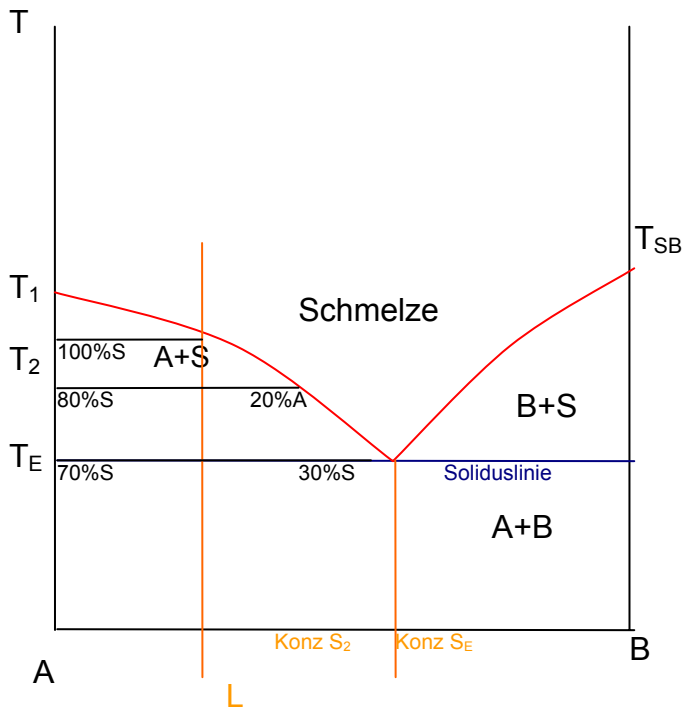
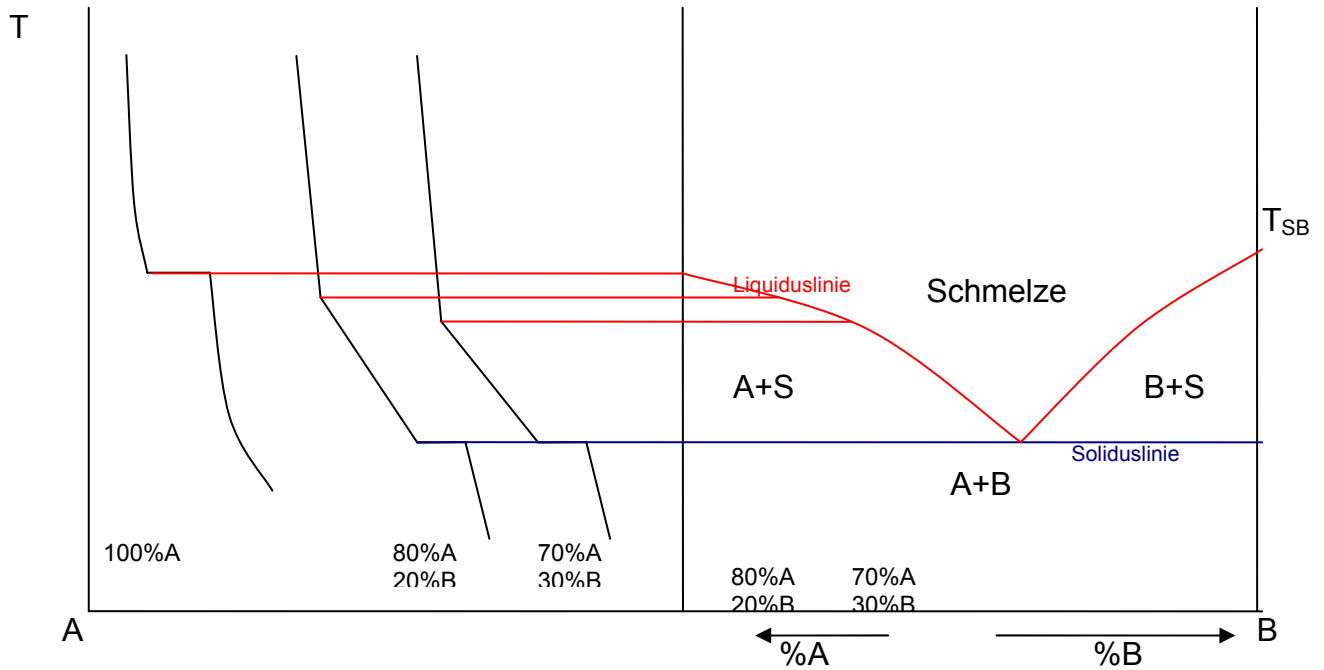
Metallische Form



Anfang: große Unterkühlung durch kalte Form
→ Form wird wärmer

○ Feinkorn
Stengelkörper
Restschmelze erstarrt

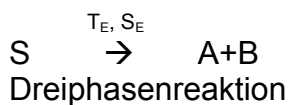
2.2.3 Zustandsdiagramm eines Zweistoffsystemes mit völliger Mischbarkeit im der Komponenten im flüssigen Zustand und Nichtmischbarkeit im festen Zustand



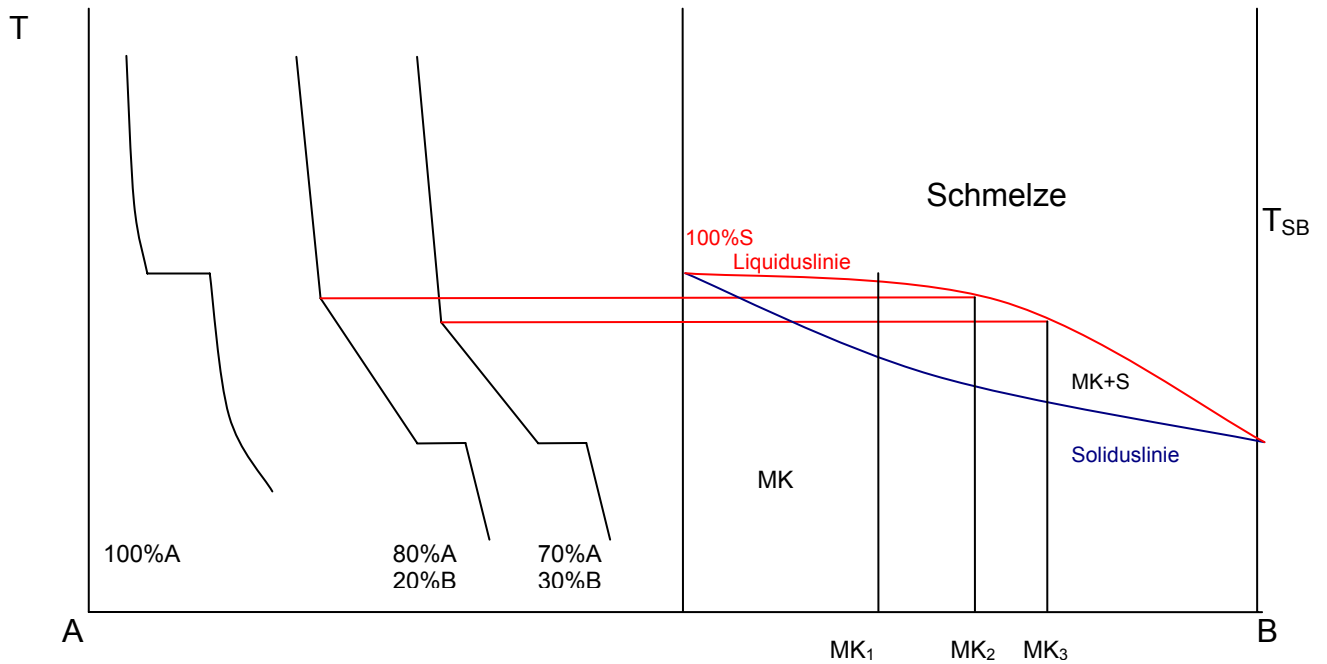
- T_1 – 100% S
- T_2 – Anteil A + Schmelze
- Hebelbeziehung:
 - nur im Zweiphasengebiet
 - Hebel von Phasengrenze bis Phasengrenze
 - Hebel in Gesamtlänge = 100%
 - unabhängig von realer Länge

T_E – eutektische Temperatur
 K_E – eutektische Zusammensetzung
 Schmelze bei T_E, K_E zu A+B

Eutektische Reaktion



2.2.4 Zustandsdiagramm eines Zweistoffsystems mit völliger Mischbarkeit der Komponenten im flüssigen und festen Zustand

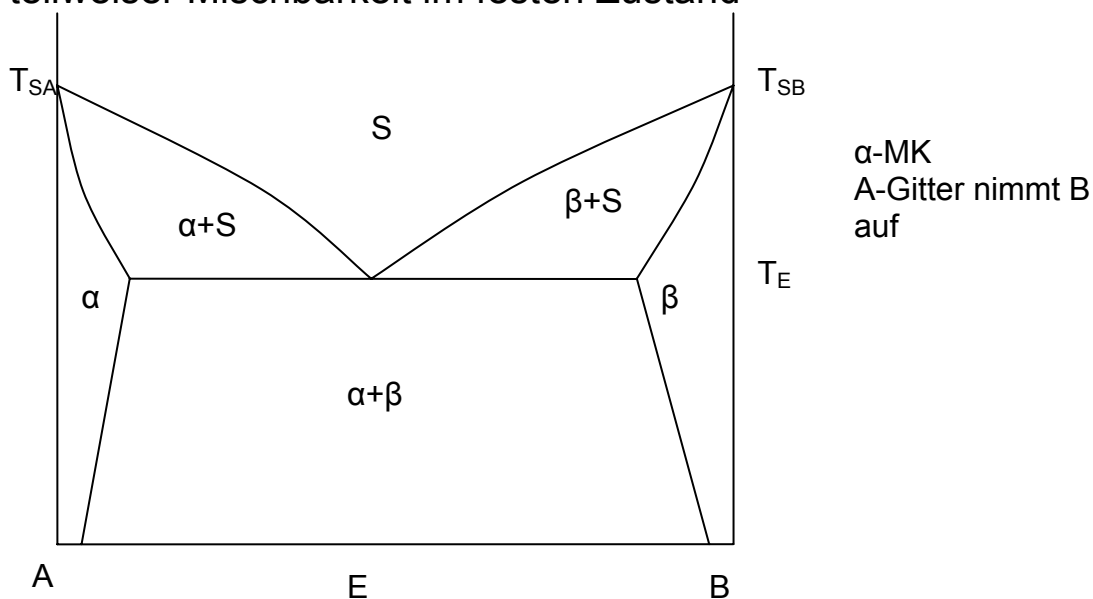


Technische Abkühlung:

Solidustemperatur wird abgesenkt → bei Wiedererwärmen zunächst tiefere Temperatur für Konzentrationsausgleich im MK

Kristallseigerung: Konzentrationsunterschiede im Mischkristall

2.2.5 Zustandsdiagramm mit völliger Mischbarkeit im flüssigen und teilweiser Mischbarkeit im festen Zustand



Löslichkeit der α-MK für B-Atome nimmt mit abnehmender Temperatur ab.

Technik: Bsp. Abschrecken
übersättigter MK

α -Fe krz bei Raumtemperatur Löslichkeit für Kohlenstoff rund 10^{-4} %
→ tetragonales Gitter

Zustandsdiagramm mit peritektischer Umwandlung

Praxis: im Fe-Fe₃C-Diagramm

06.01.06

2.3. Diffusion

Stofftransport in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern durch Bewegung der Bausteine (Atome, Ione, Moleküle)

Bedingung für Platzwechsel:

- Zuführung von Energie (Aktivierungsenergie Q)
dadurch Überwinden einer Potenzialschwelle
- Erwärmen (steigende Temperatur)
- Strahlung

Diffusion in Werkstoffen

- Übergang vom amorphen in den kristallinen Zustand
- Rekristallisation
- Kornwachstum
- Ordnung
- Entmischung
- polymorphe Umwandlung

Technik: Thermochemische Oberflächenbehandlung

Bsp.: Einsatzhärten 1. Aufkohlen
2. Härten

Diffusion im kristallinen Festkörper

1. direkter tausch sehr schwierig
2. leichter über Zwischengitterplätze, Bsp. Metall: H, C, N
3. über Leerstellen: Temperaturanstieg → Zahl der Leerstellen nimmt zu
→ mit Temperatursteigerung nimmt Diffusion zu.

merkliche Diffusion: bei $T > 0,3 \dots 0,4 \cdot T_S$ (T_S - Schmelztemperatur in K für Metalle)

Keramik: $T > 0,4 \dots 0,5 \cdot T_S$

Gerichtete Diffusion

- Vorliegen von Konzentrations- oder Temperaturgradienten
- Umwandlungsbestreben instabiler Phasen (z. B. bei polymorphen Umwandlungen)
- Umwandlungsbestreben instabiler Gefügestände (z. B. bei der Rekristallisation)
- Einwirkten elektrischer Felder, was Ionenleitung von Ionenkristallen bewirkt.
- Streben nach Verringerung der Oberflächenenergie (z. B. beim Sintern)

Kengrößen:

- Diffusionsgeschwindigkeit

- Diffusionskoeffizient D [cm^2/s]

abhängig von:

- Diffusionspartner

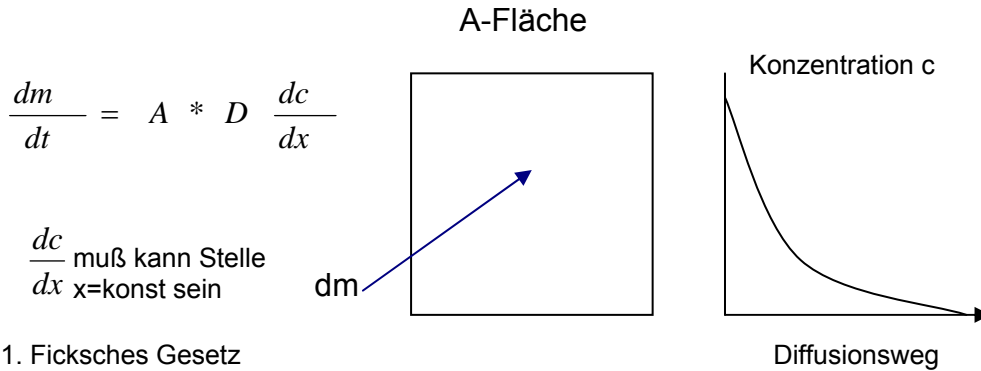
- Realstruktur

Volumendiffusion, an KG, im Korn \rightarrow Zunehmende

Diffusionsgeschwindigkeit

- Temperatur

Diffusionsgesetze



1. Ficksches Gesetz

2. Ficksches Gesetz

$$\frac{Dc}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{keine allgemeine Lösung}$$

C_0 Anfangskonzentration \rightarrow C-Gehalt des Stahles

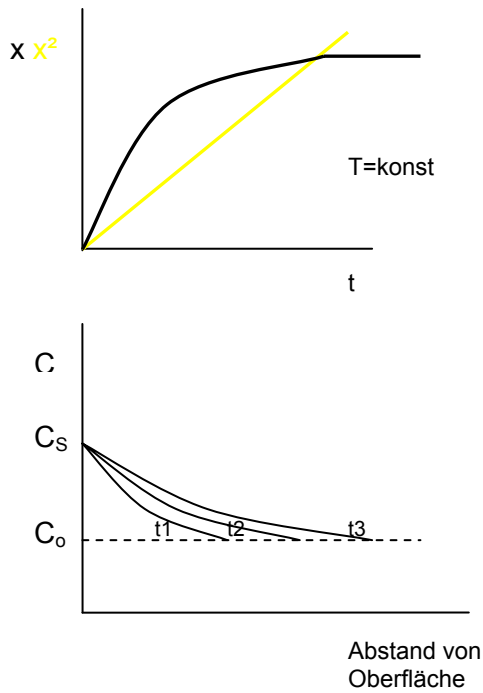
C_S Sättigungskonzentration an OF

$$C_{x,t} = C_0 + (C_S - C_0) \left[1 - \underbrace{\psi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right)}_{\text{Gaußsches Fehlerintegral}} \right]$$

$C_S, C_0 = \text{konstant}$

$$\psi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) = \text{konstant}$$

$$\frac{x}{\sqrt{2Dt}} = \text{konstant} \rightarrow \begin{array}{ll} x = \text{konstant} \sqrt{t} & \text{(Wurzel-t-Gesetz)} \\ x^2 = \text{konstant} * t & \text{(parabolisches Zeitgesetz)} \end{array}$$



2.4 Phasenumwandlungen im festen Zustand

diffusionsgesteuert: langsamer Temperaturwechsel

Austenit: γ -Fe 911°C α -Fe (Ferrit)bildung Keimwachstum

Keimbildung und Keimwachstum erfordern Zeit (Bsp. Diffusion von Fe-Atomen)

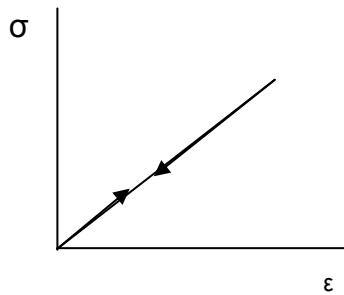
Umwandlung ohne Diffusion

starke Temperaturabnahme: Abschrecken: keine Diffusion

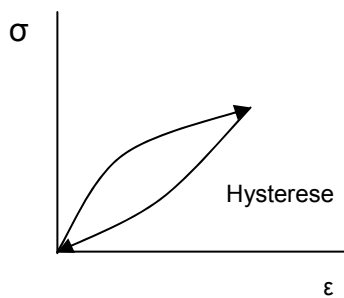
Umklappen des Gitters durch koordinierte Atombewegung (Atome legen nur noch kleinste Wege zurück) \rightarrow „martensitische Umwandlung“ bei relativ tiefer Temperatur über Temperaturintervall

- Konstruktionen: nur elastische Verformung zulässig
- Steifigkeit nimmt mit steigendem E-Modul zu
 E-Modul: Stahl: 210 GPa
 Al: 68 GPa
 Mg: 45 GPa
 Ti: 105 GPa

linear elastisches Verhalten



für die meisten Metalle



bei Metallen: anelastisches Verhalten
 bei Polymeren: viskoelastisches Verhalten

Abhängigkeit von der
 Belastungsgeschwindigkeit

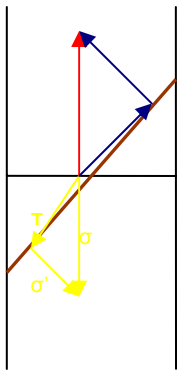
Vergrößern der Belastung: → Folgen
 σ : Überwindung der Kohäsionskräfte
 → σ_T (Trennfestigkeit)

Einwirken von Schubspannungen: → plastische, bleibende Verformung

2. Plastische Verformung

- Gitterbereiche gegeneinander verschoben
- möglich nur auf Ebenen dichter Packung und in Richtung der dichten Packung
- Gleitebene: Gleitrichtung = Gleitsystem

Einkristall



Gleitebene
 Kraft
 F_{σ} – Normalkraft
 F_{τ} – Schubkraft

theoretische Schubspannung: $\tau_{th} \approx \frac{G}{10}$

für α -Fe: $G = 80 \text{ GPa}$
 $\tau_{th} = 8000 \text{ N/mm}^2$
 τ_{th} ist um Faktor 10^3 zu groß

Fehler im Gitteraufbau

→ Versetzung

Bewegung von Versetzungen mit weniger Energie möglich als für Verschiebung ganzer Gitterbereiche

Gitterreibung muss überwunden werden
 „Peierls“-Spannung

weitere Möglichkeit für plastische Verformung:

- Zwillingsbildung in Metallen, die sich schwer umformen lassen (z. B. hexagonales Gitter)

plastische Verformung

- irreversibel
- bei niedrigen Temperaturen nahezu zeitunabhängig
- nicht proportional zur mechanischen Beanspruchung
- ab Dehngrenze, z. B. Streckgrenze R_e
- bei erhöhter Temperatur → zeitabhängig
- bei zyklischer Beanspruchung → Ermüdung

20.01.06

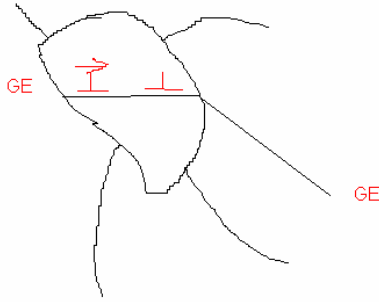
Vielkristall

(polykristallines Material)

- unterschiedliche Orientierung der Körner und Gleitebenen
- Korngrenzen → Hindernisse für Versetzungsbewegung

Versetzungsbewegung beginnt in Körnern mit Gleitebene unter 45° zur Beanspruchungsrichtung

Spannungsfeld Aufstau von Versetzungen



Anstieg von σ : alle Körner werden in Verformung einbezogen \rightarrow Streckgrenze erreicht R_e rund $3 \cdot \tau$

3.1.2 Beeinflussung der Festigkeit durch Strukturfehler - Härtungsmechanismen

metallischer Werkstoff

- Struktur – Kristallgitter
- Abhängigkeit vom Gefüge im Ausgangszustand
- Vorgänge bei Verformung

$$R_e = \sigma_i + \Delta\sigma_{\text{Fehler}}$$

σ_i = Gitterspannung

Erhöhung der Streckgrenze:

- versetzungsfreie Kristallite (durch Whisker)
- Erschwerung der Versetzungsbewegung durch 0-, 1-, 2- und 3-dimensionale Fehler

$$R_e = \sigma_i + \Delta\sigma_M$$

$\Delta\sigma_M$ – Mischkristallhärtung

$\Delta\sigma_V$ – Versetzungshärtung

$\Delta\sigma_K$ – Korngrenzenhärtung

$\Delta\sigma_T$ – Teilchenhärtung

Mischkristallhärtung $\Delta\sigma_M$

- Legierungsatome verzerren das Matrixgitter \rightarrow Behinderung der Versetzungsbewegung
- ruhende Versetzung: kleinere Fremdatome gehen an Versetzungen und lagern sich dort an: „Fremdatomwolken“ \rightarrow Verankerung der Versetzung (Blockierung) \rightarrow höhere Spannung, um Versetzungen loszureißen \rightarrow Erhöhung der Streckgrenze R_e

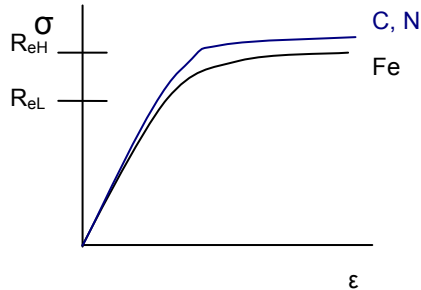
$\Delta\sigma_M$ steigt: Große Δ in Atomradien, Bsp.: Fe für C, N

Aber: Begrenzung der Löslichkeit für kleine Atome

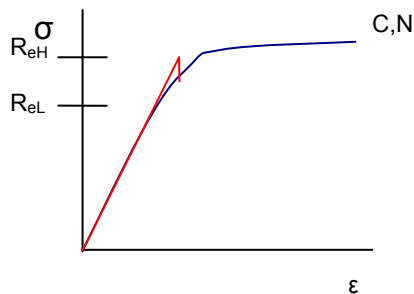
$$\Delta\sigma_M \sim \sqrt{c} \quad c\text{-Konzentration}$$

Streckgrenzenerscheinungen

1. C-, N-Atome → Bilden Atomwolken
2. Verformung: höhere Spannung als Fe ohne C- und N-Atome



C, N gleichmäßig verteilt
 R_{eH} – obere Streckgrenze
 R_{eL} – untere Streckgrenze



C, N gleichmäßig verteilt
 Auslagern bei 60°C → Bildung Atomwolken
 Dehnung bei R_{eL} → Lüdersdehnung
 inhomogen → Entstehung von Lüdersband,
 45° zur Zugrichtung, ungleichmäßige
 Oberfläche

Maßnahme zur Vermeidung: Leichtes Kaltwalzen möglichst unmittelbar vor Formgebung
 Durch Mischkristalle nimmt die Zähigkeit ab.

höhere Temperaturen: höhere Beweglichkeit von Atomen bei

Raumtemperatur: $v_{\text{Versetzungsbewegung}} > v_{\text{Diffusion}}$ v -Geschwindigkeit

höherer Temperatur: $v_v = v_{\text{Diff}}$; Erhöhung der Streckgrenze, Abnahme der Zähigkeit

200 ... 300°C bei Eisen

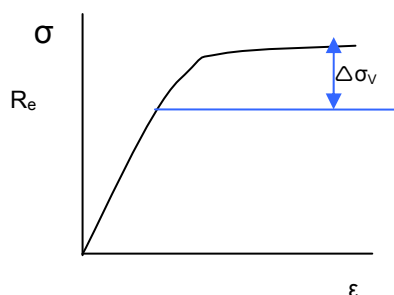
Blausprödigkeit

Versetzungshärtung $\Delta\sigma_v$

Versetzungsdichte $\rho = 10^{10} \dots 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ im geglühten Metall

$\tau \rightarrow$ Versetzungsbewegung \rightarrow Bildung neuer Versetzungen \rightarrow gegenseitige Behinderung

$\Delta\sigma_v \sim \sqrt{\rho} \rightarrow \rho 10^{12} \text{ cm}^{-2} \rightarrow$ Kaltverfestigung, Zähigkeit nimmt ab



Festigkeitssteigerung durch Korn- und Phasengrenzen – Korngrenzenhärtung $\Delta\sigma_K$
Korngrenze = Hindernis für Versetzungsbewegung
steigende $\Delta\sigma_V$: viele Korngrenzen → feines Korn, Feinkornhärtung

$$\Delta\sigma_K \sim k^* \frac{1}{\sqrt{d}}$$

Viele Körner, in denen sich Versetzungen bewegen → höhere Zähigkeit

Festigkeitssteigerung durch Teilchen $\Delta\sigma_T$

wirksam: feine Teilchen

Wie kommen Teilchen in Werkstoff?

- Ausscheidungen durch Ausscheidungshärten
- unlösliche Teilchen: z. B. Oxide (z. B. durch Pulvermetallurgie)

kleinere Teilchen kohärent oder teilkohärent

größere Teilchen inkohärent

Abnahme der Zähigkeit

Kombination der Mechanismen:

Bsp. Härten von Stahl, starkes Abkühlen der Temperatur führt zu

Erhöhung der Versetzungsdichte.

Kornfeinung → feine Martensitnadeln

Gitterverzerrung durch C

Mk-Härtung

3.1.3 Bruchvorgänge

Bruch: Überwindung der Bindungen im Festkörper

- spröder Bruch: ohne vorherige Verformung
- zäher Bruch: mit vorheriger Verformung

Klassifizierung von Brüchen

nach Entstehungsursachen

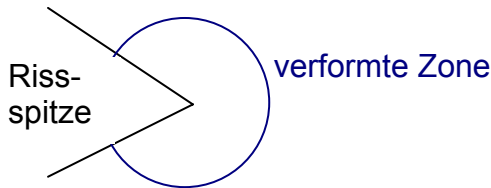
- Gewaltbruch
- Ermüdungsbruch
- Kriechbruch

nach makroskopischen und mikroskopischen Bruchmerkmalen:

- Brucharbeit (Energieaufnahme): Zähbruch – Sprödbbruch
- Makroskopischer Bruchflächenlage: Scherbruch – Trennflächiger Bruch
- mikroskopischer Bruchmechanismus: Gleitbruch – Wabenbruch – Spaltbruch
- mikroskopischer Bruchpfad: transkristallin – interkristallin
- Bruchflächentopographie: rau – fasrig – glatt
- Bruchflächenanssehen: matt – glänzend/kristallin

Bruchvorgang: 1. Anrissbildung
 Mikrorisse
 2. Rissausbreitung
 stabil: Energiezufuhr → Verformung → zähes Verhalten, möglich:
 Rissstop
 instabil: Energiegewinn
 elastische Verzerrungsenergie > Oberflächenenergie zur Vergrößerung der Angriffsfläche

bei Metallen:



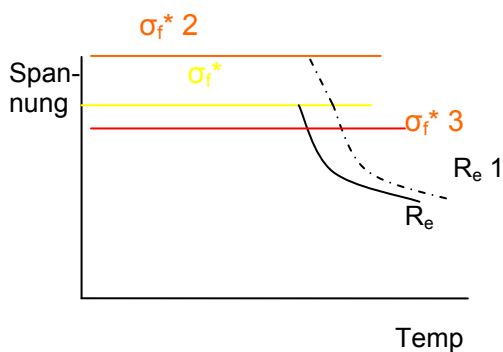
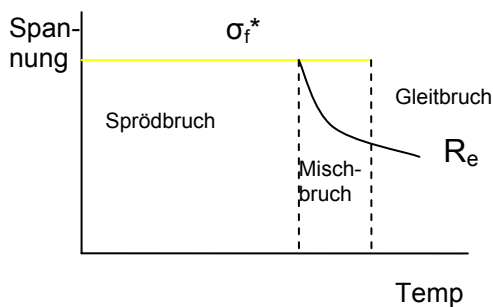
3.1.4 Zähigkeit und Sprödigkeit

nicht nur durch Struktur und Gefüge bestimmt

abhängig von:

- Beanspruchungsgeschwindigkeit nimmt zu → Spröde
- sinkende Temperatur
- mehrachsiger Spannungszustand, äußere Kerben, innere Kerben (Gusseisen mit Lamellengraphit)
- grobes Korn

Spaltbruchspannung σ_f^* - kritische Zugspannung, bei dem örtlicher Spaltbruch entsteht



1. steigende Verformungsgeschwindigkeit
Härtungsmechanismen
2. Kornfeinung
3. spröde Phasen

3.1.5 Werkstoffverhalten bei erhöhten Temperaturen

niedrige Temperatur: $\varepsilon = f(\sigma)$

höhere Temperatur: konstante Last \rightarrow plastische Verformung, kommt nicht zum Stillstand

$\varepsilon = f(\sigma, T, t)$ „Kriechen“ führt zum Kriechbruch

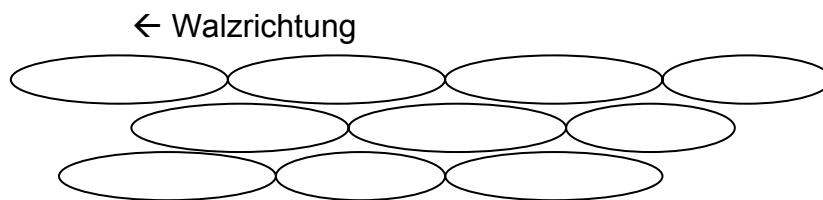
Grenze hohe – niedrige Temperatur, bei Metallen: $0,3 \dots 0,4 \cdot T_s$

Schmelzt. in K

bei Keramiken: $0,4 \dots 0,5 \cdot T_s$

3.1.5.1 Kristallerholung und Rekristallisation

1. Verformung \rightarrow Versetzungsdichte steigt an, Energie im Festkörper steigt an



2. steigende Temperatur – Aktivierungsenergie
thermisch aktivierte Vorgänge

2.1 Kristallerholung

geringe Abnahme der Zugfestigkeit, Härte

größere Abnahme der Streckgrenze

Zunahme der Dehnung

Vorgänge im Gefüge: Umordnung der Versetzungen

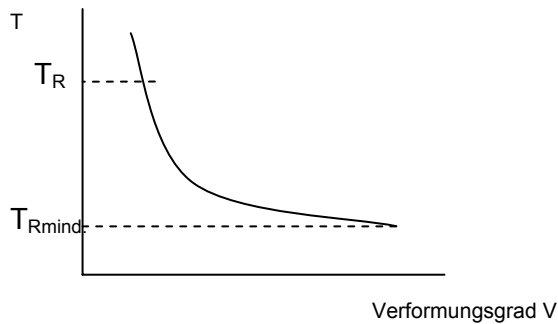
Gestreckte Körner bleiben erhalten

2.2 Rekristallisation

Abnahme der Härte und Zugfestigkeit

Zunahme der Dehnung

Korneubildung: Keimbildung und Keimwachstum durch Diffusion



$$0,4 T_s < T_{Rmin} \leq 0,5 T_s$$

für Fe: rund 450°C

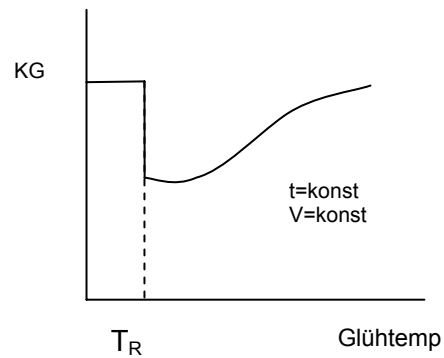
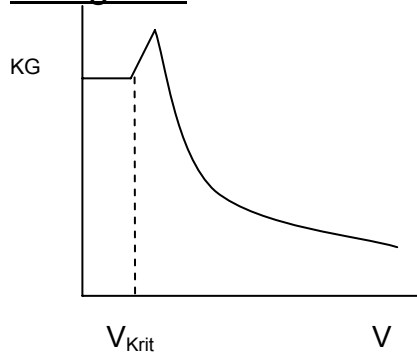
reinst-Al: rund 115°C

Al: rund 150°C

Pb: rund 0°C

T_{Rmind} steigt für Legierungen

Korngröße



03.02.06

Korngröße abhängig von:

- Verformungsgrad
- Glühtemperatur
- Glühdauer

Sekundärrekristallisation → Kornvergrößerung (da einzelne Körner verstärkt wachsen): Korngrenzenfläche wird vermindert (Energieeinsparung)

statische Kristallerholung
statische Rekristallisation }
↓

Erst Kaltumformung und danach Glühen

dynamische Kristallerholung
dynamische Rekristallisation }
↓

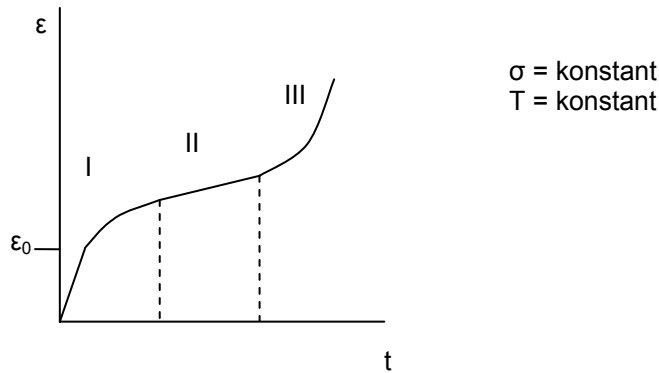
Erhöhte Temperatur und Umformung
unmittelbar nach Rekristallisation

Warmumformung

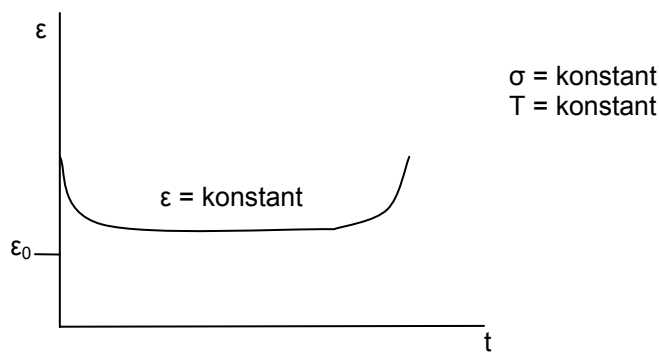
3.1.5.2 Kriechen

Ofen, erhöhte Temperatur

Kriechkurven



Bereich I: Primärkriechen, Übergangskriechen, Verfestigung (überwiegt) und Entfestigung



Bereich II: Stationäres Kriechen
dynamisches Gleichgewicht: Verfestigung und Entfestigung

Bereich III: Tertiäres Kriechen
 ϵ steigt stark an
im Gefüge: Bildung von Poren und Rissen \rightarrow Bruch

$$\epsilon = A \cdot \sigma^n$$

niedrige Temperatur und Spannung: kein Tertiärbereich

Kriechmechanismen

Gleit-Kletterprozesse

Diffusionskriechen: Korngrenzengleiten

Korngrenze = Schwachstelle

→ Korngrenzenfläche reduzieren = Grobkorn

Erhöhung der Festigkeit bei höherer Temperatur gegenüber Feinkorn

Hochtemperaturwerkstoff

Gefüge: grobes Korn → Einkristall

chemische Zusammensetzung

Werkstoffeinsatz:

- Werkstoff mit hohem Schmelzpunkt: W, Mo, Nb
beachten: Oxidationsbeständigkeit, Preis, Verfügbarkeit
- Legierungsmaßnahmen, die Versetzungsbewegungen behindern (MK, Teilchen(im MK als Ausscheidungen, Temperaturerhöhung, ansteigende Löslichkeit im MK → Teilchen werden größer, Teilchen lösen sich auf. Teilchen an Korngrenzen → festere KG; $R_e = \sigma_i + \sigma_{MK} + \sigma_T$))
- hohe Gitterreibung: Festkörper mit hohem kovalentem Bindungsanteil → Oxide, Silicate, Si-Carbid, Si-Nitrid
- große Korngröße (Einkristalle) – lange Diffusionswege beachten: sinkende Duktilität, steigende Anrissbildung, sinkende Ermüdungsfestigkeit
- Ausscheidungen an Korngrenzen: behindern Korngrenzengleiten

3.1.6 Werkstoffverhalten bei zyklischer Beanspruchung

dynamische Beanspruchung: Schwingungen

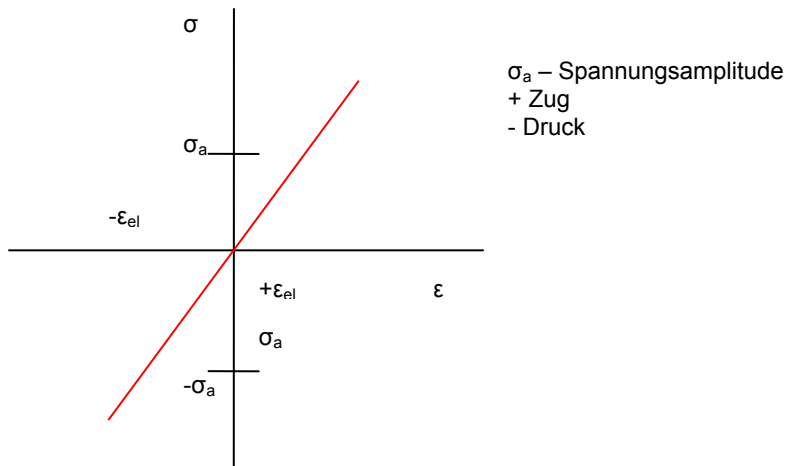
Periodische (sinusförmige) Beanspruchung

Frequenz: Lastwechsel

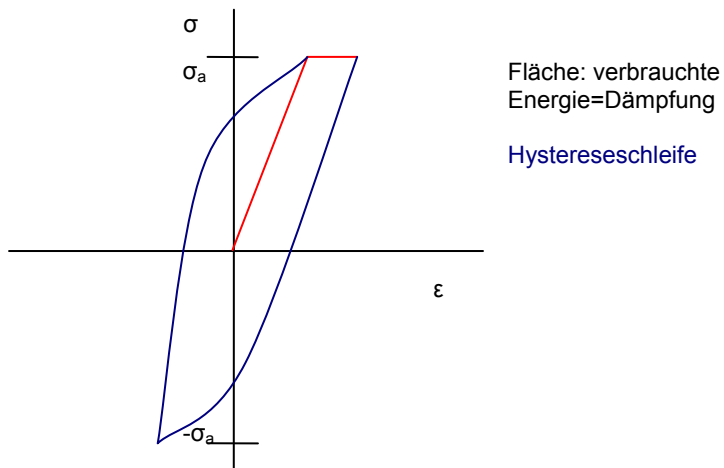
zyklische Beanspruchung: Werkstoffveränderung → Ermüdung → Ermüdungsbruch, Dauerbruch, Schwingbruch

3.1.6.1 Vorgänge im Werkstoff bei zyklischer Beanspruchung

- niedrige Belastung unterhalb „wirklichen“ Elastizitätsgrenze: reversible elastische Verzerrungen des Raumgitters



- Lastspannung oberhalb „wirklichen“ Elastizitätsgrenze → irreversible plastische Verformung



###Ende des Semesters und ich geh jetzt Cappuccino trinken###