

# Werkstoffe für die Elektrotechnik

VO  
355.685

Ausgearbeitete Kapitel





## Prüfungsstoff:

Folgende Kapitel des Buches von „G.Fasching : Werkstoffe für die Elektrotechnik“ zählen zum Prüfungsstoff:

Kapitel 1 : Grundbegriffe der Quantenmechanik  
Kapitel 2 : Atomkern und Atomhülle  
Kapitel 3 : Bindungskräfte  
Kapitel 5 : Kristalle  
Kapitel 6 : Metallische Werkstoffe  
Kapitel 9 : Mechanische Werkstoffeigenschaften  
Kapitel 10 : Thermische Werkstoffeigenschaften  
Kapitel 12 : Elektrische Eigenschaften der Metalle  
Kapitel 13 : Elektrische Eigenschaften der Isolatoren  
Kapitel 14 : Magnetische Werkstoffeigenschaften

Die Kapitel

Kapitel 4 : Gase und Flüssigkeiten  
Kapitel 7 : Nichtmetallische anorganische Werkstoffe. Keramik  
Kapitel 8 : Organische Werkstoffe. Kunststoffe  
Kapitel 11 : Elektrische Eigenschaften der Halbleiter

werden nicht geprüft.

Es handelt sich hierbei um eine Zusammenfassung.

Wir können weder für Vollständigkeit noch für Fehlerfreiheit garantieren; wenn Ihr einen Fehler findet, bitten wir Euch, uns zu informieren.

Bei Fehlern bitte eine email an [alex@fet.htu.tuwien.ac.at](mailto:alex@fet.htu.tuwien.ac.at)

## Kapitel 1 : Grundbegriffe der Quantenmechanik

Ermöglicht Beschreibung mikrophysikalischer Systeme.

### Unschärferelation

Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit nicht beliebig genau messbar

→ Wahrscheinlichkeiten

→ Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h$$

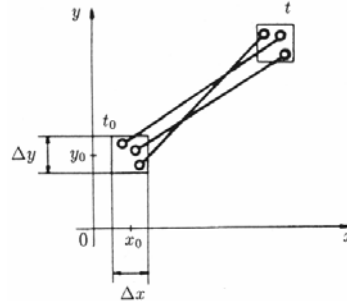
$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$$

wirkt sich offenbar nur im submikroskopischen Bereich aus

→ analog

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h$$



### Schrödingergleichung :

$$|\psi(x, t)|^2 \cdot \psi^*(x, t) \cdot \psi(x, t) = P(x, t)$$

Intensitätsproportional zur Wahrscheinlichkeitsdichte P

$$-\frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 m} \left( \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} \right) + V(x) \cdot \psi(x, t) = -\frac{h}{2\pi j} \cdot \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t}$$

enthält nur einfache Ableitung nach der Zeit → stationäre Welle → zeitunabhängige Schrödingergleichung

Bei stationärer Welle – Intensität zeitlich konstant

$$\psi(x, t) = \psi(x) \exp\left(-\frac{2\pi j}{h} Et\right) \quad (\rightarrow \text{einsetzen})$$

$$-\frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 m} \left( \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \right) + V(x) \cdot \psi(x) = E \psi(x)$$

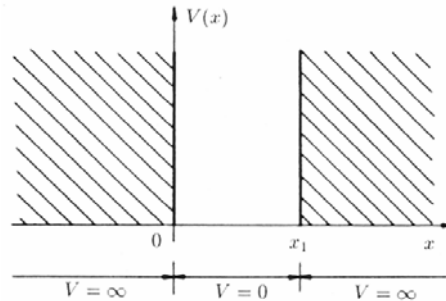
Lösung muss 3 Bedingungen genügen:

1. Wellenfunktion stetig und eindeutig
2.  $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial \psi}{\partial z}$  stetig
3.  $\iiint_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dx \cdot dy \cdot dz$  endlich

## Die Quantisierung der Energie

Lösungen der Schrödingergleichung können quantisiert sein  
(Spektrallinienexperiment)

Potentialtopf:



$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m E}{h^2} \psi(x) = 0$$

Schwingungsgleichung

Lösung:

$$\psi(x) = \alpha_1 \sin\left(\frac{\sqrt{8\pi^2 m E}}{h} x\right) + \alpha_2 \cos\left(\frac{\sqrt{8\pi^2 m E}}{h} x\right) \quad \alpha_2 \dots 0 \text{ für } x=0$$

$$\rightarrow \frac{\sqrt{8\pi^2 m E}}{h} x_1 = n\pi$$

$$\rightarrow \psi(x) = a_1 \sin \frac{n\pi x}{x_1}$$

$$E = \frac{h^2}{8m x_1^2} n^2 \quad (\text{Eigenwerte, Energiewerte})$$

$$\rightarrow \int_0^{x_1} |\psi|^2 dx = 1 \Rightarrow a_1^2 = \frac{2}{x_1}$$

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{x_1}} \sin \frac{n\pi x}{x_1}$$

Dreidimensionalität  $\rightarrow$  3 Quantenzahlen

Entartete Energieniveaus: kann durch mehrere Quantenzustände Kombinationen erreicht werden.

## Das freie Teilchen

$$\text{Frei bedeutet: } V(x) = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m E}{h^2} \psi(x) = 0$$

$$\psi = \exp(j(kx - \omega t))$$



$$t=0: \psi = \exp(jkx) ; \lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$\vec{k}$  ... Wellenvektor, gibt Richtung der Ausbreitung an

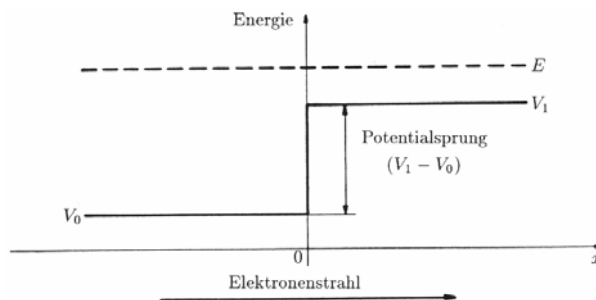
$$x=0: \psi = \exp(-j\omega t)$$

$$\left( \lambda = \frac{h}{p}, E = hf \right) \quad \text{Welle - Teilchen - Dualität}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\sqrt{8\pi^2 mE}}{h}$$

freie Elektronen keine Energiequantelung.

### Einfluss eines Potential-Sprung auf Korpuskelstrahl



$$E_{kin} = E - V_0 = \frac{mv_0^2}{2}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(E - V_0)}{m}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(E - V_1)}{m}}$$

$E > V_1$ : Transmission, reelle  $v_1$

$E < V_1$ : Reflexion, imaginäre  $v_1$

( $E > V_1$ ): 3 verschiedene Wellen:

$$\psi_e = 1 \cdot \exp(j(k_0 x - \omega t))$$

$$\psi_r = A \cdot \exp(j(-k_0 x - \omega t))$$

$$\psi_t = B \cdot \exp(j(k_1 x - \omega t))$$

$$\psi_{x<0} = \psi_e + \psi_r = (\exp(jk_0 x) + A \cdot \exp(-jk_0 x)) \exp(-j\omega t)$$

$$\psi_{x>0} = \psi_t = B \cdot \exp(-k_1 x - j\omega t)$$

$$\Rightarrow \quad 1 + A = B \\ k_0(1 - A) = k_1 B$$

$$\Rightarrow \quad A = \frac{k_0 - k_1}{k_0 + k_1}; B = \frac{2k_0}{k_0 + k_1}$$

$$A = \frac{v_0 - v_1}{v_0 + v_1}; B = \frac{2v_0}{v_0 + v_1}$$

Besonders hoher Potentialsprung  $\Rightarrow v_1$  klein, A groß

Man muss je nach Höhe des Potentialsprungs mit mehr oder weniger starken Reflexionen rechnen ( $E > v_1$  !!!!)

( $E < v_1$ ) : 3 verschiedene Wellen: s.o.  
 $k, v_1$  imaginär  $\rightarrow$  transversale Welle gedämpft

Teilchen werden nicht nur an  $x = 0$  reflektiert sondern obigen in Potential  $v_1$  ein und werdend dort reflektiert.

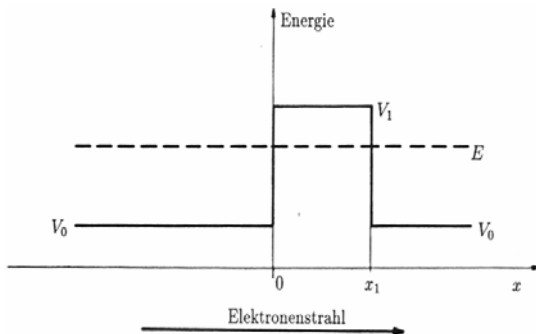
$$\psi_{x < 0} = \psi_e + \psi_r = (\exp(jk_0 x) + A \cdot \exp(-jk_0 x)) \exp(-j\omega t)$$

$$\psi_{x > 0} = B \cdot \exp(-k_1' x - j\omega t)$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} 1 + A &= B \\ jk_0(1 - A) &= -k_1' B \end{aligned}$$

$$\Rightarrow A = \frac{k_0 - jk_1'}{k_0 + jk_1'}; A \cdot A^* = 1$$

Tunneleffekt: Potentialschwelle



Intensität bei  $x_1$  noch nicht 0

$\exp(-c k_1' x_1)$  Elektronen können Tunneln

$c = \text{konst}$   $1 < c < 2$

## Kapitel 2 : Atomkern und Atomhülle

$$d_{\text{Kern}} \approx 10^{-15} \text{ m}$$

$$d_{\text{Atom}} \approx (0,8 \dots 3) \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

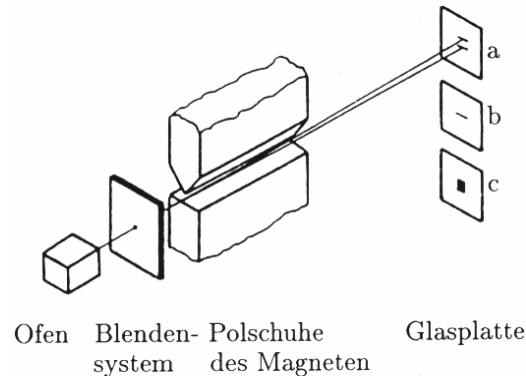
$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Spin} = \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} = \frac{1}{2} \hbar$$

### Stern – Gerlach Versuch:



Ofen, Silber verdampft → Blenden → feiner Ag-Strahl, verläuft zwischen Polschuhen eines starken E-Magneten, entsteht ein inhomogenes Feld (Schneide, Nut)

Ohne Magnetfeld: ( b )

Wenn Strahl aus magnetischen Dipolen besteht → Ablenkung  
Der wirkende Kraftbetrag ist gleich inneres Produkt aus Dipolmoment und Feldgradient.

Klassisch; alle Dipolorientierungen kommen vor → ( c )

Ergebnis: ( a ) Einige Atome nach oben einige nach unten

- ⇒
1. Atome müssen magnetische Dipole sein
  2. Dipole können nur parallel oder antiparallel zum Magnetfeld liegen

Dipolverhalten auf Valenzelektron zurückzuführen (→ Spin)

$$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \text{ (Bohr'sche Magneton, magnetisches Moment)}$$

### Das Wasserstoffatom

Zwischen Proton und Elektron Coulombkraft (Potentialtopf)

$$\left. \begin{array}{l} F_z = m_e \frac{v^2}{r} \\ \end{array} \right\} F_z = F_c \Rightarrow r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2}$$



$$F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

→ QM: Drehimpuls gequantelt:

$$m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar$$

$$\rightarrow r = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi e^2 m_e} n^2$$

$$E = E_{kin} + E_{pot} = -\frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Energienullpunkt: jene Energie, die gerade zur Ionisierung ausreicht.

$E_1$  gibt an, wie fest Elektron gebunden ist (→ Ionisierungsenergie)

Sprungprozess (E-Abgabe): EM-Welle ( $10^{-9}$  s)

→ EM-Welle keine exakt definierte Energie

Diese Energieunschärfe ist Ursache für endliche Breite der

Spektrallinien

Ab  $E=0$  ionisiert → freies e

Dreidimensionaler Potentialtopf → 3 QZ (n, l, m) + Spin QZ

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

$$s = \pm \frac{1}{2}$$

Jede Kombination ist konkrete Lösungsfunktion der Schrödingergleichung

mech. physik. Bedingungen : n ... Verantwortlich für die Energie des Elektrons (Schale)

l ... legt den Betrag des Bahndrehimpulses des e fest

m ... räumliche Ausrichtung des Bahndrehimpulses

Die Entartung des n-ten Energieniveaus ist :  $2 n^2$

## Konfiguration der Elektronenhülle und Periodisches Systems

Bei mehreren Elektronen kommen bei gleichen Hauptquantenzahlen (HQZ) mehrere Energieniveaus vor (niedrigste E-Zustand: alle Elektronen nehmen Plätze geringster Energie an)

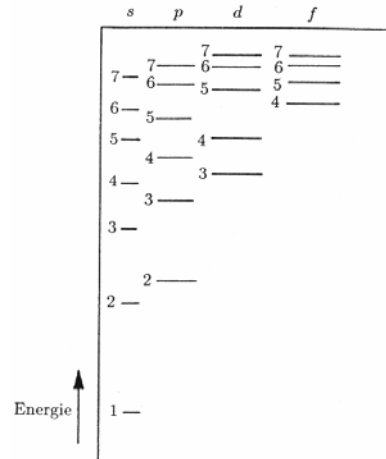
Pauli-Prinzip: eine QZ kann nur von einem e eingenommen werden.

$$1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, \dots$$



Bohr:  $1s^2 2s^2 2p^4$  ← Anzahl der e-s

4s Niveau unterhalb 3d !!!!! (K, Ca)



chemische Eigenschaften im wesentlichen durch das Außenelektron bestimmt

Übergangselemente: gleiche Außenelektronen, innere d und f Schalen werden aufgefüllt

Isotope: gleiche Kernladung aber unterschiedliche Masse  
→ Bezug  $C^{12}$  Atom : Masse = 12 (rel)

Avogadrozahl (Loschmidtsche Zahl):

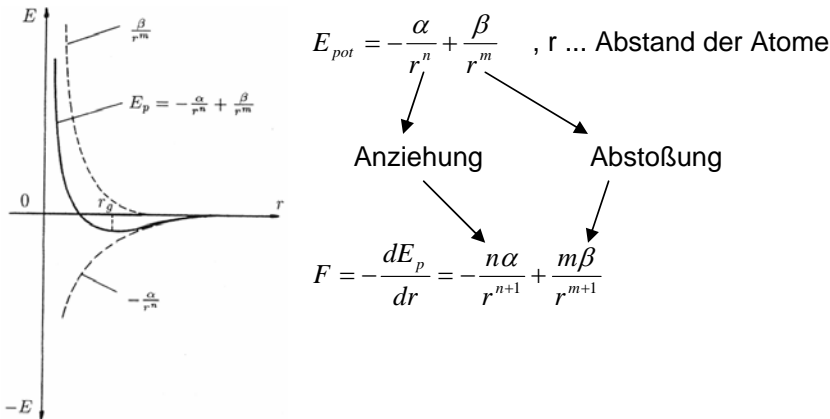
$$L = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{Absolute Masse : } m = \frac{\text{Masse eines Mols (Grammatom)}}{\text{Loschmidtsche Zahl}}$$

Masse etwas kleiner als Summe der Einzelmassen (→  $E = m c^2$ )

## Kapitel 3 : Bindungskräfte

Zwischenatomare Kräfte elektrischer Natur !



Beim Abstand  $r_g$  Teilkräfte im Gleichgewicht,  $F=0$  !  
 $r_g$ :  $F=0$  ; (E pot min) potentielle Energie weist ein Minimum auf

### Ionenbindung

Ist zwischenatomare Kraft , die die Bestandteile eines Ionenkristall zusammenhält.

Ionenkristall immer aus ungleichartigen Atomen (NaCl, LiF) sind Isolatoren, bauen sich aus Ionen auf.

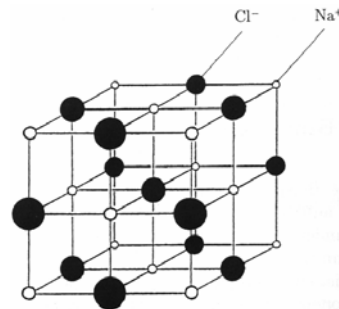
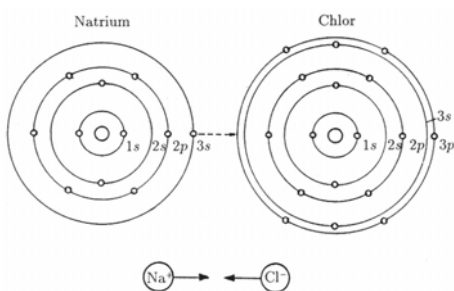
Bindungsmechanismus:

2 ungleiche Atome, eines gibt Elektron ans andere ab → beide ionisieren sich → ziehen sich an (+, -)

Geht nur dann, wenn beide nachher Edelgaskonfiguration haben.

Sofern bei Ionenbildung Energie frei wird → stabil

z.B. NaCl:  $E = E_{Na^+} + E_{Cl^-} + E_{Dipol}$



Bindungskräfte keine Vorzugsrichtung (Edelgas !!)  
 → Ionen wie geladene Kugeln



→ Kristallstruktur

Definierte Struktur auch bei Molekülen → Gesetz der konstant geometrischen Proportionen (Verhältnis Na : Cl = 1 : 1)

Ionenkristalle lassen sich nicht verformen.

Energiebilanz: Gitterionen kleinerer Energieinhalt als Atome → hoher Siedepunkt

→ Elektrolyt (geschmolzen oder in Wasser aufgelöst): Stromtransport = Masse-transport

### **Die kovalente Bindung** (8 – N Regel !!)

z.B.: H<sub>2</sub>, sehr große Anziehungskraft

Atome neigen dazu, Edelgaskonfiguration anzunehmen, Atome teilen sich ein oder mehrere Elektronenpaare, Spin antiparallel → Spin Absättigung

Das e-Paar ist mit gleicher Wahrscheinlichkeit beim einen oder anderen Atom zu finden. Bindung beruht auf Coulombscher Kraft des e

Hundsche Regel: Beim Auffüllen der p-Orbitale zuerst alle Bahnen einfach, dann erst doppelt (entgeg. Spin) besetzt, auch bei d und f – Bahnen

Verhindert gegenseitiges Absättigen der Elektronen in schwach besetzten Schalen.

Kann auch bei s – Orbitalen sein (z.B. C)  
(= Hybridisierung)

kommt auf die Wellenfunktion der e an (Ausbildung der Orbitale) und wie sich die Orbitale der Atome überlappen.

Starke Überlappung → starke Bindungskräfte

H<sub>2</sub>O: Man erwartet Winkel von 90° (Lage der p - Orbitale) aber 105° wegen Abstoßung der H – Kerne.

Die Bindungskräfte können von der räumlichen Richtungsabhängigen (bei Ionenbindung nicht)

→ 3 – dimensionale Struktur

### **Die metallische Bindung**

Hohe Verformbarkeit bei hoher Festigkeit, hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit

77% der Elemente Metalle



Ist nicht auf bestimmte Atompartner lokalisiert (kovalente Bindung)

Im Metallgefüge jedes Atom in symmetrischer Weise von gleichartigen Atomen umgeben.

Die Bindung wechselt zwischen den gleichartigen Nachbarn hin und her (Resonanz), Intensität aber verringert.

Valenzelektronen gehören nicht mehr zu einem Atom → Elektronengas

Elektronengas und pos. Atomrümpfe üben anziehende Kräfte aus

→ große Bindungskräfte → Atomabstand verringert sich → Dichte und Härte erhöht, Schmelztemperatur erhöht (z.B. K, Ca, Sc, ...)

→ wegen Elektronengas große thermische und elektrische Leitfähigkeit

### **Van der Waalsche Kräfte**

Schwächere Bindungskräfte

Beruhren auf elektrostatischer Wechselwirkung zwischen Dipolen

2 Fälle: 1. Dipolmoment ständig vorhanden  
2. Dipolmoment kann durch Feld eines Atoms oder Moleküls beeinflusst werden → Londonsche Dispersionskräfte

- Wasserstoffbrückenbildung

lassen sich durch geringe thermische Energien aufbrechen

#### **1. zufolge Molekularpolarisation** (z.B. CO)

treten auf, weil es Moleküle gibt, die permanenten elektrischen Dipole sind

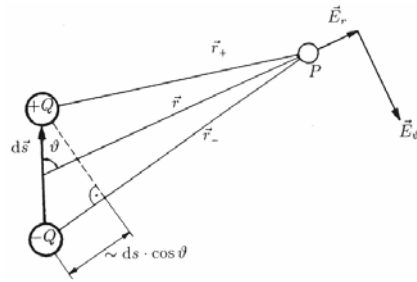
Dipolbildung: wenn im Molekül die Ladungsschwerpunkte nicht zusammenfallen  
Elektronegativität und Symmetrie bzw. Asymmetrie wichtige Rolle

Elektronegativitätswert ist Maß für jene Kraft, mit der in einem Molekül dieses Atom die Elektronen anzieht.

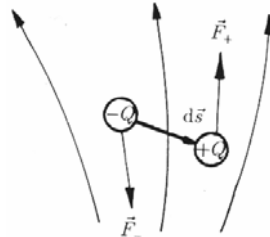
Je größer die Differenz, desto größer Polarität

Bei Dipol bildet sich inhomogenes elektrisches Feld aus

$$\vec{p} = Q\vec{d}, \dots \text{Dipolmoment}$$



zwei Dipole → Kraftwirkung



$$\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = Q\vec{E}_+ - Q\vec{E}_-$$

Temperaturbewegung will Dipolmomenten beliebiges Orientierungsverhalten aufzwingen.

$$\bar{p}_2 = p_2 \cdot \frac{p_2 E_1}{3kT} \quad ; \text{ st Funktion von } r^{-3} \text{ (wegen } E_1)$$

$$U = \bar{p} \cdot \vec{E} = \bar{p}_2 \cdot \vec{E}_1 \quad ; \text{ ist Funktion von } r^{-6}$$

→ Wechselwirkungsenergie nimmt rasch ab !!

## 2. Londonsche Dispersionskräfte

Edelgase oder symmetrische Moleküle keine Dipole, aber dennoch Verflüssigbar

→ andere Kräfte zum Kondensieren → Londonsche Dispersionskräfte

je mehr Elektronen desto größere Kraft

je kleinere Molekularmasse desto geringere Kraft

Ursache: Ladungsfluktuation (zeitliche Schwankungen der Ladungsverteilung)

in zeitlicher Mittelung verschwindet Dipolmoment, aber zu einzelnen Zeitpunkten hat Molekül Dipolcharakter

→ das sind Moleküle mit Polarisierbarkeit  $\alpha$

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}$$

$$U = \vec{p} \cdot \vec{E} \quad (r^{-6})$$

## 3. Wasserstoff – Brückenbildung (HF, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O)

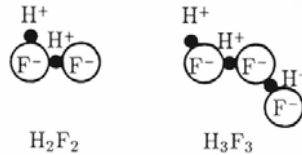
eng verwandt mit Molekularpolarisation



schwächer als Ionen-, Metall- und Kovalentbindung  
stärker als 1. und 2.

Wird durch ein an F, O oder N gebundenes H - Atom vermittelt

Kovalente Bindung,  $\rightarrow$   $H^+$  eng an kovalent gebundene Atom



Kann zufolge elektrostatischer Wirkung, Anziehungskraft auf negative Dipolseite eines analogen Nachbarmoleküls ausüben  $\rightarrow$  lagert sich an Molekül an (HF,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ), sehr hohe Schmelz- und Siedepunkte

$H_2O$  im festen Zustand Tetraederform  $\rightarrow$  4 H – Brücken  $\rightarrow$  geringe Dichte

Führt man Wärme zu  $\rightarrow$  Brücken brechen  $\rightarrow$  Dichte nimmt zu

$4^\circ C$  größte Dichte, bei höherer Temperatur überwiegt normale  
Temperaturausdehnung  $\rightarrow$  Dichte nimmt ab

anderer Effekt ist hohe Dielektrizitätszahl von  $H_2O$  : Dipole des  $H_2O$  Moleküle  
polymerisieren auch im flüssigen Zustand  $\rightarrow$  Dipolmoment vergrößert

### Abstoßende Kräfte

Bei Annäherung 2er Atome  $\rightarrow$  Elektronenwolken dringen ineinander ein  $\rightarrow$   
abstoßende Kräfte

Es besteht Tendenz, dass manche Elektronen, Plätze im anderen Atom einnehmen  
müssten, die bereits besetzt sind  $\rightarrow$  Pauli Prinzip  $\rightarrow$  Elektronen müssen in höhere  
Zustände ausweichen  $\rightarrow$  Energieinhalt erhöht sich  $\rightarrow$  starke Abstoßung

### Atomradien und Ionenradien

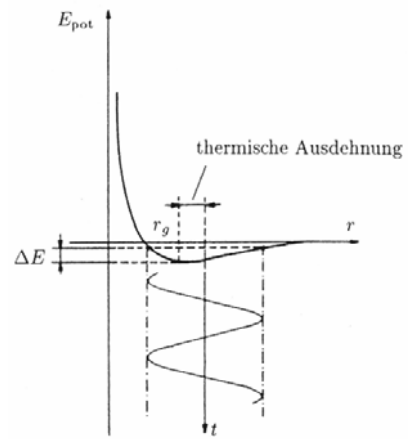
beziehen sich auf Wirkungssphäre der Atome oder Ionen

Atome und Ionen Kugelgestalt, Summe der Radien Gleichgewichtszustand

Radien nicht konstant  $\rightarrow$  Temperatur

Temperaturzunahme  $\rightarrow$  Aufstockung der  $E_{Pot}$  um  $\Delta E$   $\rightarrow$  Atome der Kristallgitter  
oszillieren

$\rightarrow$  der mittlere Atomabstand verschiebt sich  $\rightarrow$  thermische Ausdehnung



Auch Ionisierung (1x, 2x, 3x) hat Einfluss auf Radius

Hängen auch von Kristallstruktur ab, allg.: Atom hat 6 Nachbarn

Hängt auch von kovalenter Bindung ab (1x, 2x, 3x). Je stärker Bindung, desto kleiner Abstand



## Kapitel 5 : Kristalle

Sind räumlich periodische Anordnungen von Atomen, Ionen oder Molekülen, bilden in dieser Struktur festen Körper (Fernordnung)

Amorphe Stoffe: Atome vollständig ungeordnet

Minerale und Erze besitzen schön ausgeprägte Kristalle.  
Gesteine auch Kristalle, bestehen aus Körnern mit Kristallstruktur  
auch H<sub>2</sub>O, Porzellan, Zement, Zucker, Vitamine,...

Einkristalle (Monokristalle): Fernordnung erstreckt sich bis an die räumliche Grenze des Körpers

Polykristalline Werkstoffe: sind aus vielen Kristalliten zusammengesetzt  
unterschiedlich orientiert → behindern sich gegenseitig im  
Polykristall → unregelmäßige Oberfläche  
Grenzflächen zwischen Kristalliten Korngrenzen  
Hier erfährt Kristallorientierung Richtungswechsel

### Indizierung von kristallographischen Ebenen und Richtungen

Manche Kristalle verhalten sich anisotrop (Richtungsabhängig)

Millersche Indizes:

→ Ebenen → Netzebenen (parallel, von Gitterpunkten besetzt)

$$h = \frac{s_1}{x_1}, \quad k = \frac{s_1}{y_1}, \quad l = \frac{s_1}{z_1}$$

s<sub>1</sub> derart wählen, dass h, k, l kleinsten möglichen ganzen Zahlen sind

$$\rightarrow (h \ k \ l); \quad (\bar{h} \ k \ l)$$

↙  
negativ

kristallographische Richtungen:

$$u = \frac{x_2}{s_2}, \quad v = \frac{y_2}{s_2}, \quad w = \frac{z_2}{s_2}$$

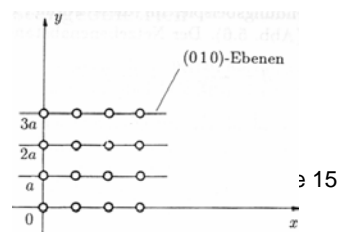
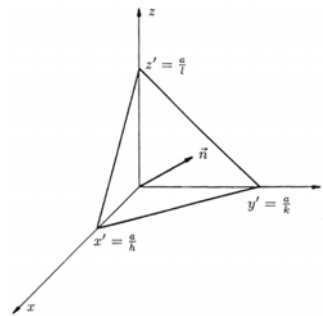
s<sub>2</sub> derart wählen, dass u, v, w kleinsten möglichen ganzen Zahlen sind

→ Millerschen Indizes der Richtungen

→  $[u \ v \ w]$ ,  $[\bar{u} \ v \ w]$

$[h \ k \ l]$  Richtung steht senkrecht auf  $(h \ k \ l)$  Ebene

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix}$$



Der Abstand der Ursprünglichen Netzebene ist die Projektion eines beliebigen Achsenabschnittes (x' y' z') auf die Normalenrichtung

**Ausgewählte Kristallgeometrien**

Hexagonal dichteste Kugelpackung (AB AB – Schichtung)

Jedes Atom ist von 6 gleichartigen Atomen umgeben

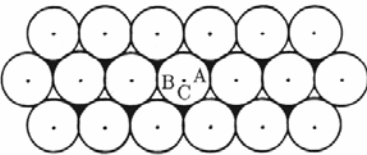
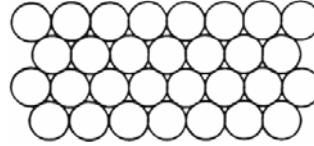
Insgesamt 12 Nachbarn (Maximum)

Meist Atome gleichen Durchmessers mit nahezu kugelsymmetrisch wirkenden zwischenatomaren Kräften

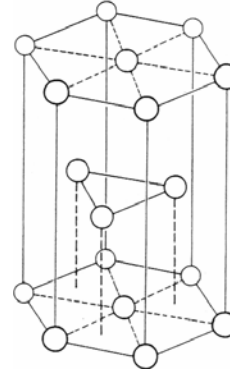
→ keine kovalenten Bindungen

Ionen, auch nicht weil unterschiedlich groß

→ metallische oder van der Waalsche Bindungskräfte (Mg, Zn)



• A  
▽ B  
▽ C  
Wenn eine 2. Kugelschicht bei Position B abgelegt wird, sind die Mulden C nicht mehr Nachbesetzbar. Darum AB – Schichtung

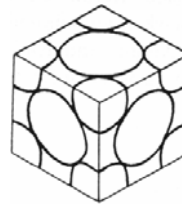


Kubisch-flächenzentriertes Gitter (ABC ABC – Schichtung)

Würfelgestalt, jedes Atom 12 nächste Nachbarn

In Ebene hat jedes Atom 6 Nachbarn

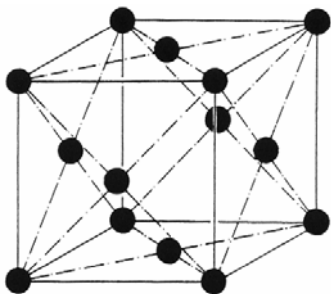
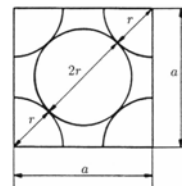
Ist dichteste Kugelpackung



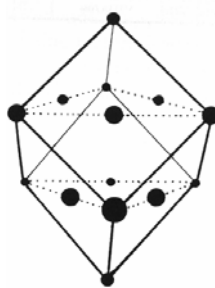
$$\text{atomare Packungsdichte} = \frac{\text{Volumen der Atome}}{\text{Volumen der Elementarzelle}}$$

= 74% ( auch bei AB AB )

es kristallisieren Atome mit gleichen Durchmessern und fast kugelsymmetrisch wirkenden Kräften (Cu, Ag, Au, ...) (Ne, Ar,... Edelgase)



Kubisch



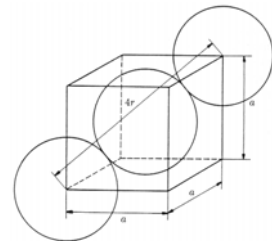
A-Ebene

=

C-Ebene

B-Ebene

A-Ebene

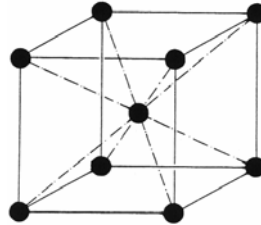
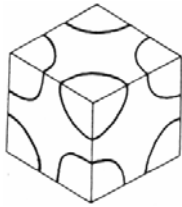


raumzentriertes Gitter (Li, Na)

Insgesamt 2 Atome ( 1 in der Mitte + 8 Atome in den Ecken)

1 Atom 8 nächste Nachbarn

Packungsdichte von 68%



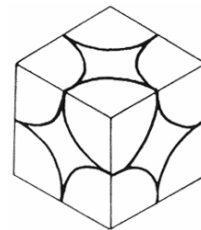
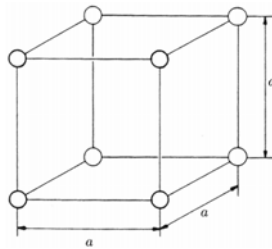
Kubisch – einfaches Gitter

Jedes Atom 6 nächste Nachbarn

Jede Zelle enthält 1 (8/8) Atom

Packungsdichte von 52%

Nur Polonium kristallisiert



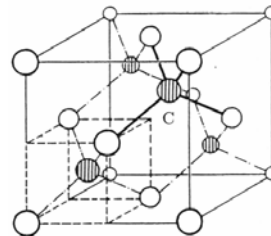
Diamantstruktur

Bei kovalent gebundenen Atomen

Jedes C Atom mit 4 anderen Cs kovalent gebunden

Nur 4 nächste Nachbarn, Tetraederstruktur

Ist aus 2 kubisch Flächenzentrierten Gittern aufgebaut (C, Si, Ge)



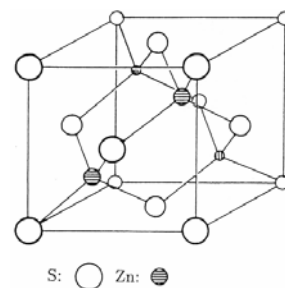
Zinkblendenstruktur

Ionenkristall, Kombinationsstruktur

Wie Diamant aber mit 2 verschiedenen Atomen (Zn, S) besetzt

Erste Gitter mit Zn, zweite mit S

Ionenradienverhältnis spielt eine Rolle



S:  Zn: 

(InSb (Indiumantimonid), GaAs (Galliumarsenid))

Natriumchloridstruktur / Wurtzitgitter / Cäsiumchloridstruktur

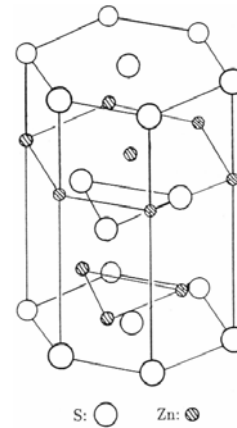
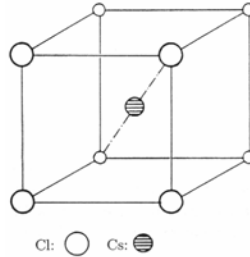
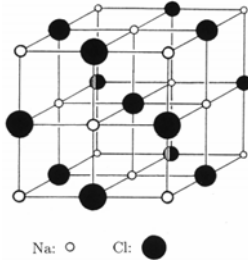
Ionenkristalle

Jedes Ion 6 nächste Nachbarn der anderen Gattung

Zwei flächenzentrierte Gitter, verschoben um  $a/2$

Praktisch dichteste Kugelpackung

Neben NaCl auch Keramiken



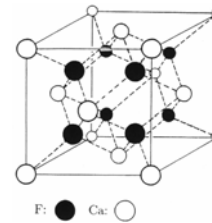
Fluorit – (CaF<sub>2</sub>) – Gitter

Doppelt so viele An – wie Kationen

Kationen (Ca) bilden flächenzentriertes Gitter, Anionen einfach – kubisch

Anionen besetzen Zentren aller 8 Achtelwürfel

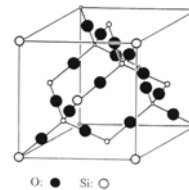
auch ZrO<sub>2</sub>, Ferner UO<sub>2</sub> (für Reaktorkeramik), ThO<sub>2</sub>, TeO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>



Hochcristobalit – (SiO<sub>2</sub>) – Gitter

Alle Si – Ionen haben 4 Sauerstoffionen als Nachbarn

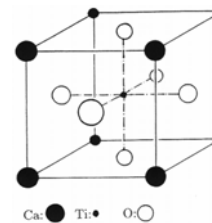
Elementarzelle : 8 Si, 16 O



Perowskit – (CaTiO<sub>3</sub>) – Gitter

→ Keramik, Bariumtitanat, SrTiO<sub>3</sub>, CaZrO<sub>3</sub>, CaAlO<sub>3</sub>

flächenzentriert und raumzentriert



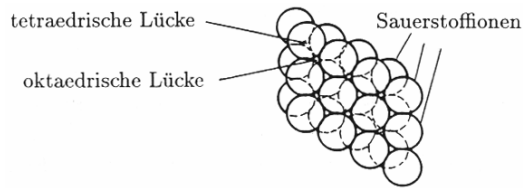
Spinellgitter

Ist AB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; A,B ... Kationen, O ... Sauerstoff

Kubisch dichteste Sauerstoffpackung

2 Arten von Lücken : oktaedrische und tetraedische Lücken

kubisch-flächenzentriert: 4 oktaedrische und 8 tetraedische Lücken, A und B besetzen Hälfte der oktaedrischen und ein Achtel der tetraedischen Lücken :→ Magnetkeramik



## Realstruktur

- Punktdefekte (nulldimensionale Baufehler)

Schottky und Frenkeldefekte

Schottky-Defekt: durch Temperaturvibrationen werden Atome aus Plätzen gerissen  
→ Lücke bleibt.  
Diese Atome besetzen wiederum andere Lücken.

$$n = N \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad n \dots \text{Leckstelle, } N \dots \text{Gitterplätze, } E \dots \text{Bildungsenergie (1eV)}$$

Frenkeldefekt: Losgelöste Atom (Temp.) wird in Zwischengitterplatz eingebaut.

→ Diffusion, Rekristallisation

- Versetzungen (eindimensionale Baufehler)

durch plastische Verformung

1) Stufenversetzung: scheint eine zusätzliche Netzebene eingeschoben.

2) Schraubenversetzung : wendeltreppenförmig aufgebaut  
in der Praxis Mischtyp

- Korngrenzen und Stapelfehler (zweidimensionale Baufehler)

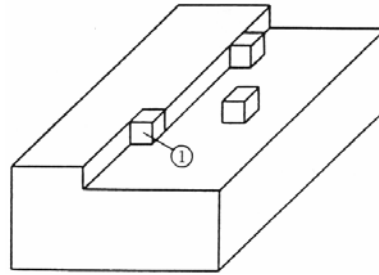
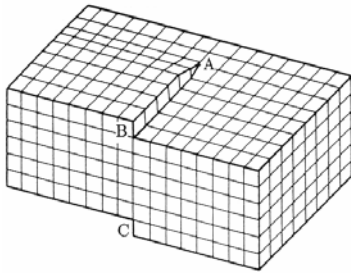
wiederkehrende Stufenversetzungen → Kleinwinkelkorngrenzen  
Stapelfehler bei Ausfall einer Ebene (z.B. ABC AC ABC...)

## Kristallisation

Ist der Übergang von Ausgangsphase (Nährphase) in kristallinen Zustand oder direkt vom dampfförmigen, oder Übergang von einem kristallierten Zustand in den anderen, oder aus einer Lösung

Beim Wachstum lagern sich Atome an der Kristalloberfläche an und bauen schichtweise den Kristall auf.

Oder Schraubenform → Wachstumsspiralen



Herstellung:

Kristallzuchtung aus Dampfphase: In Quarzrohr verdampft, tiefe Temperatur → Dampf sublimiert auf Keimplatte zu Einkristallen (GaAs, InP)

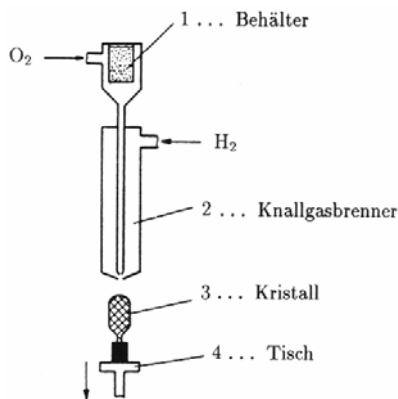
Aus Lösungen: diese Nährphase darf weder übersättigt noch unterkühlt sein (Polykristalle)

Aus Schmelze:

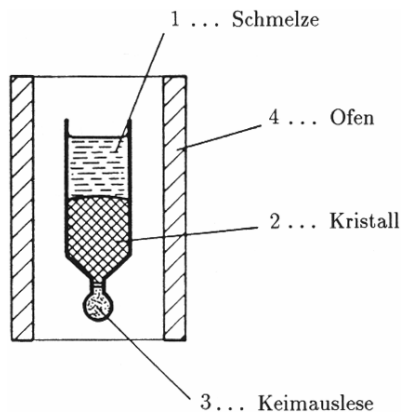
- a) Verneuil - Verfahren: pulverisiert, in Knallgasbrenner aufgeschmolzen und auf Keimkristall auffällt
- b) Bridgeman - Methode: Ofen und Schmelze bewirken Temperaturgradienten → gerichtete Erstarrung, zuerst Polykristalle → Auslese (GaAs)
- c) Czochralski – Methode: Keimkristall in Schmelzkristall eingetaucht und wieder herausgezogen, kommt nicht mit Tegel in Berührung (Si, Ge, GaAs)
- d) Zonenfloating – Methode: Spule → Schmelze, durchwandert Kristall

Epitaxie: Aufwachsen (Planartechnik)

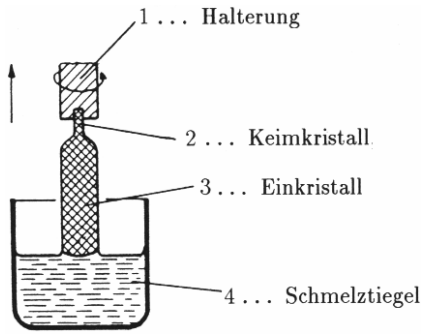
a)



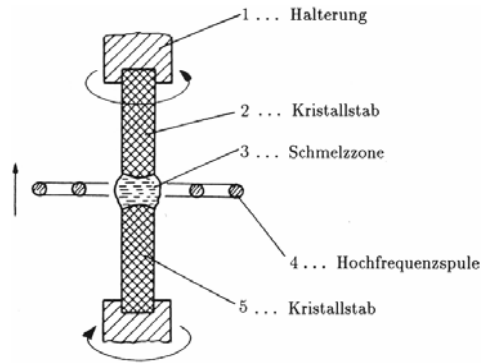
b)



c)



d)





## Kapitel 6 : Metallische Werkstoffe

Erze sind Mineralanreicherungen, aus denen man wirtschaftlich vernünftige Metalle gewinnen kann.

Sind Gemenge von Mineralien mit hohem Metallgehalt

### Metalle und Metallgewinnung

#### 1. Konzentration:

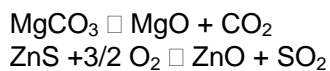
neben gewünschten Metall auch andere Mineralien und taubes Gestein enthalten.

→ Fördererze gemahlen, die zu Konglomeraten verbundenen Mineralien werden freigelegt.

Verfahren: - Mahlen und Sieben  
- unterschiedliche Dichte → flüssige Trennmedien  
- unterschiedlicher Benetzungsgrad → sinken im Wasser oder nicht  
- Magnetscheider

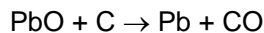
#### 2. Reduktion:

Metallverbindungen chemisch zerlegt → Rohmetall, Erz durch Rösten vorbehandelt  
→ Erz in Oxid umgewandelt.



Dann wird feinkörniges Endprodukt durch Brikettieren oder Sintern grobkörnig gemacht.

Beim eigentlichen Reduktionsprozess wird das Metalloxid zerlegt. Man verwendet Reduktionsmittel, die große Affinität zum Sauerstoff haben (C, CO, Si)



#### 3. Raffination:

Rohmaterial durch Fremdelemente verunreinigt:

- Umschmelzen: An Oberfläche sondern sich Schlacken und Oxideinschlüsse ab.
- Aufblasen von O<sub>2</sub>: die oxidierten Verunreinigungen schwimmen auf der Schmelze
- Einmischen von Zusatzstoffen: kann Verunreinigungen chemisch Binden
- fraktionierte Destillation: bei unterschiedlichen

Verdampfungstemperaturen

- elektrolytische Raffination: Anode aus Rohmetall → Oxidation → Metall geht in Lösung. An Kathode Reduktion, Metall



scheidet sich wieder ab. Verunreinigungen  
bleiben in Lösung

## Legierungen

Haben andere Eigenschaften als Ausgangsstoffe

bestehen nicht aus verschmolzenen Kristalliten der ursprünglichen Stoffe, sondern es entstehen neue typische Bestandteile.

gibt 5 verschiedene typische Bestandteile:

- Kristallite der reinen Elemente
  - Mischkristalle
  - intermetallische Verbindungen
  - Schmelzen und Dämpfe
- } Phasen

Phase = homogener Teil eines Legierungssystems (Härte, Dichte)

Phasenregel von Gibbs:  $P$  (Phase) +  $F$  ( Freiheitsgrad) =  $K$  (Ausgangskomponenten)  
+ 2

→ Phasendiagramm:

- Mischkristallsysteme
- Systeme mit eutektischer und peritektischer Entwicklung
- Intermetallische Verbindungen

### System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand

Legierungskomponenten in Schmelze vollständig mischbar

auch im festen Zustand in beliebigen Verhältnis ineinander löslich → Mischkristalle

Atome haben das Bestreben, andere Atomart in Gitterverband aufzunehmen

Substitutionsmischkristalle sind am häufigsten, auf Gitterplätzen des A-Kristalls B  
Atome eingebaut (ungeordnet oder geordnet = Überstruktur)

wenn:

- Atomsorten gleich groß
- im gleichen Gittertyp kristallisieren
- sie in chemischen und physikalischen Eigenschaften nicht stark voneinander abweichen

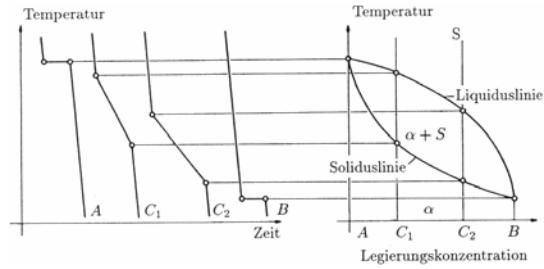
Einlagerungsmischkristalle: Atome mit kleinen Radien  
Ist aber Störung des Gesamtgitters → Energieaufwand

Grenzenergie: kein Einbau von Atomen mehr

Beim Abkühlvorgang einer Schmelze geben Mischkristalle Kristallisationswärme ab  
und verzögern Abkühlvorgang.

Knickpunkte der Abkühlungskurve markieren Phasenbereiche

Im lensenförmigen Zweiphasenbereich fest und flüssig im thermodynamischen Gleichgewicht



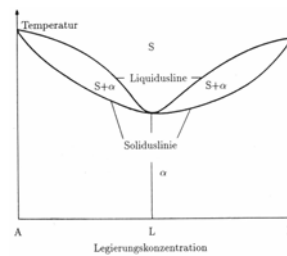
Obere Begrenzungslinie: Liquiduslinie  
Untere Begrenzungslinie: Soliduslinie  
→ langsame Prozessführung

z.B. AuAg, CuNi

über Kanode kann man jene Phasen entnehmen, die miteinander im Gleichgewicht stehen

$$m_l \cdot C_l + m_s \cdot C_s = (m_l + m_s) \cdot C$$

$$\frac{m_s}{m_l} = \frac{C - C_L}{C_S - C} = \frac{l}{s} \quad \dots \text{Hebelbeziehung}$$



Über Verhältnis  $\frac{l}{s}$  Massenverhältnis von fester und flüssiger Phase ablesen.

System des Schmelzpunktminimums:

Liquidus und Soliduslinie weisen Minimum auf, fallen zusammen  
Im Zweiphasengebiet halten sich Schmelze und Mischkristall

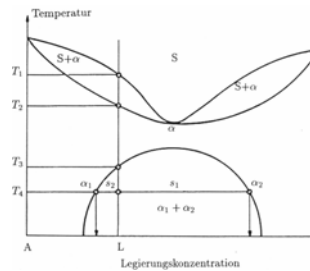
Gleichgewicht

z.B. : AuCu, CoPb, CrFe und NiPd

Systeme mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und beschränkter Löslichkeit im festen Zustand

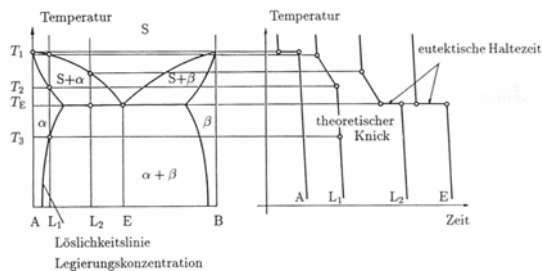
Einbau von Fremdatomen mit Energie verbunden → Schwelle, ab der keine Konzentrationserhöhung mehr möglich ist.

Ab gewisser Temperatur kommt es zur Einmischung, der  $\alpha$ -Mischkristall zerfällt in A-reichen  $\alpha_1$ - und in B-reichen  $\alpha_2$ -Mischkristall



System mit eutektischer Entmischung

Bei  $T_E$  gleich viele  $\alpha$ -Mischkristalle wie Schmelze, unter  $T_E$  zerfällt Homogene Schmelze in heterogenes Gemenge von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Kristalliten



→ feinkörniges, regelmäßiges Gefüge

$\alpha$ - $\beta$ -Kristallitgemenge Eutektikum (= das Gutgebaute)  
niedrigsten Schmelzpunkt, Abkühlungskurve horizontales Plateau wie reines Metall  
z.B.: AgCu, AgGe, ...

System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und vollkommener Unlöslichkeit im festen Zustand

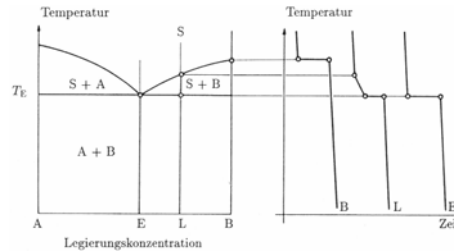
Gibt Metallkombinationen die schwer oder überhaupt unlöslich sind.

Anstatt Mischkristalle  $\alpha+\beta$  hat tieferen Schmelzpunkt als A und B

Eutektische Legierung E hat tieferen Schmelzpunkt als A und B

z.B.: AgSi, AlSn, ...

Peritektisches System



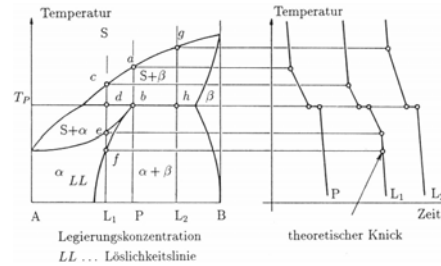
Linsenförmiges Mischkristallsystem, Mischungslücke in der festen Phase

Bei  $T_P$  peritektische Reaktion:  $\beta$ - Mischkristalle reagieren mit der Schmelze und bilden  $\alpha$  Mischkristallart. Ihre Zusammensetzung ist P. Weiteres Absenken → überschreiten der Löslichkeitslinie und  $\beta$ -Segregate werden ausgeschieden ( $\alpha+\beta$ )

Bei der peritektischen Reaktion kommt es zu beträchtlicher, langsam ablaufenden Konzentrationsverschiebungen.

Lässt man dem Prozess zu wenig Zeit so bleibt der Kern des  $\beta$ -Mischkristalls erhalten und  $\alpha$ -Kristalle umhüllen  $\beta$ -Kern

z.B.: AgPt, PtRe, ...



Intermetallische Verbindungen

Metallide oder intermediäre Phasen

Sind Verbindungen zwischen Metallen oder zwischen Metallen und Nichtmetallen (z.B.  $Mg_2Pb$ ,  $AuSn_4$ )

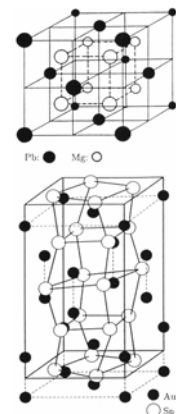
Bindungskräfte: kovalent und Ionenbindung

Haben anderen Gitteraufbau als Legierungspartner für sich → treten als eigene Phase auf

Eigenschaften liegen zwischen denen der Metalle und Nichtmetalle sind hart und spröde (→ Hartmetallen)

bauen sich nur in bestimmten Gewichtsverhältnissen auf

$Mg_2Pb$     Pb ... kubisch flächenzentriertes Gitter  
          Mg ... hexagonales Gitter



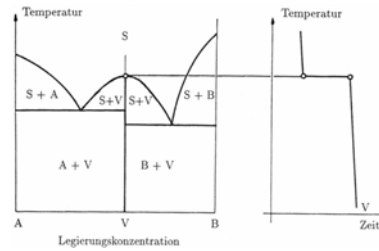
1. kongruent schmelzende Verbindung:

schmilzt ohne vorhergehende Zusetzung bei definierten Schmelzpunkt  
Diagramm aus 2 eutektischen Systemen aufgebaut, kann sich  $\gamma$ -  
Mischkristall ausbilden (BeNi, MgCu<sub>2</sub>)  
Metallid V entsteht !!

2. inkongruent schmelzende Verbindung:

bei bestimmter Temperatur zersetzt sich  
Metallid in Schmelze und in Kristall mit  
abweichender Zusammensetzung

bei nicht exakt vorgegebener  
Zusammensetzung Homogenitätsbereich →  
 $\gamma$ -Verbindungsmischkristall



System mit Mischlücken in der Schmelze

Kann bis zu einem Extremfall der Unmischbarkeit kommen  
z.B. Pb und Fe

## Kapitel 9 : Mechanische Werkstoffeigenschaften

Wichtig meist Kombination mehrerer Werkstoffeigenschaften  
z.B.: mechanisch – thermisch, mechanisch - magnetisch

### Masse und Dichte

Masse Additiv, skalar  $\rightarrow m = \sum_{i=1}^n m_i$

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

$$m = \int_0^V \rho dV$$

homogene Systeme :  $m = \rho \cdot V$

bei Kristallen Dichte gleich Dichte der Elementarzellen  
messtechnische Erfassung von Masse  $\rightarrow$  Wägung (Massevergleich)

### Elastizität, Plastizität und Härte

#### Elastische Verformung

Kleine mechanische Spannungen  $\rightarrow$  Verformung, aber mechanische Rückformung  
(Längen bzw. Winkeländerungen)

Hookesches Gesetz:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  (Zug und Druckspannung)  $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$

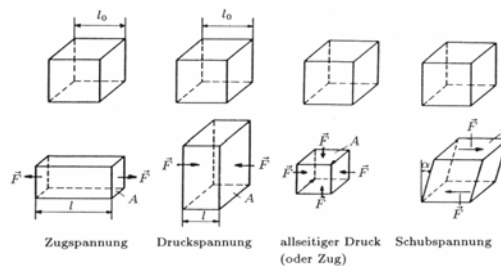
$$\sigma = K \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{allseitige Druck oder Zug})$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (\text{Schubspannung})$$

E ... Elastizitätsmodul

K ... Modul der allseitigen Volumselastizität

G ... Schubmodul



$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{quer}}}{\varepsilon_{\text{längs}}} \quad (\text{Poissonsche Konstante}) \quad \gamma = \tan \cdot \alpha$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$$

kann Verformung auf Elementarzelle zurückformen ( $\Sigma$ )

$$F = -\frac{n\alpha}{r^{n+1}} + \frac{m\beta}{r^{m+1}}$$

$$\rightarrow \text{Dehnung um } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta r}{r_0} \rightarrow \Delta F$$

$$\sigma \approx \frac{\Delta F}{r_0^2}, \quad \varepsilon \approx \frac{\Delta r}{r_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \approx \frac{\Delta F / r_0^2}{\Delta r / r_0} = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta r} = \frac{1}{r_0} \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad \dots \text{Elastizitätsmodul}$$

$$\rightarrow E \approx \frac{n(n-m)}{r_0^{n+3}} \cdot \alpha$$

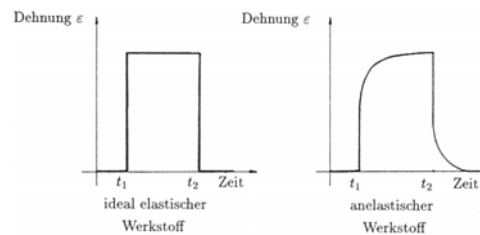
hängt von Richtungsabhängigkeit der zwischenatomaren Kräfte ab

→ bei Kristallen anisotrop (nicht bei polykristallinen)

Elastizität ist Funktion der Temperatur

je größer die Kraft, desto kleiner die Elastizität → anelastisches Verhalten  
auch bei Metallen (spez. für Zug) nichtlinear

anelastisch: Dehnung zeitabhängiger Effekt,  
Relaxion → thermoelastische Effekte :  
Deformationen bewirken Temperaturerhöhung,  
beeinflusst Elastizitätsmodul  
auch durch Snoeck-Effekt:  
Platzwechselvorgang bei eingelagerten  
Fremdatomen



### Plastische Verformung

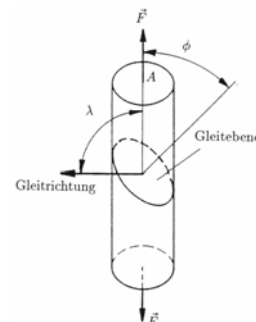
Irreversibel, Atome werden dann vom übernächsten Nachbarn angezogen →  
abgleiten von Gitterebenen (Zug, Druck und Schub !!!)

Abgleiten von Ebenen leichter als das Herauslösen von Atomen  
nur bestimmte Ebenen von Richtungen (Gleitsysteme) → anisotrope Eigenschaften  
dicht besetzte Ebenen bevorzugt

Je mehr Gleitebenen, desto besser Verformbarkeit

Schmidsche Schubspannungsgesetz:

$$\tau = \frac{F \cdot \cos \lambda}{A / \cos \phi} = \frac{F}{A} \cdot \cos \lambda \cdot \cos \phi \quad (= \text{Schubspannung})$$



kritische Schubspannung:  $0,1 \dots 1,0 \text{ N/mm}^2$   
Paketweise Abgleiten! ( $0,1 - 10 \mu\text{m}$ )

Optisch meist nur Gleitlinie sichtbar, entstehen nur an solchen Kristallflächen, die zur Gleitrichtung nicht parallel sind

Abgleiten meist wegen Stufenversetzung

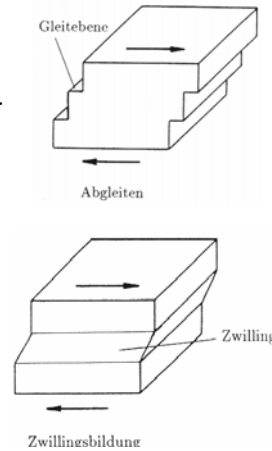
Auch durch Prozesse:

Frank-Reed-Quelle : aus einer Versetzungslinie immer Neue  $\rightarrow$  Versetzungsringe durch Schub

Zwillingsbildung

Alle Atome eines relativ großen räumlichen Bereich werden in eine neue, zum unverformten Bereich symmetrische Lage umgeklappt

$\rightarrow$  Scherung  $\rightarrow$  Kristallteile, die andere Orientierung haben, vermittelt leichtes Abgleiten der Gitterebenen



Prüfverfahren

Werden praxisgerechte Mischphänomene untersucht

Zugversuch: Probestäbe bis zum Bruch beansprucht

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (Spannung)} \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ (Dehnung)}$$

Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung ist Hooksche Gesetz:

Bruchdehnung:  $\delta = \frac{l_B - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l_B}{l_0} \cdot 100\%$

Brückenschnürung:  $\psi = \frac{A_0 - A_B}{A_0} = \frac{\Delta A_B}{A_0} \cdot 100\%$

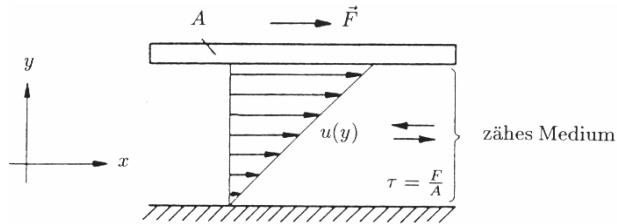
Schwingende Beanspruchung : Dauerschwingversuche (Mittelspannung  $\sigma_m$  + Wechsellastspannung  $\pm \sigma_a$ )

Härte: Ist Widerstand gegen eindringenden Körper

Viskosität

Auch bei Flüssigkeiten und Gasen Deformation der mechanischen Spannungen „innere Reibung“ zu überwinden

Viskosität = Zähigkeit (Zusammenhang zwischen Spannung und Formänderung)



Geschwindigkeitsgefälle wird ausgeübt ( $du/dy$ )

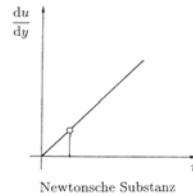
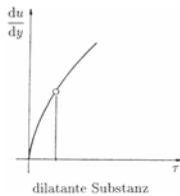
Dynamische Viskosität:  $\eta$  = Proportionalitätsfaktor zwischen  $\tau$  und  $(du/dy)$

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} = \frac{F}{A}$$

Temperatur und Druckabhängig, gilt für Newtonsche Substanzen

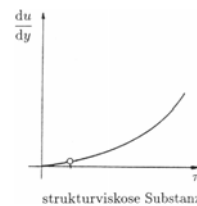
Dilatante Substanzen:

$$\tau^n = k_1 \cdot \frac{du}{dy}, \quad n < 1, \text{ großes } (du/dy)$$



Strukturviskose Substanzen:

$$\tau^n = k_1 \cdot \frac{du}{dy}, \quad n > 1, \text{ kleines } (du/dy)$$

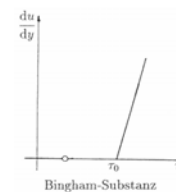


Bingham Substanzen: Verformung erst ab  $\tau_0$

$$\tau - \tau_0 = k_2 \cdot \frac{du}{dy}$$

$$(\tau - \tau_0)^m = k_3 \cdot \frac{du}{dy}$$

$$\eta(T) = a \cdot \exp(b/T) \quad \dots \text{ bei steigender T nimmt Viskosität ab}$$



Viskosität nimmt mit steigendem Druck zu:

$$\eta(p) = \eta(\eta_0) \cdot \exp(d(p - p_0)) \quad d \dots \text{ Konstante}$$



$p_0$  ... Atmosphärendruck

Gase:  $\eta(T) \sim \frac{\sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}}$       C ... Konstante, T ... Temperatur (K)

Einheit: 1 Poise =  $\frac{1}{P} = \frac{1 \text{ Ns}}{10 \text{ m}^2}$



## Kapitel 10 : Thermische Werkstoffeigenschaften

Materie absorbiert Wärme, dehnt sich bei Wärme aus und leitet Wärme

### Wärmekapazität

$$\Delta Q \rightarrow \Delta T$$

$$(J) \quad (K)$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \dots \text{Wärmekapazität (J/K)}$$

Materialabhängig, abhängig von Masse oder Stoffmenge.

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \dots \text{spezifische Wärmekapazität}$$

$$C_m = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \dots \text{molare Wärmekapazität}$$

$$M = \frac{m}{n} \quad \left( \frac{kg}{mol} \right) \text{ molare Masse}$$

$$\rightarrow C_m = M \cdot c$$

$C_m$  konstant,  $c$  nimmt mit steigender relativer Atommasse ab (Dulong - Petit)

Gase: unterscheidet  $c$  bei konstanten Druck und Volumen ( $c_p, c_v$ )

$$C_m : \text{für einatomige Gase} \approx 13 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\text{zweiatomige Gase} \approx 21 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\text{feste Körper} \approx 25 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Befindet sich Molekülkollektiv im Gleichgewicht  $\rightarrow$  Energieaustausch zwischen den einzelnen Freiheitsgraden (z.B. Stoßprozesse)

Jeder Freiheitsgrad der kinetischen Energie nimmt  $\frac{1}{2} k T$  auf.  
(= Gleichverteilungssatz). Für Gase, Flüssigkeiten und Festkörper

Einatomige Gase haben 3 Freiheitsgrade der Translation und 3 Freiheitsgrade der Rotation

Rotations- und Vibrationsbewegungen quantisiert

Energie zur Rotation umgekehrt proportional zum Trägheitsmoment

Einatomiges Molekül zu großes Trägheitsmoment  $\rightarrow$  keine Rotation  $\rightarrow$  3 Freiheitsgrade der Translation  $\rightarrow 3 \cdot \frac{1}{2} k T$  (bzw.  $L \cdot \frac{3}{2} k T$  pro Mol,  $L \dots$  Loschmidtsche Zahl)



$$C_{mv(\text{eiatomig})} = \frac{1}{n} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = L \cdot \frac{3}{2} \cdot k \approx 12,5 \frac{J}{mol \cdot K}$$

zweiatomig: 3 Freiheitsgrade der Translation, 3 Freiheitsgrade der Rotation  
→ es stehen 3 Freiheitsgrade der Translation und 2 Freiheitsgrade der Rotation zur Verfügung →  $5 \frac{1}{2} k T \Rightarrow L \cdot 5/2 k$   
T

$$C_{mv(\text{zweiatomig})} = \frac{1}{n} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = L \cdot \frac{5}{2} \cdot k \approx 20,8 \frac{J}{mol \cdot K}$$

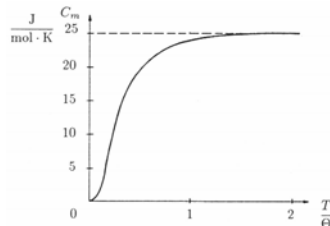


dreiatomig:  $5 \cdot (\frac{1}{2}) k T$  oder  $6 \cdot (\frac{1}{2}) k T$ , ( je nachdem ob Molekülgestalt gewinkelt oder gestreckt)

feste Körper:  $E_{kin} = 3 \cdot (\frac{1}{2}) k T$ , schwingen um Gitterplatz  
weil Atome an Gitterplatz gebunden →  $E_{pot} = E_{kin}$   
→  $E_{ges} = 2 \cdot 3 \cdot (\frac{1}{2}) k T = L \cdot 3 k T$

$$C_{mv(\text{Festkörper})} = \frac{1}{n} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = L \cdot 3 \cdot k \approx 24,9 \frac{J}{mol \cdot K}$$

bei tiefen Temperaturen können manche Freiheitsgrade am Energieaustausch nicht mehr teil haben (bei 0 K ist  $C_m = 0$ )  
→ Debye'sche Theorie, Debye- Temperatur



### Thermische Ausdehnung

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T, \quad \alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad \text{ist Temperaturabhängig}$$

→ Bezugstemperatur →  $l = l_0 + \Delta l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$

gasförmig: Druck ist konstant zu halten

Kristalle: thermische Ausdehnung anisotrop (richtungsabhängig)

$$\text{Homogene Körper: } \Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \dots \text{ Raumausdehnungskoeffizient}$$

$$\rightarrow V = V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta T) \quad \Rightarrow \quad \beta \approx 3\alpha$$



thermische Expansion beruht auf Vibration der Atome in den Gitterplätzen. Schwingungen nicht symmetrisch, weil der Verlauf von  $E_{\text{pot,ges}}$  in Abhängigkeit vom Atomabstand unsymmetrisch ist.

Aufsummieren der Atomvergrößerung → thermische Ausdehnung ist eine Werkstoffstruktur abhängige Größe

## Wärmeleitfähigkeit

Wärmeströme treten auf, wenn das thermische Gleichgewicht gestört ist.

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad}T \cdot dt \cdot A \quad (\text{minus, Wärmemenge fließt in Richtung abnehmender Temperatur})$$

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad d\phi \dots \text{differentielle Wärmestrom}$$

$$d\phi = -\lambda \cdot \text{grad}T \cdot dA$$

$$\phi = -\lambda \int \text{grad}T \cdot dA$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Messung von  $\lambda$ : -stationär: konstante Wärmestrom durchfließt Probe → Temperatur-Gefälle →  $\lambda$

-instationär: impulsförmige oder periodische Störung → Laufzeit

→  $\lambda$

Wärmeleitfähigkeit ist stark Temperaturabhängig

Bei Gasen hängt Molekülgeschwindigkeit (→  $E_{\text{kin}}$ ) von der Temperatur ab. Zusammenstoß zwischen schnellen und langsamen Molekülen → Wärme wird übertragen → Wärme transportiert

Bei elektrisch nichtleitenden Festkörpern wird Energie (Wärme) über quantisierte Gitterschwingungen (Phononen) transportiert. Bei gestörter Periodizität des Gitters (Temperaturbewegung, Fremdatome, Gitterbaufehler, Kristallgrenzen zufolge endlicher Werkstoffgröße) Reduktion von  $\lambda$

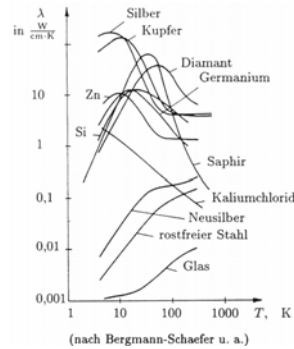
Bei Metallen kommt noch der Wärmetransport über Elektronen dazu. Wegen Diffusion wird Wärme über große Abstände transportiert (e frei Beweglich). Können Energie wieder an Gitter abgeben.

Durch Wechselwirkung mit Gitter tragen Elektronen in Kristallbereichen mit höherer Temperatur auch höhere Energie.

$$\frac{\lambda}{\sigma \cdot T} = 2,44 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2} \quad \dots \text{konstante Größe für Metalle}$$



= Wiedermann-Franz-Lorenzsche Gesetz



## Thermisch aktivierte

## Vorgänge

Atome können der Zufuhr von Energie in energetisch günstigeren Zustand gehoben werden.

### Diffusion

Teilchen werden zufolge eines Konzentrationsgefälles zu Platzwechseln angeregt → makroskopische Massentransport.

Kann in allen 3 Aggregatzuständen vorkommen

1. Ficksche Gesetz:  $\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = -D \frac{\partial c}{\partial x}$       D ... Werkstoffabhängige

Differentialkoeffizient

2. Ficksche Gesetz:  $\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)$

sofern D konzentrationsunabhängige Größe:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

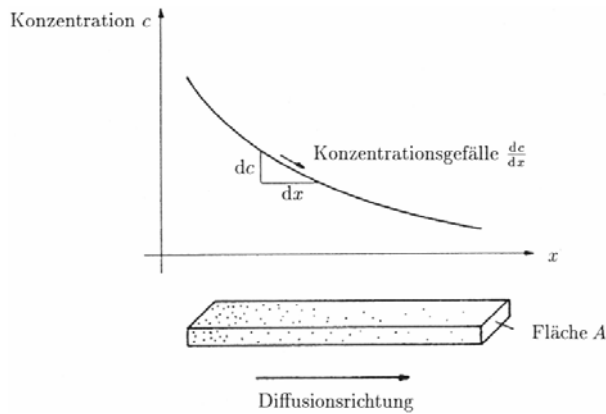
$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad Q \dots \text{Aktivierungsenergie}$$

R ... Gaskonstante

Ein Beispiel ist Ausbildung von Reaktions-, Oxid- oder Zunderschicht.

Oxid: O<sub>2</sub> muss durch bestehende Oxidschicht diffundieren, um Oxidationsprozess aufrecht zu erhalten.

Oder Grenzflächen 2er Werkstoffe: Ausgleichsbemühung des unterschiedlichen Konzentrationsprunges oder Fremdstoffdiffusion



### Erholung und Rekristallisation

Ausheilung von Gitterdefekten, Abbau von Verzerrungen, Kornneubildung

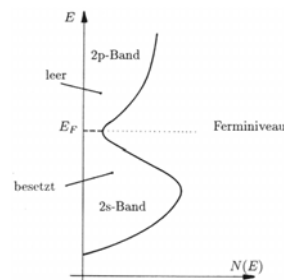
## Kapitel 12 : Elektrische Eigenschaften der Metalle

### Bandstruktur

Beim absoluten Nullpunkt (0 K) grenzen im Valenzband an die von Elektronen besetzten Energieniveaus noch leere und damit besetzbare Energieniveaus.

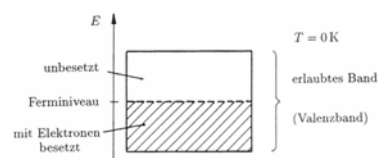
Ferminiveau liegt im erlaubten Energieband.  
→ minimale Anregungsenergie

Fügt man Atome zu festen Körpern zusammen, spalten sich Energieniveaus in Bänder auf.  
→ s und p Bänder überlappen



Übergangsmetalle nicht so gut leitend wie Metalle

Hervorragend leitend sind Cu, Ag, Au (starke Überlappung der Bänder weil nur ein einziges s – Elektron)



→ erlaubtes Band nicht vollständig besetzt (Valenzband)

### Elektrische Leitfähigkeit

Jedes Elektron hat eine bestimmte kinetische Energie zugeordnet (Geschwindigkeit), Richtung beliebig verteilt  
Elektrisches Feld → pauschale Driftbewegung



Gitterbaufehler und Atomvibrationen führen zu Reflexion → stationärer Elektronenstrom

$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

$$\mu_n = \frac{e}{m_n^*} \cdot \tau_n \quad \mu_n \dots \text{Beweglichkeit, } \tau_n \dots \text{Kollisionszeit}$$

$$i = -en v_n = \frac{ne^2 \tau_n}{m_n^*} \cdot E$$

$$\sigma = \frac{ne^2 \tau_n}{m_n^*} \quad \dots \text{elektrische Leitfähigkeit}$$

Leitfähigkeit richtungsabhängig weil  $m^*$

Bei Kristallen mit hoher Symmetrie isotropes Verhalten, spezifischer Widerstand richtungsabhängig

Veränderung der Leitfähigkeit: Streuung an Gitterbaufehlern und Streuung an temperaturbedingten Gittervibrationen

$$\rho = \rho_G + \rho_T \quad \dots \text{Matthiessensche Regel}$$

- Widerstandserhöhung durch Einbau unregelmäßiger Störstellen
- Widerstandsverringerung durch Überführung in geordneten

Kristallstrukturen

- Widerstandserhöhung durch Einbau von geometrischen Gitterfehlstellen
- Erniedrigung durch Ausheilen von geometrischen Gitterfehlstellen mit Hilfe eines Glühprozesses
- Erhöhung der Vergrößerung der thermischen Vibration zufolge Temperaturerhöhung

### Elektronenemission

Elektronen verlassen Festkörper (durch hohe Temperatur, hohe elektrische Felder)  
= thermische Emission bzw. Feldemission

auch Photonenemission (durch Photonen ausgelöst) oder durch Beschuss (Sekundäremission)

wenn Elektronen ein paar hundert Gitterkonstanten entfernt sind → freies Elektron

Ist stark Werkstoffabhängig, nicht nur bei Metallen

Austrittsarbeit: ist Energie die benötigt wird, damit Elektron bei 0 K den Festkörper verlassen kann. (= energetischer Abstand vom Fermi – zum Vakuumniveau)

$$E_A = V_B - E_F$$
$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 (2x)^2} \quad , \quad V(x) = \int_x^\infty F(y) dy = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x}$$

Potentialbarriere werkstoffabhängig, weil Atomabstände in Rechnung eingehen.

Bei thermischer Emission:

$$i = A_0 T^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) \quad (\text{Richardson-Dushman-Gleichung})$$

Messung durch Absaugen der Elektronen

Austrittsarbeit kann durch elektrische Felder verringert werden  
( $10^5 - 8 \text{ V/m}$ )

→ Glühemission verstärkt

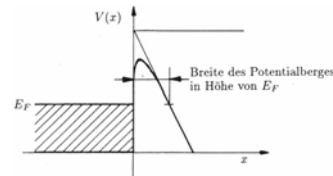
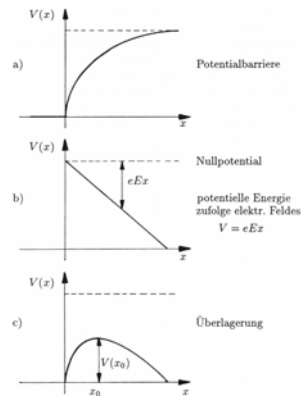
= Schottky-Effekt: beruht auf Überlagerung des Verlaufs der Potentialbarriere mit dem Verlauf der potentiellen Energie, die auf elektrische Feld zurückgeht

→ Absenkung der Potentialbarriere

Felder von  $10^9 \text{ V/m}$  : Feldemission: Höhe der Potentialbarriere vergrößert, aber Breite verkleinert

→ Elektron (auf Höhe des Fermi-niveaus) können durchtunneln

→ große Stromdichte  
ist nicht temperaturabhängig



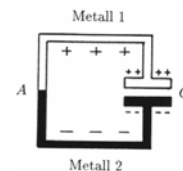
## Kontakte

2 Metalle: verschiedene  $E_A$ , Zusammenführung → Oberflächen-Potentialbarriere verschwindet. Einige Elektronen nehmen Energiewerte des anderen Metalls an, die unbesetzt sind → Elektronen fließen ab → Potentialdifferenz, die die Töpfe verschiebt → weiteres Abfließen der Elektronen wird verhindert.

$$E_C = E_{A1} - E_{A2} = e \cdot U_{1,2} \quad (\text{einige zehntel Volt})$$

= Ausgleich des Fermi - Niveaus

An der Kontaktstelle entsteht Dipolschicht aus Flächenladung → Kontaktspannung



Messung durch Kelvin Methode

Voltasche Spannungsreihe: Metalle werden aufgrund ihrer Kontaktspannung geordnet.

Zuerst angeführte Element positiv gegenüber Nachfolgenden

+ Zn, Pb, Sn, Fe, Cu, Ag, Pt -

Kontaktspannung zweier beliebiger Metalle gleich der Summe der dazwischenliegenden Kontaktspannung

Gesetz der Voltaschen Spannungsreihen folgen → Leiter 1. Art

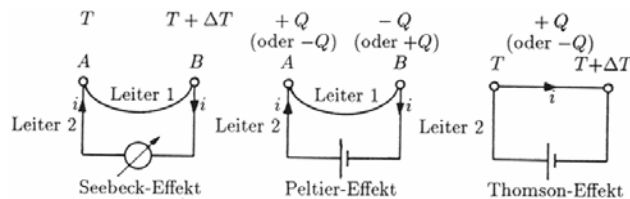
Leiter 2. Art : Erfüllen Gesetz nicht,  $\Sigma$  Kontaktspannungen  $\neq 0$  → Elektrizität nicht im Gleichgewicht → Strom

z.B. : Salzlösungen, Säuren

Weil Elektronen und Löcher sowohl Träger elektrischer Ladungen, als auch Träger kinetischer Energie sind → thermoelektrischer Effekt

1. Seebeck Effekt: Kontakt zweier Leiter, unterschiedliche Temperatur → Strom + Spannung
2. Peltier Effekt: Wird Stromfluss erzwungen → Erwärmung bzw. Abkühlung der Kontaktstellen  
ist linear proportional zum Strom → Peltierkoeffizient ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  V)
3. Thomson Effekt: Es tritt Erwärmung oder Abkühlung in homogenen Leiter auf, wenn Stromfluss und Temperaturgefälle aufrechterhalten werden  
optional zu  $\Delta T \cdot i$  ... Thomson-Koeffizient

2. und 3. überlagern sich mit Joulscher Wärme ( $P=i^2 \cdot R$ )



Ursachen:

1. Seebeck: -Kontaktspannung Temperaturabhängig → Spannungsreihe nicht anwendbar  
-Ladungsträger diffundieren über Kontaktflächen (2.Hauptsatz der Wärmelehre) vom heißen zum kalten Ende  
ohne Aufrechterhaltung der Temperatur würden sich die Temperatur ausgleichen
2. Peltier: Ladungsträger weisen ungleiche mittlere Energie auf (verschiedene Werkstoffe)  
Ladungsträger, die Berührungsfläche durchsetzen, müssen Energie an Gitter ab- bzw. aufnehmen
3. Thomson: heiße Ladungsträger, höhere Energie → Transport durch Strom → müssen Energie an Gitter abgeben

Schottky -Kontakte

Kontaktstelle → Abfließen der Ladungsträger → Spannung bis Fermi-niveaus auf gleicher Höhe

Legt man von außen Spannung an → man kann Höhe der halbleiterseitigen Potentialbarriere verringern

Metallische – Potentialbarriere unverändert

Es bestimmen nur Majoritäten Stromtransport (kann bei hohen Frequenzen eingesetzt werden ( etwa 10 GHz))



Wenn  $E_{AM}$  kleiner ist als  $E_{AH}$  → ohmscher Kontakt, keine Potentialbarriere,  
Elektronen von Metall in Halbleiter

## Supraleitung

Sinkende Temperatur → Widerstand kleiner, kleiner werdende Atomschwingungen  
→ weniger Behinderung von Elektronen – Ausbreitung

Supraleitung: Temperatur verringert → Widerstand kleiner, ab kritischer Temperatur  $T_c$  sprunghafte Verkleinerung

Erweist sich auch magnetfeldabhängig; sobald Magnetfeld kritischen Feldwert  $H_c$  übersteigt, verschwindet Supraleitung

$$H_c = H_0 \cdot \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right)$$

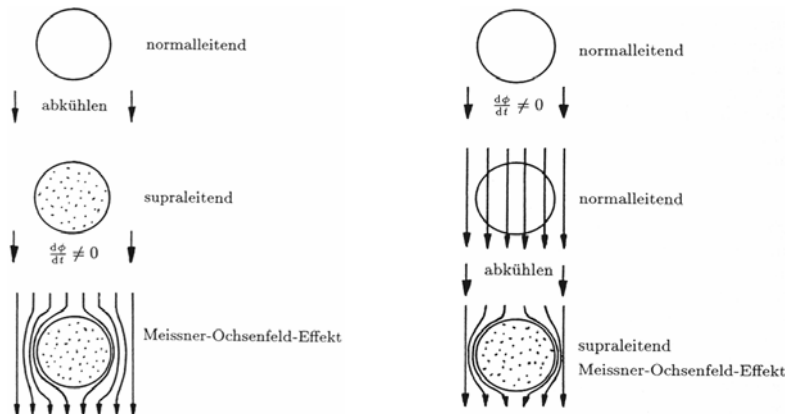
nicht nur chemische Elemente, sondern auch mehrere tausend Verbindungen und Legierungen (NbZr, NbTi,...)

2.Merkmal:

Magnetfelder werden aus Supraleiter herausgedrängt = Meissner-Ochsenfeld-Effekt

→ Flussverdrängung, Wirbelströme, die aber nicht abklingen

aber: bei konstantem Magnetfeld und sinkender Temperatur (→Supraleitung) auch Wirbelströme



Ströme werden an der Oberfläche verdrängt ( $10^{-8}m$ )

Wenn magnetisches Feld vollständig aus dem Inneren verdrängt: Supraleiter 1. Art

Gibt auch Fälle, wo magnetischer Fluss eindringt, über sogenannte Flussschläuche

→ Mischzustand: normalleitende Bereiche werden in supraleitende eingebettet

→ kann auch bei höheren Feldern bestehen

→ Supraleiter 2.Art (instabil, Lorentz-Kraft)



Durch Einbau von Störstellen kann man Flussschläuche in der Lage fixieren → 3.Art.

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -e \cdot \vec{E} \quad ; \quad \vec{i} = -en\vec{v}$$

$$\Rightarrow \Lambda \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{E} \quad ; \quad \Lambda = \frac{m}{ne^2}$$

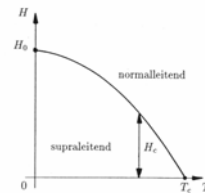
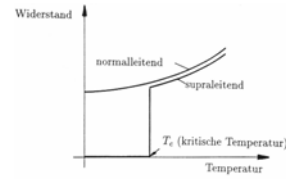
$$\Rightarrow \Lambda \cdot \text{rot} \frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\Lambda \cdot \frac{d\vec{i}_s}{dt} = \vec{E} \quad \dots \text{1. Londonsche}$$

Gleichung

$$\Lambda \cdot \text{rot} \vec{i}_s = -\vec{B} \quad \dots \text{2. Londonsche}$$

Gleichung



1. besagt, dass  $i_s$  auch ohne elektrische Feldstärke stationär fließen kann.
2. beschreibt Meissner – Ochsensfeld Effekt

BCS – Theorie (Bardeen, Cooper, Schrieffer)

= quantenmechanische Beschreibung der Supraleitung

Grundidee: bei genügend tiefer Temperatur vermitteln Phononen Anziehungskraft zwischen Elektronen zu Paaren, Cooper Paare  
Gesamtimpuls und Spin = 0  
Alle Cooper-Paare nehmen einen einzigen quantenmechanischen

Zustand ein

→ können nicht Wechselwirken → kein Energieaustausch → kein

Widerstand

Sobald Energie größer ist als die Bindungsenergie, werden die Cooper-Paare aufgebrochen → Widerstand

Anwendung: supraleitende Magnete (Schwebemaschinen, ... )

## Kapitel 13 : Elektrische Eigenschaften der Isolatoren

Keine freie Elektronen, sehr eng gebunden

Bandstruktur ähnlich wie bei Halbleitern, aber die Breite der verbotenen Zone viel größer

In jedem  $\text{m}^3$   $10^6$  freies Elektron (Si  $10^{16}$ , Metall  $10^{23}$ )

Elektrisches Feld : Ladungen im Atom verschieben sich  $\rightarrow$  atomarer Dipol  $\rightarrow$  Polarisation

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} ; \quad \epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

$$\chi = (\epsilon_r - 1) \quad \dots \text{Suszeptibilität}$$

isotrop:  $\vec{E}, \vec{D}, \vec{P}$  (Polarisationsvektor) parallel

$$\text{Dipol: } \vec{p} = |Q| \cdot \vec{d}$$

Summe der Dipolmomente ergibt die Polarisation

$$\rightarrow \vec{P} = N \cdot \vec{p} ; \quad \vec{p} = \alpha \cdot \vec{E} \quad \alpha \dots \text{Polarisierbarkeit}$$

### Polarisationsmechanismen

Elektrisches Feld  $\rightarrow$  Polarisation

#### 1. Elektronenpolarisation

negative Elektronenhülle verschiebt sich gegen Kern



#### 2. Ionenpolarisation

Bindungen zwischen Ionen werden durch Elektrisches Feld deformiert.

$\rightarrow$  Ladungsschwerpunkt auseinandergerückt  $\rightarrow$  Dipol

kann auch Moleküle betreffen ( $f_g$  tiefer wegen großer Masse)



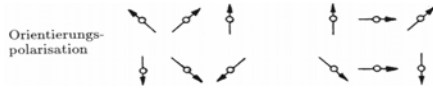
#### 3. Orientierungspolarisation

Moleküle tragen permanenten Dipol, frei Drehbar

Durch elektrisches Feld  $\rightarrow$  Moleküle in Feldrichtung hineingedreht



(f<sub>g</sub> Mikrowellen)



Elektronenpolarisation

$$\rho = \frac{-Z \cdot e}{(4/3) \cdot \pi R^3} \quad \dots \text{ Ladungsdichte ; } Z \dots \text{ Ordnungszahl}$$

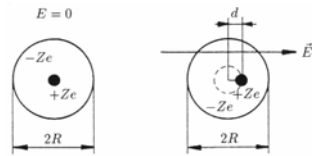
elektrisches Feld:  $|F_1| = Ze \cdot E$

→ rücktreibende Kraft  $F_2 = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \cdot d$

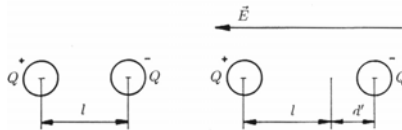
F<sub>1</sub> und F<sub>2</sub> Gleichgewicht →  $d = \frac{4\pi\epsilon_0 R^3}{Ze} \cdot E$       d ... Gleichgewichtsabstand

$$p_{EP} = Ze \cdot d = 4\pi\epsilon_0 R^3 \cdot E \quad \text{(Dipolmoment)}$$

$$P_{EP} = N \cdot p_{EP} = N \cdot 4\pi\epsilon_0 R^3 \cdot E \quad \text{(Polarisation)}$$



Ionenpolarisation



Elektrisches Feld :  $d = l + d'$   
 $p' = Q(l + d')$

Unter Dipolmoment zufolge Ionenpolarisation versteht man den Zuwachs um  $Q \cdot d'$

Rückstellkraft proportional zu d'  
→  $k_{IP} \cdot d' = QE$

$$p_{IP} = \frac{Q^2}{k_{IP}} \cdot E \quad \text{(Dipolmoment)}$$

$$P_{IP} = N \cdot p_{IP} = N \cdot \frac{Q^2}{k_{IP}} \cdot E \quad \text{(Polarisation)}$$

Orientierungspolarisation

Permanente Dipole vorhanden die orientierbar sind

z.B.: Moleküle asymmetrischer Bauart, Ladungsschwerpunkte fallen nicht zusammen

Elektrische Felder wollen Dipole ausrichten (Gegensatz zu thermischen Energien)

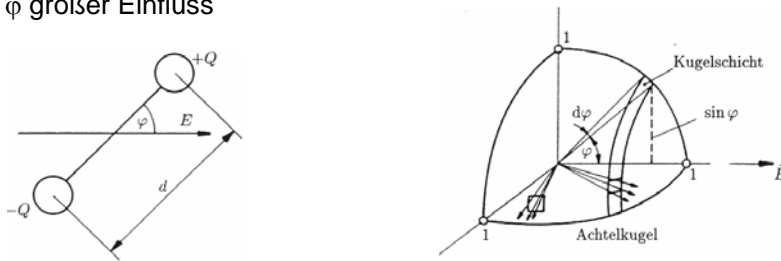
$$\vec{T} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (\text{Drehmoment})$$

$$\rightarrow W = -p \cdot E \cdot \cos \varphi = -|Q| \cdot d \cdot E \cdot \cos \varphi \quad (\text{potentielle Energie})$$

→ Konkurrenz zwischen potentieller Energie  $W$  und thermischer Energie  $kT$

$$\exp\left(-\frac{W}{kT}\right) = \exp\left(+\frac{pE}{kT} \cdot \cos \varphi\right)$$

ist Feldenergie wesentlich größer gegenüber thermischer Energie →  $pE/kT$  groß →  $\cos \varphi$  großer Einfluss



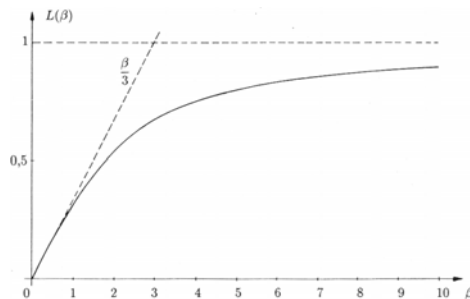
$$P_{OP} = c \cdot \int_0^\pi 2\pi p \cdot \sin \varphi \cos \varphi \cdot \exp\left(\frac{pE}{kT} \cdot \cos \varphi\right) d\varphi$$

(Orientierungspolarisation)

$$P_{OP} = Np \cdot L(\beta) \quad L(\beta) \dots \text{Langevin Funktion}$$

große Feldstärke  $E$  und kleine Temperatur  $T$  →  $L(\beta) \approx 1$  (alle Dipole in Feldrichtung)

→  $\beta$  groß



Für nicht allzu hohe Felder und nicht allzu tiefe Temperaturen

$$P_{OP} = Np \cdot \frac{\beta}{3} = N \frac{p^2}{3kT} \cdot E \quad (\text{Langevin - Debye - Gleichung})$$

Gesamtpolarisation

$$\vec{P} = \vec{P}_{EP} + \vec{P}_{IP} + \vec{P}_{OP} = N \left( 4\pi\epsilon_0 R^3 + \frac{Q^2}{k_{IP}} + \frac{p^2}{3kT} \right) \cdot \vec{E}$$

## Die lokale Feldstärke

Die lokale Feldstärke ist jenes elektrische Feld, welches am Ort irgendeines Atoms wirkt und dieses z.B. polarisiert

Ist Summe aus außen angelegtem Feld und Feld der Dipole

Setzt sich aus 4 Teilen zusammen:

$\vec{E}_1$  ... äußere elektrische Feld (z.B. Ladungen auf Kondensatorplatten)

$\vec{E}_2$  ... Polarisationsladungen, äußere Oberfläche

$\vec{E}_2$  entgegengesetzt zu  $\vec{E}_1$

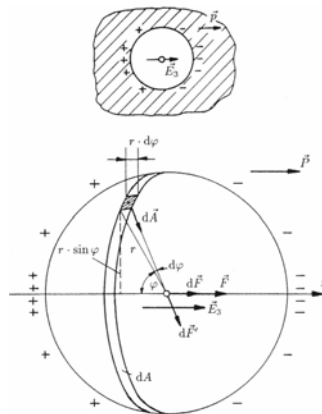
$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  ... makroskopische elektrische Feldstärke

→ Lorentz: Dielektrikum spalten durch Herausschneiden einer Kugel um den fraglichen Aufpunkt

$\vec{E}_3$  ... Polarisationsladungen auf der Innenseite und zwar im Zentrum des Hohlraumes (Oberflächenladungen)

$\vec{E}_4$  ... Feld der Atome die innerhalb der Kugel liegen (Gitterstruktur beachten)

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 = \vec{E} + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$$



Berechnung durch  $\vec{E}_3$ :

Oberflächenladung:  $dQ' = \vec{P} \cdot d\vec{A}' = P \cdot \cos \varphi \cdot dA'$

→ Zusammenfassen von  $dA'$  zu  $dA$

$$dA = 2r\pi \sin \varphi \cdot r d\varphi$$

$$F = \frac{QP}{2\epsilon_0} \int_0^\pi \cos^2 \varphi \cdot \sin \varphi d\varphi = \frac{QP}{3\epsilon_0}$$



$$\rightarrow \vec{E}_3 = \frac{\vec{F}}{Q} = \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0} \quad \dots \text{Lorentzfeld}$$

Berechnung von  $\vec{E}_4$ :

Kristallstruktur berücksichtigen (einfach kubisches Gitter)

$$\left. \begin{aligned} E_{D_1} &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qds}{r^3} \\ E_{D_{21}} &= +\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Qds}{r^3} \end{aligned} \right\} \quad \text{x-orientiert} \rightarrow 4D_1 \text{ und } 2D_2$$

$4E_{D_1} + 2E_{D_2} = 0 \rightarrow \vec{E}_4 = 0$  (für einfach kubisches, kubisch Flächenzentriert und kubisch Raumzentriert)

$$\rightarrow \vec{E}_{loc} = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0}$$

### Polarisierbarkeit und Dielektrizitätszahl

$$\vec{P} = N \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{loc} \quad \dots \text{Polarisierbarkeit}$$

$$\alpha_{EP} = 4\pi\epsilon_0 R^3 \quad \dots \text{Elektronenpolarisation}$$

$$\alpha_{IP} = \frac{Q^2}{k_{IP}} \quad \dots \text{Ionenpolarisation}$$

$$\alpha_{OP} = \frac{p^2}{3kT} \quad \dots \text{Orientierungspolarisation}$$

$$P = N\alpha \cdot \frac{E}{1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}} \quad \dots \text{Polarisation}$$

$$\frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \quad \dots \text{Clausius-Mosotti Gleichung}$$

man kann durch Messung von  $\epsilon_r$  Polarisierbarkeit errechnen

### Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl

Abhängig von Polarisierbarkeit und von der Molekülzahl je Volumen N, beide Temperaturabhängig

$\alpha_{EP}, \alpha_{IP} \dots$  Temperaturabhängig

$P_{OP} \dots 1/T$

$$\epsilon_r(\vartheta) = \epsilon_r(1 + \alpha_e(\vartheta - \vartheta_1))$$



$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{d\vartheta}$$

## Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl, Verluste

Polarisation der Masseverschiebungen → Isolierstoffe frequenzabhängig

### Dipolrelaxion

Permanente Dipole vorhanden

E-Feld: Dipole nehmen erst nach einer Zeit t ihre Ausrichtung an →  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$  und  $\vec{P}$  nicht Phasengleich

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E + \varepsilon_s \tau_1 \frac{dE}{dt} \quad \dots \text{Beschreibung der Dipolrelaxion}$$

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E + \tau \varepsilon_\infty \frac{dE}{dt}$$

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon_{real} - j\varepsilon_{imag} \quad \dots \text{komplexe Dielektrizitätszahl}$$

Wechselfeld :  $\underline{D} = \underline{\varepsilon} \cdot \underline{E}$

tiefe f :  $\varepsilon_{real} = \varepsilon_s$

hohe f :  $\varepsilon_{real} = \varepsilon_\infty$

$$P = i \cdot E = \omega |\varepsilon_{imag}| \cdot E^2 \quad \text{Wärmeenergie}$$

$$\text{Verlustfaktor: } \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\varepsilon_{imag}}{\varepsilon_{real}}$$

$$P = \omega \cdot \varepsilon_{real} \cdot \tan \delta \cdot E^2$$

$$\varepsilon_{real} \cdot \tan \delta \quad \dots \text{Verlustziffer}$$

### Resonanzabsorption

Ionen- und Elektronenpolarisation

beruht auf Rückstellkraft → Schwingungsfähiges System

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k' \cdot x = 0 \quad \dots \text{Bewegungsgleichung}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k'}{m}} \quad \dots \text{Resonanzfrequenz}$$

auch Dämpfung durch Kollisionen und Wärmeabstrahlung  
→  $\varepsilon$  besteht aus realen und imaginären Teil



Frequenzabhängig :  $\omega_0$  : Polarisationsmechanismus fällt aus und  $\epsilon_{\text{real}}$  sinkt auf tieferen Wert ab  
 $\epsilon_{\text{imag}}$  Maximum

mehrere Polarisationsmechanismen → Überlagerung der Frequenzgänge

### Ionenleitfähigkeit im Dielektrikum

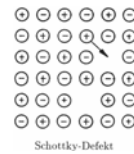
Verbotenes Band so breit, dass bei Raumtemperatur keine Elektronen in der Lage sind, Zone zu überwinden

→ Valenzband vollgefüllt, Leitungsband leer (keine Elektronenleitung)

bei Ionenbindung ähnlich, doch geringe Leitfähigkeit feststellbar

→ Stromtransport auf Wirkung von Fehlstellen zurückzuführen (Schottky- und Frenkeldefekt)

Schottky: Ion verlässt Platz und wird an Oberfläche wieder eingebaut → Wiederholter Platzwechsel = Leerstellen-Diffusion



Frenkel: Ion verlässt Platz und wird in Zwischengitterplatz eingebaut (→ Wanderung)



→ Energieaufwand zum generieren und aufrechterhalten

→ Aktivierungsenergie  $\varphi$

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right)$$

Ionenleitfähigkeit :  $\sigma = e \cdot N \cdot \mu$  ,  $\mu = \frac{eD}{kT}$

$$\rightarrow \sigma = \frac{e^2 N}{kT} \cdot D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right)$$

hohe Temperatur:  $\varphi$  kleiner,  $\sigma$  größer

Ursache: bei tiefen Temperaturen treibt  $\varphi$  den Diffusionsprozess, bei hohen Temperaturen werden auch neue Fehlstellen generiert.

### Elektrischer Durchschlag

Steigert man die elektrische Feldstärke → Dielektrikum verliert Isoliervermögen. Ist von Isolierdicke abhängig, Temperaturabhängig, wird durch Alterungsvorgänge und Verunreinigungen, Einschlüsse und Feuchtigkeit reduziert

1) Der thermische Durchschlag:

Erwärmung (durch Ionenleitung, Dipolrelaxion,...)

→ Überhitzung → Ionenbewegung nimmt stark zu



→ Durchschlag

2) Der elektrolytische Durchschlag:

Elektroden können durch Stromleitpfade überbrückt werden, Baumartige Anlagerung von Metallionen  
Vermutlich Störstellen Ursache (höhere Diffusionsgeschwindigkeit)

3) Lawinendurchbruch:

Im Dielektrikum können durch Fremdatome oder thermische Anregung freie Elektronen existieren → beschleunigt durch elektrisches Feld. Wenn es Elektronen gelingt, so große kinetische Energie zu haben, dass es Elektron-Loch-Paar generiert → Lawinendurchbruch

4) Gasentladungsdurchschlag:

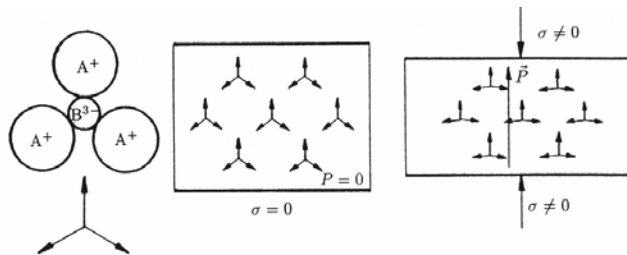
wenn Gasblasen oder Gaszwischen-schichten auftreten  
→ es kommt im Gaseinschluss zu Gasentladungen  
→ Isolierstoff wird von „innen“ mit Elektronen und Ionen bombardiert → Elektronen-Loch-Paare

### Piezoelektrizität, Elektrostriktion und Pyroelektrizität

#### Piezoelektrizität

Durch Einwirkung von mechanischer Spannung elektrischer Polarisation im Kristall und umgekehrt

An Kristalle mit fehlendem Symmetriezentrum gebunden



Durch Deformation fallen Ladungsschwerpunkte nicht mehr zusammen → Polarisation  $\vec{P}$

Durch elektrisches Feld drehen sich Dipolmomente in Feldrichtung → mechanische Deformation

$$P = k_p \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{für kleine Felder und Deformationen})$$

eingesetzt für elektromagnetische Wandler (Mikro, Tonabnehmer) auch Schwingquarz

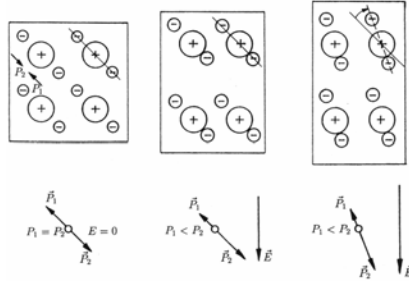
#### Elektrostriktion

Bei allen Stoffen wirksam

Elektrisches Feld  $\rightarrow$  Längenänderung :  $\frac{\Delta l}{l} = k_E \cdot E^2$

Keine inverse Elektrostriktion

Ursache: positive und negative Ladungen erfahren kleine Verschiebung  
 $\rightarrow$  Dipolmoment  $\rightarrow$  Wechselwirkung mit elektrischen Feld  $\rightarrow$  Verzerrung



### Pyroelektrizität

Ist gleich elektrische Aufladung bestimmter Kristallflächen bzw. Temperaturerhöhung  
Kristalle bauen sich aus geordneten polaren Atomgruppen auf  $\rightarrow$  Überlagerung der Wirkung

Polarisationsladungen an Grenzflächen werden aber mit der Zeit durch Ionenhaut kompensiert

### Ferroelektrizität

$\rightarrow$  Selbstpolarisation: gegenseitige Wechselwirkung der Dipole  
 $\rightarrow$  richten sich zueinander parallel  $\rightarrow$  Polarisation

ein Kristall ist Ferroelektrisch, wenn er zwei energetisch bevorzugte und gleichwertige Strukturen besitzt, die sich hinsichtlich der Dipolorientierung unterscheiden

$\rightarrow$  Entstehung von Bezirken und Domänen  
 $\rightarrow$  Sättigungswert

starke Temperaturabhängigkeit, gibt obere Grenztemperatur

## Kapitel 14 : Magnetische Werkstoffeigenschaften

### Das magnetische Verhalten der Materie

Makroskopisch magnetisches Verhalten:  $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$  ,  $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{I}$

$\vec{I}$  ... magnetische Polarisation =  $\mu_0(\mu_r - 1)\vec{H}$

$\kappa = (\mu_r - 1)$  ... Suszeptibilität

$\kappa \cdot \vec{H} = \vec{M}$  ... Magnetisierung

$\rightarrow \vec{I} = \mu_0 \cdot \vec{M}$  ... magnetische Polarisation

isotrop:  $\vec{B}, \vec{H}, \vec{I}, \vec{M}$  parallel

Atommagnetismus: Ursprung Bewegung der Elektronen um Atomkern und um eigene Achse

$m = I \cdot A$  ... magnetische Bahnmoment

magnetisches Moment des Spins: anormales Verhalten (Stern-Gerlach)

$s_{QZ} = \pm \frac{1}{2} \rightarrow m_{z,spin} = \mu_B$

- Aufgefüllte Schalen haben kein magnetisches Moment
- Spinmomente maximieren ihre Beträge unter Beachtung des Pauli-Prinzips

ad a) Bahndrehimpulse mitteln sich gegenseitig weg

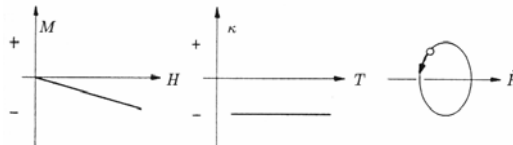
ad b)  $\rightarrow$  Hund'sche Regel

Diamagnetismus (Edelgase, Salze, organische Verbindungen)

Schwacher Magnetismus, Magnetisierung entgegengesetzt zum angelegten Feld

$\kappa = -(10^{-5} \text{ bis } 10^{-6})$  , temperaturunabhängig

setzt kein permanentes magnetisches Moment voraus  
durch Magnetfeld zusätzliche Bahnbewegung



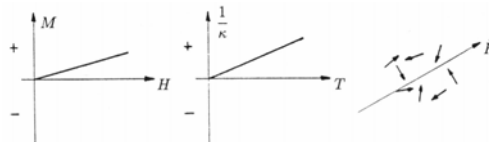
auch bei Valenzelektron in Metallen

Paramagnetismus

Schwache bis mittlere Form, parallel zum angelegten Feld,  $\vec{M}$  proportional zu  $\vec{H}$

$\kappa = +(10^{-3} \text{ bis } 10^{-5})$  ,  $\kappa$  umgekehrt proportional zu T

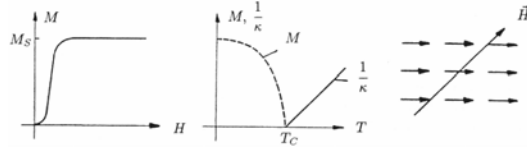
$\rightarrow$  setzt permanent magnetisches Moment voraus, Feld richtet Dipole parallel



### Ferromagnetismus (Eisen, Kobalt, Nickel)

Magnetisierung  $M$  parallel zur angelegten Feldstärke  $H$ , sehr hohe Werte bei kleinen Feldern  $\rightarrow$  Sättigungsmagnetismus, permanente magnetische Momente vorausgesetzt.

$\kappa = 10^5$ , temperaturabhängig

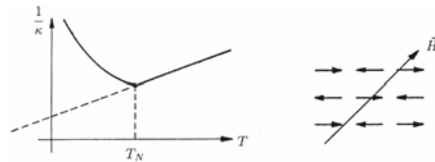


Momente richten sich zufolge Wechselwirkung im Kristallgitter parallel, auf räumliche Teilbereiche (Domänen) beschränkt  $\rightarrow$  keine Magnetisierung nach außen. Anlegen eines kleinen Feldes  $\rightarrow$  Domänen parallel  $\rightarrow$  Sättigung, Hysterese

### Antiferromagnetismus (MnO, FeO, CoO, NiO)

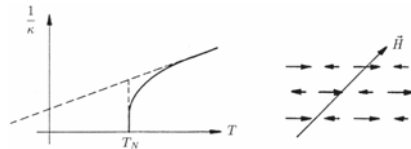
Schwache Form, ähnlich Paramagnetismus

Starke Wechselwirkung im Gitter  $\rightarrow$  Antiparallelstellung der Momente unterhalb  $T_N$  (Néel-Temperatur)



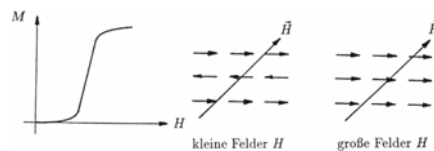
### Ferrimagnetismus

Magnetismus der Ferrite, große Ähnlichkeit mit Antiferromagnetismus, aber antiparallel stehende Momente unterschiedlicher Größe  $\rightarrow$  Magnetisierung auch bei  $H = 0$



### Metamagnetismus

Ursache: 2 Magnetisierungsarten  
Kleine Felder: Kristall Antiferromagnetisch  
Große Felder: Kristall Ferromagnetisch

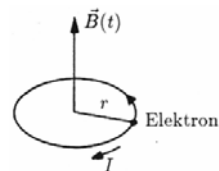


## Diamagnetismus

Induziertes magnetisches Moment bei allen Atomen

Durch Anlegen von  $\vec{B}(t)$  rotiert gesamte Elektronenhülle um Magnetfeld (=Drehachse)

$$m = -\frac{e}{4m_e} r^2 \cdot \mu_0 H$$





$$M = N \cdot m$$

## Paramagnetismus

Je stärker angelegtes Feld, desto mehr Ordnung

## Ferromagnetismus

ist Kristalleigenschaft

### Elementarmagnete und spontane Magnetisierung

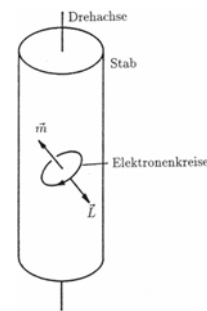
Magnetische Momente im Atom gehen auf bewegte Ladungen zurück → Masse

Bahnelement: 
$$\frac{m_{Bahn}}{L_{Bahn}} = 1 \cdot \left( -\frac{e}{2m_e} \right) \quad (1 \dots \text{g-Faktor})$$

Spinmoment: 
$$\frac{m_{Spin}}{L_{Spin}} = 2 \cdot \left( -\frac{e}{2m_e} \right) \quad (2 \dots \text{g-Faktor})$$

g-Faktor durch gyromagnetische Experimente bestimmt  
(= Kreiseigenschaften)

→ Magnetisierung bei Ferromagnetismus beruht auf freien Orientierbarkeit des Elektronen - Spins. Bahnmomente löschen sich im Kristall gegenseitig aus



Voraussetzung: starke Wechselwirkung zwischen Elementardipolen

$$Kopplungskräfte = \frac{R(\text{Atomradius})}{r(\text{Radius der } 3d\text{-Schale})}$$

→ Ferromagnetismus dann, wenn eine unaufgefüllte Schale (d- oder f-)Schale existiert und Durchmesser der Schale klein gegenüber dem Atomabstand ist. Durch Legierungen kann man Atomabstand weiten.

Sobald sich irgendwo Spins parallel richten, entsteht Weißsches Feld → richtet benachbarte Momente parallel → Polarisation  $I \neq 0$

Wert der spontanen Magnetisierung hängt nicht vom äußeren Feld ab.

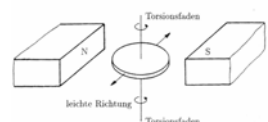
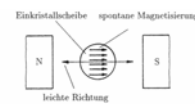
→ Temperaturabhängigkeit: ab gewisser Temperatur  $I = 0$  (Curie Temperatur)

$$T_C = \frac{Nm^2 \mu_0^2}{3k} \cdot w$$

w ... Weißscher

Faktor  
oberhalb Paramagnetismus

### Magnetische Anisotropie



Für Lage der spontanen Magnetisierung sind kristallographische Richtungen verschieden → leichte und schwere Richtungen  
Spontane Magnetisierung nur in leichte Richtungen → Anisotropie

Torsionsmagnetometer: messtechnische Erfassung der Richtungsabhängigkeit

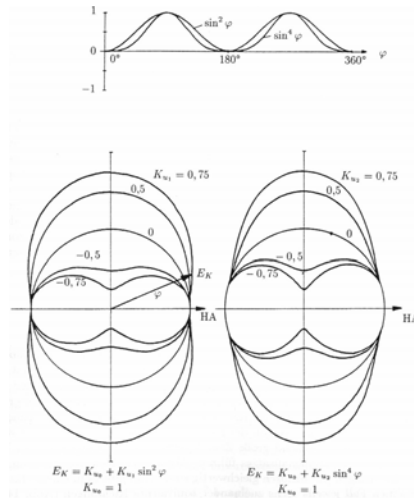
Um Magnetisierung aus leichter Richtung herauszudrehen → Anisotropieenergie (Drehmoment)

$$L = - \frac{dE}{d\varphi}$$

### 1. Kristallanisotropieenergie:

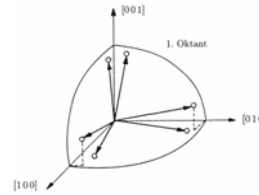
ideal ferromagnetisch, einfachster Fall  
uniaxiale Anisotropie (2 leichte Richtungen  
 $\varphi=180^\circ$ )

$$E_K = K_{u0} + K_{u1} \sin^2 \varphi + K_{u2} \sin^4 \varphi + \dots$$



Fe, Ni: kubischer Kristall: große Zahl äquivalenter Richtungen

→ Winkel  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , die spontane Magnetisierung mit  $[1,0,0], [0,1,0], [0,0,1]$  einschließen

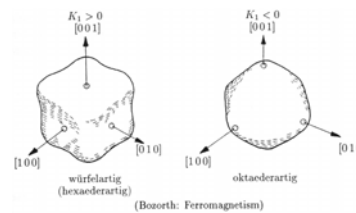


$$\begin{aligned} \rightarrow E_K &= \sum K_{lmn} \cdot \alpha_i^l \alpha_j^m \alpha_k^n \quad (\alpha = \cos \varphi) \\ \rightarrow E_K &= K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots \end{aligned}$$

$K_1 > 0$  ... Würfelartige Energiefläche (Fe)  
 $K_2 < 0$  ... oktaederartige Energiefläche

(Ni)

Man kann Konstanten mit Torsionsmagnetometer ermitteln, sind temperaturabhängig, verschwinden nahe  $T_c$



### 2. Spannungsanisotropie

= Wirkung von mechanischen Spannungen auf spontane Magnetisierung  
mechanische Spannungen können magnetische Eigenschaften ganz wesentlich beeinflussen → Spannungsanisotropie

Ursache Magnetostriktion: bei Änderung der spontanen Magnetisierung →  
Verzerrung des Kristallgitters

Mechanische Spannung von außen → Gitterdeformation → spontane Magnetisierung  
und Magnetostriktion unterstützen sie  
→ spontane Magnetisierung an bestimmte Richtungen mehr oder weniger gebunden

Energie ist jene Arbeit, die aufgewendet werden muss, um bei gegebener  
mechanischer Spannung die spontane Magnetisierung aus Nulllage in Richtung mit  
 $\alpha_1$  (Kosinus) zu drehen

Einfluss mit 1. auf leichte Richtungen

Messung: fixe Beobachtungsrichtung von H-Feld, variiert  $\alpha$  und misst  $\frac{\Delta l}{l}$

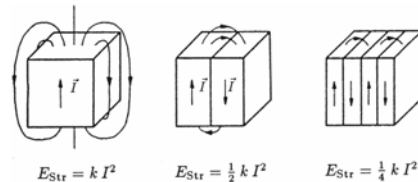
### Domänenstruktur

Im ferromagnetischen Kristall ist spontane Magnetisierung beziehungsweise auf  
verschiedene Richtungen aufgeteilt

→ charakteristische Struktur, beeinflusst magnetische Eigenschaften

Primärstrukturen: nehmen großen Teil des Volumen ein.

Sekundärstrukturen: an Grenzflächen, Einschlüsse, Hohlräume



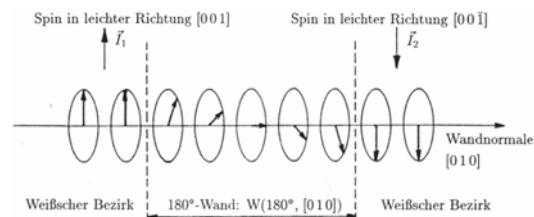
Ursache: Grenzflächen an unmagnetische Bereiche stabil, weil Streufeldenergie  
reduziert wird

Aber zur Etablierung von Grenzflächen zwischen 2 Domänen Energie notwendig

$$E = E_{Str} + E_W$$

Durch Ausbildung eines kompletten Flussringes, kann Streufluss verhindert werden

$\vec{I}$  ändert sich an Grenzfläche nicht sprunghaft, sondern in vielen kleinen Sprüngen  
→ Wand hat Dicke

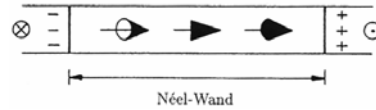


$\vec{I}_1, \vec{I}_2$  müssen leichte Richtungen haben

Spins dürfen bei Übergang von  $\vec{I}_1$  auf  $\vec{I}_2$  im Wandinneren zu keinen Anlass geben

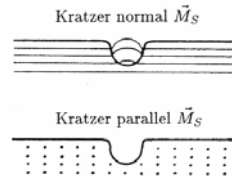
Grenzfläche streufeldfrei, wenn Normalkomponente der Magnetisierung durch Fläche stetig durchtritt

An Wandkanten können Streufelder entstehen, weil Spins bei 180° Drehung an Oberfläche zu Sprung der Normalkomponente Anlass geben → Magnetpole  
Dann bedeutend, wenn Kristall dick ist und Schichten sehr dünn → Néel – Wand (Spins drehen sich in Schichtebene)



Darstellung der Wände mit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in kolloidaler Lösung

Kratzer in Oberfläche in Magnetisierungsrichtung → kein Streufeld (Messung der Magnetisierungsrichtung)



Domänenstruktur → unterschiedliche Energieterme:

$$\sum E = E_A + E_W + E_{Str} + E_K + E_\sigma + E_H$$

Gleichgewichtszustand kann sich nicht einstellen → Hysterese

Primärstruktur: einfache Struktur im Kristallinneren, nimmt größten Teil des Volumens ein, bestimmt makroskopischen Energiezustand

Sekundärstruktur: relativ komplexe Struktur, tritt an Oberfläche auf, volumsmäßig unbedeutend, hat Aufgabe Reststreufelder abzubauen

Gemeinsame Gesichtspunkte:

- starke Austauschenergie  $E_K$  wird Minimum zustreben → Spins in jedem Bezirk in einzige Richtung orientiert
- Wandenergie  $E_N$  untergeordnete Größe. Wandfläche darf zunehmen und gesamte Wandenergie  $E_W$  der Struktur vergrößern, wenn andere Energieterme sich verkleinern

Regeln für Ausbildung der Primärstruktur:

- $E_{Str}$  ist durch Bezirkstrukturen (Flussringe) zu verringern.
- Kristallanisotropieenergie  $E_K$  muss verschwinden, d.h. Spins in leicht Richtungen orientiert
- Spannungsanisotropieenergie  $E_\sigma$  wird auf Orientierungen der Spins Einfluss haben
- Ausbildung wird durch Reduktion der potentiellen Energie zufolge äußerer Magnetfelder geprägt sein. Feldparallele Domänen kleine potentielle Energie → Magnetisierung des Gesamtkörpers

Regeln für die Ausbildung der Sekundärstruktur:

- Reduktion von Streufeldenergie  $E_{Str}$  ist Hauptaufgabe



- Einfluss von  $E_K$  wegen geringen Volumen gering. Spins können sich bis zu gewissen Grad über Einfluss der Energierme hinwegsetzen. Es dürfen  $E_K$  und  $E_\sigma$  zunehmen, solange  $E_{Str}$  wirkungsvoll abgebaut wird.
- Streufeldfreiheit der Wände verletzt

Polykristalline Werkstoffe:

- Kornorientiert (FeSi, FeNi): verhalten sich einkristallartig, Korngrenzen stören Ausbildung von Domänen nicht.
- regellose Kornorientierung: jedes Kristallkorn bildet eigenständige Bezirksstruktur

tannenbaumartige Sekundärstruktur:

- bei  $180^\circ$ -Wänden, wenn leichte Richtungen nicht exakt in Kristalloberfläche liegen  
→ würden sich Polflächen mit gewaltigen Streufeld ausbilden.

### Magnetisierungsprozess und Domänentheorie

Elementarvorgänge: Wandverschiebungen, Drehprozesse

Können reversibel oder irreversibel sein  
Irreversibel → Hysterese

Wandkonfiguration im Gleichgewicht, wenn Gesamtenergie hier für Minimum ist.

$$E_H = -HI_{sp} \cdot \sum_i V_i \cdot \cos \varphi_i$$

Wenn nur Wandverschiebungen betrachtet werden:

$$HI_{sp} \sum_i \cos \varphi_i \partial V_i = \partial \bar{E} \rightarrow H \approx \frac{\partial \bar{E}}{\partial x}$$

stetige Wandbewegungen werden sich bei Anfangssuszeptibilität und bei reversiblen Suszeptibilität bemerkbar machen

unstetige Wandbewegungen sind Barkhausen-Sprünge

Phasenregel: Beschreibung des Magnetisierungsvorganges

Probe ideal störungsfreier Einkristall, der äußeren Magnetfeld  $\vec{H}$  ausgesetzt ist.  
Wenn kein geschlossener magnetischer Kreis vorliegt, so entsteht wegen  $\vec{H}$  zwischen Luft und Oberfläche magnetischer Flächenladung  
→ entmagnetisierendes Feld  $\vec{H}_e$  (homogen)

Außerdem keine freien magnetischen Ladungen (Bezirksstruktur) → Magnetfeld im inneren homogen

$$\vec{H}_i = \vec{H} + \vec{H}_e$$

$I_{sp}$  in bestimmte Richtungen orientiert (Anisotropie)

$$\sum_i V_i = 1$$



$$\vec{I} = I_{sp} \cdot \sum_i V_i \cdot \vec{e}_i$$

irreversible Prozesse werden hier vernachlässigt

ferromagnetische Kristalle:

mit leichten Richtungen  $\langle 100 \rangle$

Modus I:  $H_i = 0$

→ alle sechs  $\langle 100 \rangle$ -Richtungen energetisch gleichwertig → alle sechs Phasen im Gleichgewicht.

Wenn kleines inneres Feld  $H$ , sind potentielle Energiedichten der sechs Phasen im allgemeinen unterschiedlich groß.

→ Gleichgewicht der Phasen gestört → Wandverschiebungen  
→ energetisch ungünstige Phasen verschwinden

Phase 1:  $-pH_i I_{sp}$  in  $[1\ 0\ 0]$  – Richtung

Phase 2:  $+pH_i I_{sp}$  in  $[\bar{1}\ 0\ 0]$  – Richtung

Phase 3:  $-qH_i I_{sp}$  in  $[0\ 1\ 0]$  – Richtung

Phase 4:  $+qH_i I_{sp}$  in  $[0\ \bar{1}\ 0]$  – Richtung

Phase 5:  $-rH_i I_{sp}$  in  $[0\ 0\ 1]$  – Richtung

Phase 6:  $+rH_i I_{sp}$  in  $[0\ 0\ \bar{1}]$  – Richtung

Modus II:  $H_i \neq 0$ ,  $p = q = r$  (Richtungscosinus)

Phasen 2,4 und 6 energetisch ungünstig  
→ sie verschwinden. 1,3 und 5 im Gleichgewicht

Modus III:  $H_i \neq 0$ ,  $p = q > r$

1,3 energetisch gleich → Gleichgewicht

Modus IV:  $H_i \neq 0$ ,  $p > q \geq r$

Existiert nur Phase 1

Magnetisierung in schwachen äußeren Feldern:

→ Wandverschiebungen

$$\vec{H}_i = \vec{H} + \vec{H}_e = \vec{H} - N \frac{\vec{I}}{\mu_0} = \vec{H} - \frac{N}{\mu_0} (\vec{I}_p + \vec{I}_n) = 0$$

$N$  ... Entmagnetisierungsfaktor

$\vec{I}_p, \vec{I}_n$  ... parallel- bzw. normal Komponente

→  $\vec{I}_n = 0$

$$\vec{I}_p = \frac{\mu_0}{N} \cdot \vec{H}$$

Magnetisierung in starken äußeren Feldern:

→ Drehprozesse

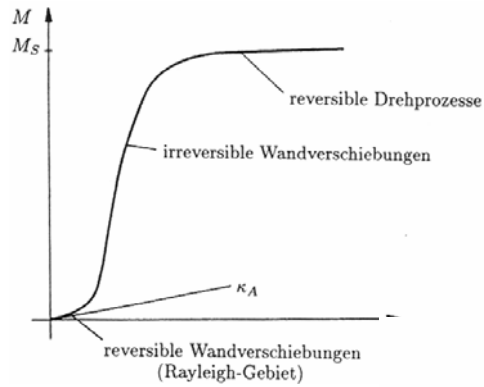
$$\vec{I}_n \neq 0$$

Bei Magnetisierung in  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  oder  $\langle 111 \rangle$  hebt sich  $\vec{I}_n$  aus Symmetriegründen weg

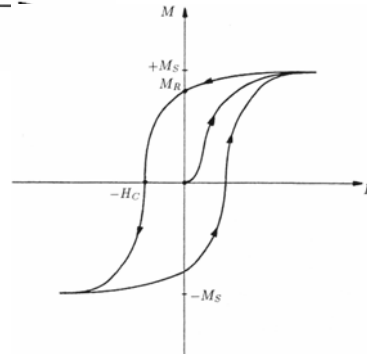
Neukurve: schwache Felder → lineare Proportionalität zwischen M und H  
(Wandverschiebungen)

$$\kappa_A = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{M}{H} \quad \dots \text{Anfangsuszeptibilität}$$

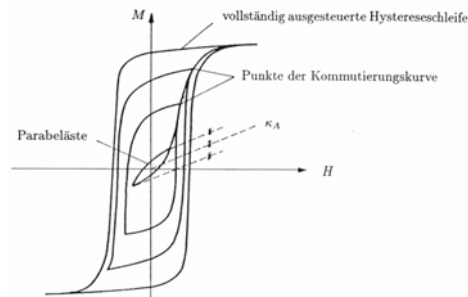
$$\text{größere Feldstärken: } M = \kappa_A \cdot H + \alpha H^2$$



Befindet man sich in Sättigung  $M_S$  und reduziert.  $H \rightarrow$  nimmt anderen Weg als Neukurve und erreicht Remanenzflussdichte ( $H=0$ )  
Bei Koerzitivfeldstärke  $H_C$  ist  $M=0$   
→ Schleife dieser Art ist vollständig angesteuert



Kommutierungslinie: Hystereseschleife, aber nicht bis zur Sättigung





Lanzettenschleifen:  $\Delta B = const.$  → unterschiedliches  $\Delta H$

Entmagnetisieren: Probe in starkes Wechselfeld, Amplitude stetig auf Null reduziert

Magnetisierung temperaturabhängig!

Mechanische Spannungen Einfluss auf Hystereseschleife → Beeinflussung der leichten Richtungen

Durch Kaltwalzen Probe hartmagnetisch (hohes  $H_C$ ), aber durch Glühprozess wieder weichmagnetisch

Magnetstriktion:

Länge eines ferromagnetischen Stabes ändert sich beim Magnetisieren. Volumen bleibt aber gleich

Verzerrung ist von Lage der spontanen Magnetisierung unabhängig, es kommt auf Winkel an

Bei Drehprozessen ändern sich Richtungscosinus  $\alpha_i$  → Gestaltungsänderung

Bei 180°-Wandverschiebungen keine Änderung, bei 90°, 71° und 109° gibt es eine Verschiebung

Formatiert