

1) Spannung und Dehnung

Spannung

($\sigma = R_{p0,2}, R_m$)

Zugspannung: Vorzeichen positiv
Druckspannung: Vorzeichen negativ

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

$$\left[\frac{N}{mm^2} \right] = [MPa]$$

F : Angreifende Kraft
A : Querschnittsfläche
l_p : Länge der Probe

Kräfteverhältnis

$$\frac{F_{wirkend}}{F_{max}} = \frac{\sigma_n}{\sigma_m}$$

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

$$1MPa = 10^6 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{N}{mm^2}$$

σ_n : Nominale (Zug)Spannung: Die über den Anfangsquerschnitt ermittelte Spannung (auch Nennspannung).
Wahre Spannung: Auf momentanen Querschnitt bez. Spannung.

Gesamtverlängerung

$$\Delta l_{gesamt} = \Delta l / a \text{ (?)}$$

Δx : Atomabstandsverlängerung
a : Atomabstand

Gesamte plastische Verlängerung

$$\Delta l_{plast} = \Delta l_e + \Delta l_g$$

Δl : Verlängerung

Dehnung

Nominaldehnung: Verlängerung pro ursprüngliche Länge

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta x}{a} \quad []$$

$$\epsilon_{nominal} = \frac{\Delta l}{l}$$

l₀ : Ursprüngliche Länge

Gesamtdehnung,
Elastische Dehnung

$$\epsilon_{gesamt} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$$

$$\epsilon_{el} = \frac{\sigma_n}{E}$$

ϵ_{el} : Elastische Dehnung

ϵ_{pl} : Plastische Dehnung

Hookesches Gesetz

(bis σ_p resp. R_{eh})

(Linearer Zusammenhang zw. Belastung und Dehnung)

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\left[\frac{N}{mm^2} \right] = [MPa]$$

E : Elastizitätsmodul $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

$$E_{Alu} = 70'000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{Stahl} = 210'000 \text{ N/mm}^2$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Bruchdehnung

$$A_r = A_g + A_e$$

Einschnürverlängerung:

$$\Delta l_{eP} = l_p \cdot A_e$$

A_r : Bruchdehnung

Brucheinschnürung

$$Z = \frac{\Delta A}{A_0}$$

Gleichmassverlängerung:

$$\Delta l_g = l \cdot A_g$$

A_g : Gleichmassdehnung

A_e : Einschnürdehnung

Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze

(zäh, hohe Verformungsfähigkeit)

Werkstoff ohne ausgeprägte Streckgrenze

(spröde, verformungsarm bis Bruch)

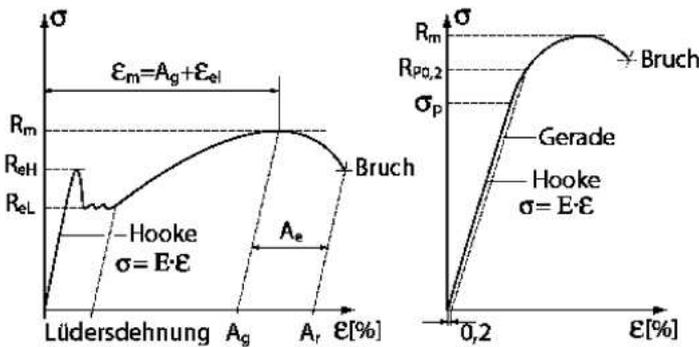


Abb. links: Hookesches Gesetz von 0 bis R_{eh} , Ludwig-Gleichung von Ende Lüdersdehnung bis A_g .

σ_p : Proportionalitätsgrenze

σ_E : Elastizitätsgrenze

σ_{So} : Obere Streckgrenze (R_{eH})

σ_{Su} : Untere Streckgrenze (R_{eL})

σ_B : Zugfestigkeit (R_m)

δ_g : Gleichmassdehnung (A_g)

δ_e : Einschnürdehnung (A_e)

δ_B : Bruchdehnung

$R_{p0,2}$: Elastizitätsgrenze

A_r : Bruchdehnung

Ludwik-Gleichung

(von σ_p resp. R_{eh} bis R_m)

$$\sigma - R_{p0,2} = C \cdot \epsilon_p^n$$

Die Ludwik-Gleichung stellt eine Approximierung der Spannungs-Dehnungslinie dar.

R_m : Zugfestigkeit

ϵ_p : Plastischer Dehnungsanteil

Masse, Volumen, Dichte

$$m = V \cdot \rho$$

Durchmesser belasteter Stab

$$D' = (1 - \nu \cdot \epsilon_{el}) \cdot D$$

D : Durchmesser

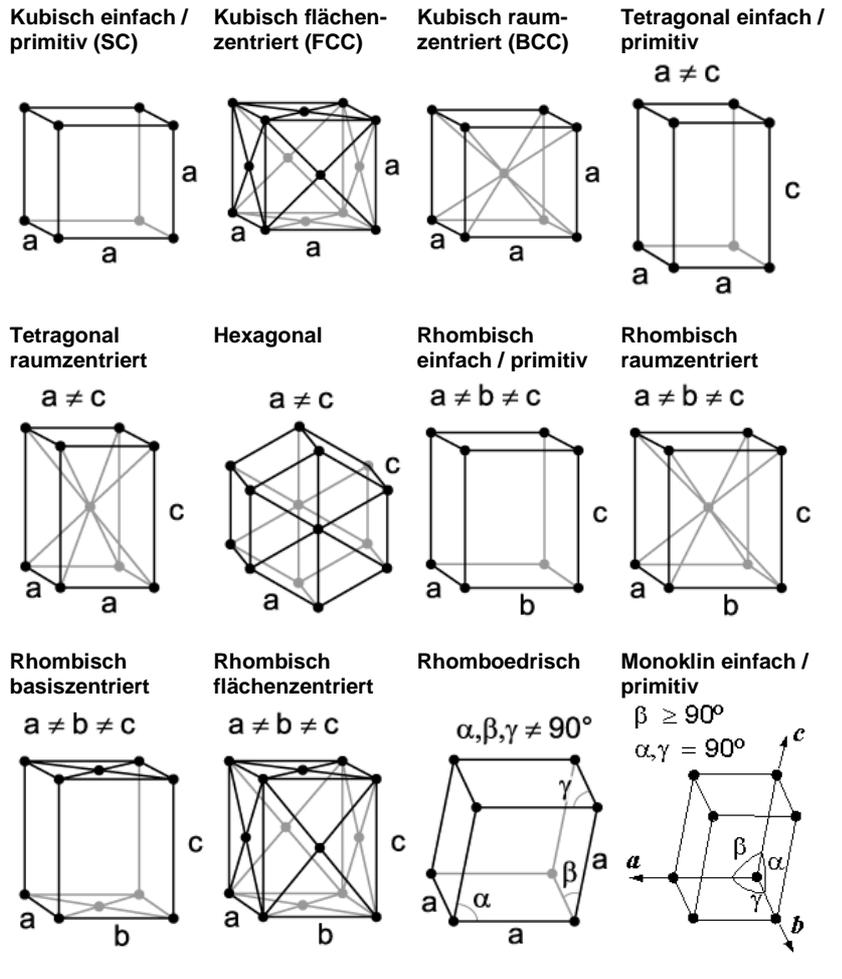
max. ertragbare Zugkraft

$$F_{max} = R_m \cdot A$$

2) Kristallaufbau und Gittertypen

Die 7 Kristallsysteme nach BRAVAIS

Kristallsystem	Achsenlänge	Achsenwinkel
triklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ($\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$)
monoklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\beta = \gamma = 90^\circ$ ($\alpha \neq 90^\circ$)
rhombisch (orthorhombisch)	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
hexagonal & trigonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ \dots (60^\circ)$
rhomboedrisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
tetragonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
kubisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



Kenngrossen der wichtigsten Elementarzellen

(Wichtige Kenngrossen der Elementarzelle: Atomanzahl je EZ, Koordinationszahl, Packungsdichte, Gitterkonstante)

Gittertyp	A_E	KZ	P	Dichteste Packung
kubisch-primitiv	$8 \cdot (1/8) = 1$	6	0.52	Kante
kubisch-raumzentriert	$8 \cdot (1/8) + 1 = 2$	8	0.68	Raumdiagonale
kubisch-flächenzentriert	$8 \cdot (1/8) + (6/2) = 4$	12	0.74	Flächendiagonale
hexagonal-dichtestgepackt	$12 \cdot (1/6) + 2 \cdot (1/2) + 3 = 6$	12	0.74	Kante

Koordinationszahl KZ : Anzahl direkter Nachbarn (Anzahl Atome mit kürzestem gleichgrossen Abstand)
 A_E : Atomanzahl je Elementarzelle

Stapelfolgen
 Kfz ABCABC...
 Krz ABABAB...
 hdP ABAB...

Atomanzahl
 Bsp. (Kub. Raumzent.): $A_E = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2 \frac{\text{Atome}}{\text{Zelle}}$

Gitterkonstante
 Längenangabe zur Beschreibung des Gitters (kleinste Einheit in der Elementarzelle)

Packungsdichte (Raumerfüllung der Elementarzelle mit Atomen)
 $P = \frac{V_{AE}}{V_E}$
 Bsp.: $V_{AE} = \frac{2 \cdot a_0^3 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi}{16}$, $V_E = a_0^3$, $P = 0.68$
 V_{AE} : Atomvolumen innerhalb der Elementarzelle
 V_E : Volumen der Elementarzelle
 a_0 : Gitterkonstante

Kugelvolumen
 $V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}$

3) Bezeichnung von Punkten, Geraden und Ebenen im Raumgitter

Gerade (Richtung)	$[xyz]$	Richtung der Geraden (Vektor, meist vom Nullpunkt): $x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$
Richtungsfamilie / Geradenfamilie	$\langle xyz \rangle$	Kristallographisch äquivalente Geraden (gleiche Atombelegung)
Ebene	(xyz)	Ebene in Millerschen Indizes ausgedrückt: Das kleinste ganzzahlige Vielfache der reziproken Achsenabschnitte x,y,z. Bsp.(1): $213_{xyz\text{-Achsenabschnitte}} \rightarrow (362)_{\text{Millersche-Indizes}}$ $(\frac{1}{2} \frac{1}{1} \frac{1}{3} \rightarrow \frac{3}{6} \frac{6}{6} \frac{2}{6})$ Bsp.(2): $21\infty_{xyz\text{-Achsenabschnitte}} \rightarrow (120)_{\text{Millersche-Indizes}}$ $(\frac{1}{2} \frac{1}{1} \frac{0}{1} \rightarrow \frac{1}{2} \frac{2}{2} \frac{0}{2})$ Index 0 : Schnittpunkt im unendlichen (∞) \rightarrow resp. wird nicht geschnitten. <u>Millersche Indizes entsprechen einem unnormierten Normalenvektor der Ebene.</u> Die Schnittgerade von 2 Ebenen entspricht dem Kreuzprodukt deren Normalenvektoren, resp. Millerschen Indizes. Bsp.: $\vec{n}_2 \times \vec{n}_1 = (-6,3,3) = [\bar{2}11]$
Ebenenfamilie	$\{xyz\}$	Ebenfalls Millersche Indizes. Familie von kristallographisch äquivalenten Ebenen.
Negative Koordinate	\bar{x}	Negative Koordinate wird mit Querbalken dargestellt
Schnittgerade		Die Schnittgerade von zwei Ebenen

Miller-Bravais-Indizes für hexagonale Gitter

Koordinaten im 4-achsigen System

$$x_1 = \frac{n}{3}(2x'_1 - x'_2)$$

$$x_2 = \frac{n}{3}(2x'_2 - x'_1)$$

$$x_3 = -\frac{n}{3}(x'_1 + x'_2) = -(x_1 + x_2) \Leftrightarrow x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

$$z = n \cdot z'$$

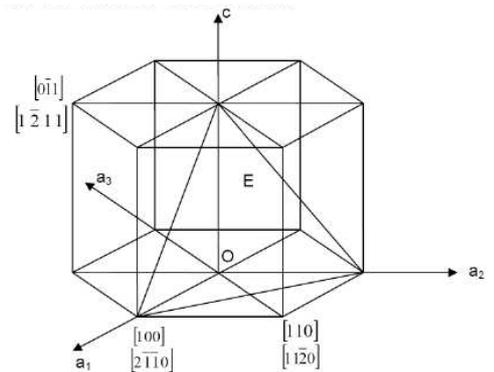
(Faktor n so wählen, dass kleinste ganze Zahlen entstehen)

Koordinaten im 3-achsigen System

$$x'_1 = \frac{1}{n}(2x_1 + x_2)$$

$$x'_2 = \frac{1}{n}(2x_2 + x_1)$$

$$z' = \frac{1}{n}z$$



4) Anisotropie und Textur

Anisotropie	Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften \rightarrow Textur
Isotropie	Richtungsunabhängigkeit der Eigenschaften
Quasi-Isotropie	Gesamtes System (makroskopisch) ist nicht richtungsabhängig.
Textur	Bevorzugte Richtung der Körper \rightarrow Anisotropie Angabe durch <u>Walzebene</u> (WE) und <u>Walzrichtung</u> (WR)

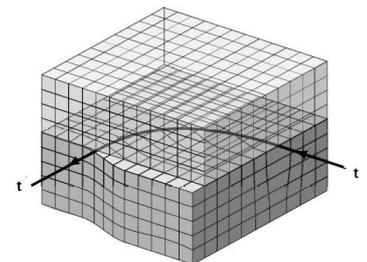
5) Burgersvektor und Burgersumlauf

Der Burgersvektor \vec{b} ist parallel zur Gleitrichtung.

Stufenversetzung (im Bild rechts): \vec{b} ist senkrecht zum Tangentialvektor
Als ob von oben eine Halbebene als einatomige Lage eingeschoben wäre.

Schraubenversetzung (im Bild links): \vec{b} ist parallel zum Tangentialvektor Gitteratome sind seitlich gegeneinander versetzt.

Versetzungsenergie: c

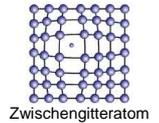
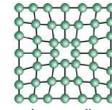


6) Gitterbaufehler

Strukturelle Fehlordnung Atomanordnungsfehler (strukturelle Fehler)
Chemische Fehlordnung Beabsichtigt oder unabsichtlich in das Gitter eingebaute Fremdatome

Leerstellen, Zwischengitteratome, Fremdatome (Nulldimensionale Gitterfehler / Punktförmige Fehler)

- Leerstellen entstehen durch Temperaturerhöhung.
- Beim Abschrecken (schnelle Abkühlung) bleiben die bei hoher Temperatur gebildeten Leerstellen erhalten.
- Mit zunehmender **Bildungsenergie** (h [eV]) nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Defekts ab.
- Zu **kleine Fremdatome und Leerstellen** lagern sich auf der Druckseite von Versetzungen an, zu **grosse Fremdatome und Zwischengitteratome** auf der Zugseite.
- Fremdatome behindern die Versetzungsbewegung → Dadurch werden höhere Kräfte für die plastische Verformung nötig.



Stoffmengenkonzentration
 (Häufigkeit für das Auftreten von Gitterfehlern)

$$c_i = \frac{n_i}{N} \quad N = \sum n_i$$

n_i : Stoffmenge der Komponente i
 (Anzahl Atome oder Fehlstellen im Gitter)

N : Gesamte Stoffmenge
 (Gesamte Anzahl Atome, inkl. Gitterstellen)

Massenkonzentration

$$w_i = \frac{m_i}{M}$$

c_L : Anzahl Leerstellen pro Gitterplatz

c_{L0} : Aktivierungskonstante (meistens 1)

Leerstellenkonzentration
 (Arrheniusfunktion)
 (Raumerfüllung der Elementarzelle mit Atomen)

$$c_L = \frac{n_v}{n} = c_{L0} \cdot \exp\left(\frac{-h_L}{k \cdot T}\right)$$

n_v : Anzahl Leerstellen

n : Anzahl Gitterplätze

h_L / H : Aktivierungsenergie $\left[\frac{J}{mol}\right]$
 (Bildungsenergie für Fehlstellen)

$$c_L = c_{L0} \cdot \exp\left(\frac{-H}{R \cdot T}\right)$$

T : Absolute Temperatur $T = \nu + 273K$
 ($0^\circ C \approx 273K$)

Konstanten

k : Boltzmannkonstante: $8.62 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$ resp. $1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

R : (universelle) Gaskonstante: $8.314472 \frac{J}{mol \cdot K} = Ak$

A : Avogadro-Zahl (Loschmidt-Zahl): $6.023 \cdot 10^{23}$

Versetzungen (Eindimensionale Gitterfehler)

- Kleinstmöglichen Versetzungen sind die Wahrscheinlichsten!
- Eine vollständige Versetzung deckt immer einen anderen Gitterplatz, die anderen sind Teilversetzungen.
- Die Versetzungslinie kann nie im Gitter enden, Sie muss immer im Gitter geschlossen sein oder an einer Grenzfläche enden.
- Gleitungen immer in Richtung der dichtesten Atompackungen!

Versetzungsdichte

(Zahl der Durchstosspunkte pro Fläche oder Länge aller Versetzungen pro Volumeneinheit)

$$\rho_v = \frac{N}{A} = \frac{1}{l} \sum l$$

N : Anzahl Durchstosspunkte

A : Kontrollfläche

Kletterfähigkeit von Versetzungen

In der Gleitebene liegende Hindernisse halten die Versetzungsbewegung auf. Durch das Anlagern von Leerstellen an der Kante der eingeschobenen Gitterebene wechselt eine Versetzung ihre Gleitebene (Klettern) und kann wieder gleiten. Die Verfestigung ist kleiner.

Stapelfehler (Zweidimensionale Gitterfehler)

Stapelfehler liegen vor, wenn die **normale Stapelfolge gestört** ist: Wenn z.B. beim kubisch flächenzentrierten Gitter die dichtest gepackten Ebenen nicht wie ABCABC... übereinander liegen, sondern wie ABA.

Man braucht **2 Teilversetzungen** um einen Stapelfehler zu bilden! Die Burgersvektoren der Teilversetzungen addieren sich zum Burgersvektor der vollständigen Versetzung.

Stapelfehler **behindern die Versetzungsbewegungen**. Das führt zu einer **Verfestigung bei plastischer Verformung** was für gleichmässiges Fließen beim Tiefziehen erforderlich ist. Die Energie, welche nötig ist, um einen Stapelfehler zu erzeugen (**Stapelfehlerenergie**), ist abhängig vom Material und der Fläche des Stapelfehlers. Je höher die Stapelfehlerenergie, umso kleiner sind die Stapelfehler, umso beweglicher sind die Versetzungen, umso kleiner ist die Verfestigung bei plastischer Verformung.

Überstrukturen: Ordnung oberhalb des Ordnungsprinzips des Kristalls

Stapelfehlerenergie

(muss für die Erzeugung von Stapelfehlern aufgebracht werden)

$$\gamma_{St} \sim \frac{1}{d} \quad \left[\frac{J}{m^2}\right]$$

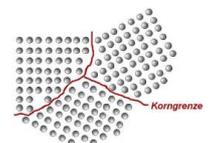
d : Abstand zwischen 2 Teilversetzungen

18/8CrNi: $7 \cdot 10^3$, **Ms30**: $7 \cdot 10^3$, **Au**: $10 \cdot 10^3$,

Cu: $100 \cdot 10^3$, **Al**: $250 \cdot 10^3$

Korngrenze: Grenzflächen zwischen Kristallen einer Phase

Phasen Grenzflächen, Korngrenzflächen sind Grenzflächen zwischen Phasen unterschiedlicher Struktur und Zusammensetzung.



WICHTIG: Stapelfehlerenergie klein (ausgedehnte Stapelfehler):

Kaltverfestigung (Fließshinderung) ausgeprägt, daher gute Tiefzieheignung!!!

Begründung: Dort wo die Einschnürung auftritt kommt es lokal zu vielen Stapelfehlern. Diese behindern sich gegenseitig. So läuft die plastische Verformung kontinuierlich (gleichmässig) über das ganze Material, Rissbildung wird vermieden.

7) Legierungskunde: Zustandsdiagramme

8) Erstarrung (Kristallisation)

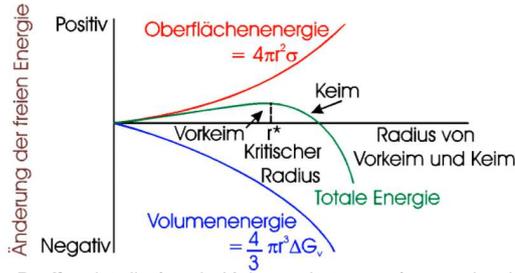
Die Nahordnung ist ein Mass für die Regelmässigkeit von nah benachbarten Teilchenpositionen. Sie gibt an, wie sehr sich der Nachbarteilchenaufbau ähnelt. Fernordnung ist ein Mass für die Regelmässigkeit der Teilchenpositionen über weite Entfernungen innerhalb eines Feststoffes.

Keimbildung

Korngrösse: $\sim \frac{1}{\Delta T}$

Umso mehr Keime, umso kleiner die Korngrösse!

Keimzahl: $\sim \Delta T$



Homogene Keimbildung

Aus der Schmelze gebildete Keime (ohne Hilfe von Fremdoberflächen), braucht eine Unterkühlung ΔT unterhalb der Schmelztemperatur. Viele Atome.

Heterogene Keimbildung

Startet an Fremdkeimen oder Partikeln in der Schmelze (Verunreinigungen) und an Wänden. Wenige Atome!

Für Radien kleiner als der **kritische Radius** ist die für ein Keimwachstum aufzuwendende **Oberflächenenergie** (proportional zu der Oberfläche) grösser als der Gewinn an **freier Enthalpie** (proportional zum Volumen). Erst wenn der Keim grösser ist als der kritische Radius, kann er stabil weiterwachsen.

Impfen: Körner feiner machen durch Fremdpartikel. Impfen heisst zugeben von Fremdpartikeln, welche die (heterogene) Keimbildung fördern.

Gesamtänderung der Energie

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta g_v + 4 \pi r^2 \sigma$$

ΔG : Zunahme der freien Enthalpie bei Keimerstarrung

σ : Freie Oberflächenenergie

r : Radius des Keims

Δg_v : Spezifische freie Volumenenergie

Kritischer Radius

$$\frac{dG}{dr} = 0 \quad \text{zu} \quad r^* = \frac{-2\sigma}{\Delta g_v(T)}$$

σ : Grenzflächenenergie (Temperaturunabhängig)

Unterkühlung

$$\Delta T = T_s - T$$

T_s : Gleichgewichtsschmelztemperatur

T : Vorliegende Temperatur

Keimbildung

Anz. Zusammenballungen (Kluster) mit Radius $r > r^*$ (Arrhenius)

$$n = N_A \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G(r^*(\Delta T))}{kT}\right)$$

N_A : Anz. Atome

k : Boltzmannkonstante: $1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

n : Anzahl Keime

r^* : Krit. Radius

a, b : Formfaktoren

Heterogene Keimbildung

$$\Delta G = a \Delta G_v n + b \sigma \cdot \sqrt[3]{n^2}$$

σ_F : Oberflächenenergie

$$\Delta G = a \Delta G_v n + (b \sigma - c \sigma_F) \cdot \sqrt[3]{n^2}$$

Kristallisations-Geschwindigkeit

(Durch Maximum begrenzt)

$$\frac{dV}{dt} \quad (\text{Pro Zeiteinheit gebildetes Kristallvolumen})$$

Erstarrtes Volumen

$$V(t) = V_0 \cdot (1 - \exp(-at^m))$$

D : Diffusionskoeffizient

Einkristalle: Da auf Korngrenzen Gleitung stattfindet; z.B. für Turbinenschaufeln (oberhalb immer Schmelze, damit nicht neue Keime entstehen).

Seigern: Seigerungen sind Konzentrationsunterschiede von Legierungselementen oder Verunreinigungen im Werkstoff die beim Erstarren von Schmelzen auftreten können \rightarrow inhomogenes Gefüge!

Um so grösser die Seigerung, um so grösser die Abkühlgeschwindigkeit!

Kristallseigerung: Abkühlungsgeschwindigkeit erhöht sich \rightarrow Diffusionsgeschwindigkeit geht runter \rightarrow Temperaturunterschied grösser

Blockseigerung: Auf die letzten noch flüssigen Zonen konzentriert. \rightarrow Konzentrationsunterscheidung im ganzen Block

Kochen: Vergiessen \rightarrow Stahl in Kokillen \rightarrow $O_2 \rightarrow$ Blasenbildung = Schlechtere mech. Eigenschaften. Um das zu verhindern: Desoxidationsmittel.

Wachstum

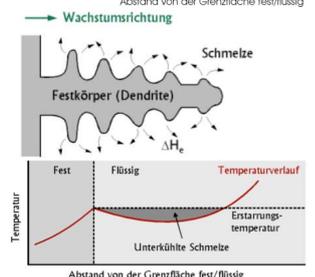
Planares Wachstum

Wenn sich die Temperatur der Schmelze oberhalb der Erstarrungstemperatur befindet, können sich an der Wachstumsfront keine Erhebungen ausbilden. Die Grenzfläche zur Schmelze verschiebt sich planar. Die latente Wärme wird von der Grenzfläche durch den Festkörper abgeleitet.



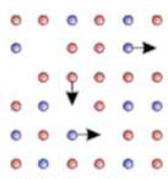
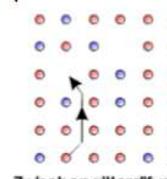
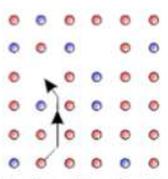
Dendritisches Wachstum

Bei schwacher Keimbildung unterkühlt sich die Schmelze, bevor die Erstarrung einsetzt. Bei unterkühlter Schmelze können Erhebungen auf der Grenzfläche fest/flüssig schnell als Dendriten anwachsen. Die latente Erstarrungswärme wird an die Schmelze abgeführt und deren Unterkühlung dadurch vermindert. Dendriten wachsen solange, bis die unterkühlte Schmelze sich auf Erstarrungstemperatur erwärmt hat.



9) Diffusion

Selbstdiffusion Thermodiffusion - Innerhalb einem Material, z.B. durch Temperaturunterschied (Brownsche Molekularbewegung).
Fremddiffusion Ein Material in ein anderes. Konzentrationsabhängige Diffusion. Über Leerstellen (braucht wenig Energie) oder über Zwischengitterplätze (braucht viel Energie).

Wager-Schottky-Mechanismus	Frenkel-Mechanismus	Diffusion über Zwischengitterplätze
Nach diesem Mechanismus erfolgt der Platzwechsel eines Atoms über thermisch bedingte Gitterstellen	Danach verlässt ein Atom seinen Gitterplatz, wobei sich eine Leerstelle bildet, und besetzt einen weiteren, freierwerdenden Gitterplätzen und vor allem auf Zwischengitterplätzen stattfinden.	Über Zwischengitterplätze erfolgt die Diffusion von Zwischengitteratome wie C, H, O, B oder N.
		
Diffusion über Leerstellen	Zwischengitterdiffusion in Substitutionsmischkristallen	Zwischengitterdiffusion in Substitutionsmischkristallen

Diffusionsstrom(dichte)
 (stationäre Diffusion)
 (1. Fick'sches Gesetz)
 (Vorzeichen Abhängig von Betrachtungsrichtung)

$$j = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \frac{dc}{dx} \quad \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

Materialbezogene Gleichung

Diffusionskoeffizient

$$D = D_0 \cdot e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} = D_0 \cdot e^{-\left(\frac{\tilde{Q}}{kT}\right)} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$D_1 \cdot t_1 = D_2 \cdot t_2$$

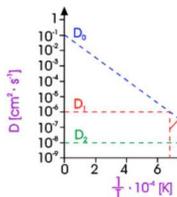
$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{Q}{RT}$$

$$\log(D) = \log(D_0) - \left(\frac{Q}{19.15} \cdot \frac{1}{T}\right)$$

$$\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) = \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$$

Umformungen

$$\ln a = b \Leftrightarrow e^b = a$$



Die Aktivierungsenergie Q ist die Energie, die erforderlich ist, damit ein Atom seinen Gitterplatz verlassen kann. Ein Zwischengitteratom benötigt normalerweise weniger Energie, um sich an den umgebenden Atomen vorbeizudrängen. Daher sind die Aktivierungsenergien für Diffusion von Zwischengitteratomen kleiner als die für Leerstellendiffusion

Diffusionsparameter	D ₀ [m ² /s]	Q[kJ/mol]
Fe in Ferrit	5 · 10 ⁻²	240
C in Ferrit	2 · 10 ⁻²	75
H in Ferrit	3	12
Fe in Austenit	2 · 10 ⁻⁵	270
Cu in Al	8 · 10 ⁻⁶	136
Ni in Cu	6 · 10 ⁻⁹	125
Cu in Ni	1 · 10 ⁻⁷	150

$$\frac{Q}{kJmol^{-1}} = 0.14 \dots 0.17 \cdot \frac{T_s}{K}$$

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
Φ	$erf(\Phi)$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

D: Diffusionskoeffizient $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

\bar{x} : Diffusionsrichtung

Δx : Diffusionsstrecke

c: Konzentration $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Δc : Konzentrationsunterschied des Atoms $\Delta c = c_2 - c_1$

c₁: höhere Konzentration

c₂: niedrigere Konzentration

Q: Aktivierungsenergie

T: Temperatur [K] $[^{\circ}C + 273]$

R: Universale Gaskonstante $8.314472 \frac{J}{mol \cdot K}$

D₀: Frequenzfaktor (Konstante)

c_{...}: Konzentration [Gew.% A]

c_a: Konz. an der Oberfläche (konst.)

c₀: Ausgangskonz., im Inneren

c_x: An der Stelle x nach Zeit t

erf: Fehlerfunktion

2. Fick'sches Gesetz

Konzentrationsprofil

(instationäre Diffusion)

Aussage: Atome, die nicht durch Kontrollvolumen gehen, bleiben darin erhalten.

$$\frac{dc}{dt} = D \cdot \frac{d^2c}{dx^2}$$

Materialunabhängige Bilanzgleichung

$$\frac{c_a - c_x}{c_a - c_0} = erf \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = erf(\Phi)$$



Interpolieren

(Lineare Interpolation)

Aus der Tabelle die Werte oberhalb und unterhalb ablesen. Dann folgendermassen interpolieren:

$$\Phi = \frac{erf(\Phi) - erf(\Phi)_{tiefer}}{erf(\Phi)_{höher} - erf(\Phi)_{tiefer}} \cdot (\Phi_{höher} - \Phi_{tiefer}) + \Phi_{tiefer}$$

Achtung: Tiefer bedeutet tieferen Wert, ist in der Liste aber oberhalb. Höher bedeutet höheren Wert, welcher in der Liste unterhalb ist.

Theorie Interpolieren:

Finden eines Wertes zwischen den Punkten

(x₀, f₀) und (x₁, f₁):

$$f_{(x)} = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$

10) Elastizität

Dichte

$$\rho = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{dM}{dV}$$

Materialbezogene Materialgleichung

Potential

$$U_{(x)} = -\int_0^x F_{(x)} dx$$

Kraft F (z.T. x-abhängig) auf Verschiebungsweg der Kraft: x [m]

Spannungvektor

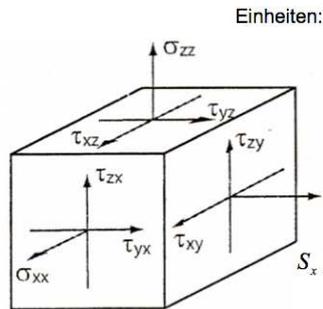
$$\underline{S} = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{d\underline{F}}{dA}$$

Die Verkleinerung der Kontrollfläche erfolgt bis auf Dimensionen (Seitenlängen) von ca. 10³ Atomen. Aus dieser Grenzwert ist erreicht, wenn die Schwankungen des Spannungsvektor nur noch 10⁻³ betragen.

$$d\underline{F} = d\underline{F}_n + d\underline{F}_t = d\underline{F}_n \cdot \underline{n} + d\underline{F}_t \cdot \underline{t}$$

	Vektoren	Beträge
Normalspannung: Vektorkomponente normal zur Fläche	$\underline{S}_n = \sigma \cdot \underline{n}$	$\sigma = \lim_{dA \rightarrow 0} \left(\frac{dF_n}{dA} \right)$
Schubspannung: Vektorkomponente tangential an der Fläche	$\underline{S}_t = \tau \cdot \underline{t}$	$\tau = \lim_{dA \rightarrow 0} \left(\frac{dF_t}{dA} \right)$

Deformatonstensor
Spannungstensor



Einheiten:

[σ]=N/m²=Pa (Pascal)

[σ]=N/mm²=10⁶Pa=MPa

Der Deformationstensor ε

Multipliziert man diesen Tensor mit einem Richtungsvektor zwischen zwei Materiepunkten, so erhält man dessen Verlängerung und Verdrehung durch den Verformungszustand, der immer als symmetrisch zur Hauptdiagonalen aufgefasst wird

Der Spannungstensor I

$$S_x = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{T}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\underline{S} = \underline{\underline{T}} \cdot \underline{n} \quad , \quad d\underline{F} = \underline{\underline{T}} \cdot d\underline{A}$$

$$\begin{aligned} S_x &= \sigma_{xx} \cdot n_x + \tau_{xy} \cdot n_y + \tau_{xz} \cdot n_z \\ S_y &= \tau_{yx} \cdot n_x + \sigma_{yy} \cdot n_y + \tau_{yz} \cdot n_z \\ S_z &= \tau_{zx} \cdot n_x + \tau_{zy} \cdot n_y + \sigma_{zz} \cdot n_z \end{aligned}$$

11) Index

A		Elastisches Verhalten (Keramik)	47	Hochlegierte Stähle	27
Abgeschreckt (Aluminium)	32	Elastizität	12	Hochtrainieren	20
Abkühlungsgeschwindigkeit	24, 29	Elastomere	38, 39, 41	Hookesches Gesetz	1, 12
Abkühlungsgeschwindigkeit, krit.-	23	Elektrische Eigenschaften	35	I	
Abkühlungskurven	7	Elektrische Eigenschaften (Polymere)	43	Impfen (Aluminium)	34
Abschreckalterung	27	Elektrische Felder	36	Interpolieren	11
Abschrecken	24	Elektrische Leistung	36	Ionenradien (Keramik)	44
Abschrecken (Aluminium)	33	Elektrische Neutralität (Keramik)	44	Isothermes ZTU-Schaubild	24
Aktivierungsenergie	14	Elektrischer Strom, Spannung	36	Isotropie	3
Alterung	27	Elektronendichte	35	K	
Aluminium-Legierungen	32, 33	Elektronentheorie, klassische	35	Kaltarbeitsstähle	29
Aluminium-Gusslegierungen	34	Enthalpie	5	Kaltaushärtung	26
Anisotropie	3	Erholung	17	Warmaushärtung	26
Anlassen	23	Ermüdung	19	Kaltauslagern, -härten (Aluminium)	33
Anlassvergüten	25	Ermüdungsbruch	20	Kaltumformbarkeit	28
Arrheniusfunktion	4	Ermüdungsfeste Werkstoffe	20	Kaltumformen	17
Aufkohlen	26	Erstarrung	16	Kaltumformung	22
Aushärtbarkeit (Aluminium)	32, 33	Erweichungszustand (Polymere)	39	Kaltverfestigt (Aluminium)	32
Aushärtung	26	Eutektikum	6, 10	Kaltverfestigung	14
Aushärtung (Aluminium)	33	Eutektische Zelle (Gusseisen GJL)	30	Karbidnetz	22
Ausscheidung	26	Eutektoid	7, 25	Keimbildung	16, 17, 23, 26
Austenit, Austenitkorn	24	F		Keimwachstum	17
Austenitformhärten	25	Fe3C	10	Keramik-Bruchverhalten	48
Automatenstähle	29	Fehlordnung (strukturell, chemisch)	4	Keramik-Formgebungsmethoden	46
Avogadro Zahl	4	Feinkorn	23	Keramik-Herstellung	46
B		Feinkornstähle	28	Keramik-Langzeitfestigkeit	48
Bainit	24	Feinkristalline Zone	17	Keramik-Lebensdauer	48
Bändermodell	35	Feinschneidbarkeit	22	Keramik-Oberflächen	45
Barren-Hochglühen (Aluminium)	34	Fernordnung	16	Keramikstrukturen, -gitter	45
Baustähle	28	Ferrit	10, 24	Keramische Werkstoffe	44
Betriebsfestigkeit	20	Ferromagnetisch	36, 37	Kerbschlagarbeit	25, 27
Biegeversuch (Keramik)	47	Festigkeit (Grauguss)	31	Kerbschlagzähigkeit	27, 28
Bindungsenergie	15, 34	Festigkeit (Keramik)	47	Kerbwirkung	20
Bindungskräfte (Polymere)	39	Festigkeitssteigerung	28	Kerbwirkung, innere (Gusseisen)	30
Blausprödigkeit	27	Festphasensintern (Keramik)	47	Klassische Elektronentheorie	35
Blockseigerung	16	Fibrillen (Polymere)	39	Kletterfähigkeit von Versetzungen	4
Boltzmannkonstante	4, 16	Lamellen (Polymere)	39	Kochen	16
Borieren	26	Fick'sches Gesetz	11	Koerzitivfeldstärke	37
Brand (Keramik)	46	Fließbereich (Polymere)	40	Kohlenstoffbindungen	37
BRAVAIS	2, 3	Fliessgrenze	19, 22	Komponentengehalt	5
Brinellhärte	23	Fliessvermögen	17	Kompressionsmodul	12
Bruchdehnung	25	Fliesszonen (Polymere)	42	Konststoffe Unterteilung	43
Brucheinschnürung	25	Flüssigphasensintern	47	Kontinuierliches ZTU-Schaubild	25
Bruchverhalten (Keramik)	48	Formgedächtnislegierung	24	Koordinationszahl	2
Bruchwahrscheinlichkeit (Keramik)	47	Formzahl	20	Kornfeiner	17
Bruchzeit	18	Fouriersches Wärmeleitungsgesetz	35	Korngrenze	4
Burgersvektor	3	Frank-Reed Quelle	14	Korngrößenhärtung	15
C		Freie Energie	5	Korngrösse	16, 18
Cementit	24	Freie Enthalpie	34	Kornvergrößerung	18
Chrom (Legierungselement)	29	Fremdatome	4	Korrosionsbeständigkeit	28, 29
Coble	18	Fremdbausteine (Keramik)	45	Korrosionsschutz (Aluminium)	34
Copolymerisate	38	Frenkel-Mechanismus	11	Kraftwirkung (Magnetismus)	36
Curietemperatur	37	G		Paramagnetisch	36
D		Gaskonstante	4	Kriechbruch	18
Dauerfestigkeit	19, 20	Gefügebeispiele	9	Kriechdehnung	18
Dehnung	1	Gerade	3	Kriechen	18
Dehnung (Polymere)	42	Gestaltfestigkeit	20	Kriechen (Keramik)	48
Dehnung (wahre)	15	Gibbs'sche Phasenregel	6	Kriechen (Polymere)	42
Dehnungstensor	12	Gitterbaufehler (0-dimentional)	17	Kriechfeste Stoffe	18
Dendritisches Wachstum	16	Gitterfehler (0-, 1-, 2-dimensionale)	4	Kriechmechanismus	18
Desoxidationsart (Stähle)	28	Gitterkonstante, Gittertypen	2	Kristallaufbau	2
Diamagnetisch	36	Glasbildung (Keramik)	45	Kristallerholung	17
Dichte	12	Gleichmassdehnung	15	Kristalline Festkörper (Keramik)	44
Dielektrisches Verhalten (Polymere)	43	Gleitsysteme	13	Kristallisation	16
Dimensionieren	20	Gleitverteilung	20	Kristallisationsgeschwindigkeit	16
Diffusion	11, 26	Glühen	22	Kristallisierbarkeit (Polymere)	38
Diffusionsgeschwindigkeit	29	Glühen (Aluminium)	34	Kristallseigerung	16
Dimensionierung (Polymere)	43	Grauerstarrung (Gusseisen)	30	Kugelgraphit (GJS)	30
Durchhaltbarkeit	29	Grauguss	30	L	
Durchhärtung	24	Grauguss (Festigkeit)	31	Lamellengraphit (GJL)	30
Durchhärtung (Stähle)	29	Grenzflächen (Phasen, Korn)	4	Langzeitfestigkeit (Keramik)	48
Duromere	38, 39, 40	Grenzschleife	37	Larsson-Miller-Parameter	19
Dynamische Beanspruchung (Polymere)	42	Grobkristallin	17	Ledeburit	8, 10
E		Grundstähle	28	Leerstellen	4, 17
Ebene	3	Gussblockstruktur	17	Leerstellenkonzentration	4
Edelstähle	28	Gusseisen	30	Legierungselement-Änderung	24
Eigenhalbleiter	36	Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	31	Legierungselementwirkung	28
Einkristalle	16	Gusseisendiagramm	30, 31	Leichtmetalle (Aluminium)	33
Einkristallverformung	13	Gusswerkstoffe	30	Leitfähigkeit (Polymere)	44
Einsatzhärten	26	H		Leitungsband	35
Einsatzstahl	28, 29	Haibachgerade	20	Linienanspannung	14
Einschnürung	15	Härten	23	Lösungsgeglüht (Aluminium)	32
Eisen-Kohlenstoff Gusswerkstoffe	30	Härten von Stählen	25	Lösungsglühen	26
Elastische Konstanten	12	Hebelgesetz	6	Low Cycle Fatigue	19
Elastischer Zustand (Polymere)	39	High Cycle Fatigue	19	Ludwik-Gleichung	1
		Hitzbeständigkeit	29	Lunkern	30

M		Rissausbreitung	20	V	
Magnetische Eigenschaften	36	Rissbildung	20	Valenzband	35
Magnetische Härte	37	Rockwellhärte	23	Verfestigung	20
Magnetisierungsprozess	37	S		Verfestigung bei plastischer Verformung	4
Magnetismus	36	Sättigungsgrad (Gusseisen)	30	Verformung	18
Magnetostraktion	37	Schadensakkumulationshypothese	20	Verformung (Vielkristalle)	14
Makromolekülgrösse (Polymere)	38	Schadenslinie	19	Verformungsalterung	27
Martensit	23, 24	Schädigungsparameter	19	Verformungsverhalten (Keramik)	47
Martensitstufe	23	Schmelzbarkeit (Polymere)	38	Vergießbarkeit	30
Massengehalt	5	Schmid'sches Schubspannungsgesetz	13	Vergüten	23, 24, 25
Massenkonzentration	4	Schneidemechanismus	27	Vergütungsstähle	29
Materialdämpfung (Gusseisen, GJL)	30	Schnellarbeitsstähle	29	Verschleisswiderstand (Stähle)	29
Memory-Effekt (Polymere)	40	Schraubenversetzung	3	Versetzungsbewegung	14
Mengendiagramme	6, 10	Schubmodul viskoelastischer Kunststoffe	42	Versetzungen	4
Metastabiles System	7	Schubspannung	12	Versetzungsabbau	17
Millersche Indizes	3	Schubspannung (kritische)	14	Versetzungsenergie	3
Mischkristall	6	Schubspannungsgesetz	13	Versetzungshärtung	15
Mischkristallhärtung	15, 36	Schubspannungshypothese	13	Versetzungsmechanismus	27
Mischkristallhärtung (Aluminium)	33	Schweissbarkeit	28	Versetzungsquelle	14
Molwärme	34	Schwindung	17	Verspröden	28
Monomere	38	Schwingungsstreifen	20	Vickershärte	23
N		Seigern	16	Vielkristallverformung	14
Nabarro-Herring	18	Seigerungsneigung	30	Viskoelastizität (Kunststoffe)	42
Nahordnung	16	Shape-Memory-Alloy	24	Viskosität	30
Nebervalenzkräfte (Polymere)	39	Sherby-Dorn-Parameter	19	Viskosität (Polymere)	39
Nichtkristalline Festkörper (Keramik)	45	Sicherheit gegen Ermüdung, Bruch, ...	20	Volumenkonstanz	14
Nickel (Legierungselement)	29	Sintern (Keramik)	46	W	
Niedriglegierte Stähle	27	Smith-Diagramm	19, 20, 21	Wachstum (Keim: planar, dendritisch)	16
Nitrieren	26	Sorbit	24	Wagner-Schottky-Mechanismus	11
Nitrierstähle	29	Spannung	1, 14	Wahre Dehnung	15
Normalglühen	22	Spannungsarmglühen	22	Waldversetzungen	14
Normalspannung	12, 13	Spannungsrelaxation	18	Walzen (kontrolliert)	25
Nutstab	21	Spannungstensor	12	Warmarbeitsstähle	29
O		Sphäroguss	31	Warmauslagern (Aluminium)	33
Oberflächengüte	20	Sphärolite (Polymere)	39	Wärme(aus)dehnung	35
Ohmsches Gesetz	36	Spule	36	Wärmeausdehnung (Polymere)	43
Oxidschicht (Aluminium)	34	Stab mit Nut	21	Wärmebehandlung	22, 23
P		Stabilität eines Systems	5	Wärmebehandlung (Stähle)	29
Packungsdichte	2	Stahlbezeichnung	27, 28	Wärmebehandlung (Stahlguss)	30
Patentieren	25	Stähle	27, f.	Wärmebehandlung der Oberfläche	26
Peritektikum	6, 10	Stahlguss	30	Wärmebehandlung im Ggw.	23
Peritektische Reaktion	7	Stapelfehler	4	Wärmebewegung	37
Perlit	8, 10, 24	Stapelfehlerenergie	4, 18, 20	Wärmeleitfähigkeit (Polymere)	34
Perlitstufe	23	Steigerung der Streckgrenze	14, 15	Wärmeleitfähigkeit (Polymere)	43
Permeabilitätszahl	36	Stengelkristallite	17	Wärmeleitung	35
Phasengehalt	5	Stoffmengengehalt	5	Wärmeleitvermögen	35
Phasengleichgewichte	6	Stoffmengenkonzentration	4	Wärmeleitvermögen Kristallgitter	34
Phasenregel	6	Streckgrenze	14, 15, 25, 28	Warmfeste Werkstoffe	29
Phasenumwandlung	22	Streckgrenzenverlauf	27	Warmfestigkeit	29
Physikalische Eigenschaften	34	Stufenversetzung	3	Warmumformbarkeit	28
Plastische Verformung	18	Stützwirkung	20	Wechselwirkung	12
Plastischer Zustand (Polymere)	40	Sulfide	28	Weibullmodul	48
Plastizität	13	Superpositionsprinzip (Polymere)	41	Weichglühen	22
Plastoermüdung	19	Supraleitung	36	Weichglühen (Aluminium)	32, 34
Poisson-Zahl	12	T		Weichmachereinfluss (Polymere)	40
Polarisation, Frequenzabhängigkeit	43	Teilchenhärtung	15, 27, 28	Weisserstarrung (Gusseisen)	30
Polyaddition	38, 39	Teilchenwachstum	27	Werkstofffestigkeit	15
Polygonisation	17	Teilkristalline Strukturen (Polymere)	39	Werkstoffversuch	19
Polykondensation	38, 39	Temperguss (Allg., weiss, schwarz)	30, 31	Widerstand	36
Polymerbindungen	37	Textur	3	Wiedemann-Franz'sche Regel	35
Polymere	37	Thermische Eigenschaften	34	Wöhler-Ermüdung	19
Polymerisation	37, 38, 39	Thermodynamik	5	Z	
Polymerzustände	39	Thermomechanische Behandlung	25	Zähigkeit	20
Porenfeiner	20	Thermoplaste	38, 39, 40	Zähigkeit (Stähle)	29
Porige Festkörper (Keramik)	45	Thermorückfederung (Polymere)	40	Zeitfestigkeit	20
Potential	12, 15, 34	Tiefzieheignung	4	Zeitstandsfestigkeit	19
Proportionalitätskonstante	12	Troostit	23	Zellbildung	17
Pulvermetallurgie (Keramik)	46	U		Zerspanbarkeit	22, 28
Pulversynthese (Keramik)	46	Überalterung	27	ZTU-Schaubild	24
Punktfehler (Keramik)	45	Übereutektisch	7	Zugfestigkeit	25, 28
Q		Übereutektoid	25	Zustandsdiagramme	5, 7
Qualitätsstähle	28	Übergangskriechen	18	Zweistoffsystem	7
Quellspannung	14	Überhärten (Aluminium)	33	Zwischengitteratome	4, 17
Aktivierungsschubspannung	14	Umgehungsmechanismus	27	Zwischengitterplätze (Diffusion)	11
Querkontraktionszahl	12	Umwandlungslinien	24	Zwischenstufenvergüten	25
R		Umwandlungshärtbare Stähle	29		
Rastlinien	20	Ungesättigte Bindungen	37		
Reckalterung	27	Unlegierte Stähle	27		
Reibung, innere (Polymere)	44	Unlegierte Werkzeugstähle	29		
Rekristallisation	17, 18, 28	Untereutektisch	7		
Relaxation (Polymere)	41, 43	Untereutektoid	25		
Relaxationszeit	18	Unterkühlung	16, 17, 23		
Remanenz	37				
Restaustenit	23				
Retardation	41				
Rheologische Modelle (Polymere)	41				
Richtung	3				

12) Inhalt

Index	0
Spannung und Dehnung	1
Kristallaufbau und Gittertypen	2
Bezeichnung von Punkten, Geraden, Ebenen	3
Anisotropie und Textur.....	3
Burgersvektor und Burgersumlauf	3
Gitterbaufehler (Leerstellen, Versetzungen, ...)	4
Zustandsdiagramme (Legierungskunde)	5
Diffusion	11
Elastizität	12
Plastisches Verhalten der Metalle	13
Erstarrung (Kristallisation)	16
Kristallerholung und Rekristallisation	17
Kriechen und Kriechbruch	18
Ermüdung und Ermüdungsbruch	19
Beispiel: Stab mit Nut.....	21
Wärmebehandlung im Gleichgewicht	22
Wärmebehandlung durch Umwandlung im Ungleichgewicht	23
Härten Anlassen Vergüten.....	23
Zeit-Temperatur-Umwandlungs (ZTU) Schaubild	24
Wärmebehandlung der Oberflächen	26
Stähle	27
Stahlbezeichnung	28
Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe	30
Aluminiumbezeichnung.....	32
Aluminium und Aluminiumlegierungen	33
Physikalische Eigenschaften	34
Thermische Eigenschaften	34
Elektrische Eigenschaften.....	35
Magnetische Eigenschaften.....	36
Polymer-Struktur	37
Polymer-Klassifizierung und -Zustände	39
Polymere - Mechanische Eigenschaften im festen Zustand	41
Polymere - Physikalische Eigenschaften	43
Keramische Werkstoffe - Struktur	44
Keramische Werkstoffe - Herstellung	46
Keramische Werkstoffe - Mechanische Eigenschaften	47