

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

WERKSTOFFE DER ELEKTROTECHNIK

Antworten zu den Verständnisfragen

Autor:
Dennis GOLDNER

Mitverfasser:
Gabriele BOSETTI
Meriç FIRAT

Vorwort

Dieses Dokument stellt einen Antwortenkatalog für die Verständnisfragen der Vorlesung "Werkstoffe der Elektrotechnik" von Professor Amann dar und soll dem Studierenden ein tieferes Verständnis des in der Vorlesung behandelten Stoffes vermitteln. Jeder Leser ist dazu eingeladen etwaige Fehler oder gegebenenfalls Anmerkungen an folgende Email-Adresse weiterzuleiten: dennis.goldner@tum.de. Ich möchte mich an dieser Stelle nochmals bei Gabriele und Meriç für ihre Unterstützung dieses doch sehr umfangreichen Projektes bedanken!

24. März 2014
Version 1.0

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Aufbau der Materie | 4 |
| 1.1 | Nennen Sie je einen physikalischen Vorgang, der die Wellennatur bzw. den Teilchencharakter von Licht repräsentiert. | 4 |
| 1.2 | Welche Bedeutung hat die Ψ -Funktion und wie kann man mit ihrer Hilfe physikalisch relevante Aussagen treffen? | 5 |
| 1.3 | Welche mathematischen Forderungen bedingen die Energiequantisierung in quantenmechanischen Systemen? | 5 |
| 1.4 | Durch welche Quantenzahl ist eine Schale ausgezeichnet und welche Werte nimmt diese Zahl an für K-, L- und M-Schalen? | 5 |
| 1.5 | Durch welche Quantenzahl ist ein Orbital ausgezeichnet und welche Werte nimmt diese Zahl an für s-, p- und d-Orbitale? | 5 |
| 1.6 | Nennen Sie die Teilprozesse bei der Bildung einer Ionenbindung. Wann kann die entsprechende Reaktion ablaufen? | 7 |
| 1.7 | Welche spezifischen Eigenschaften zeichnen Metalle aus und wie sind diese qualitativ zu erklären? | 7 |
| 1.8 | Erläutern Sie drei verschiedene Verfahren zur Bildung von Kunststoffen. | 7 |
| 2 | Mechanische Eigenschaften der Festkörper | 9 |
| 2.1 | Wie sind Elastizitäts- und Kompressionsmodul E bzw. K definiert und welcher Zusammenhang besteht zwischen ihnen? | 9 |
| 2.2 | Was sind Phononen? | 9 |
| 2.3 | Interpretieren Sie in Bild 2.4. Warum gibt es für einen k-Wert jeweils 2 Frequenzen der Gitterschwingungen? | 10 |
| 2.4 | Skizzieren Sie schematisch das Zugspannungs-Dehnungsdiagramm. | 11 |
| 2.5 | Was versteht man unter plastischer Verformung und warum ist diese meist richtungsabhängig? | 11 |
| 2.6 | Beschreiben Sie eine Methode zur Härteprüfung. | 12 |
| 3 | Thermische Eigenschaften der Festkörper | 13 |
| 3.1 | Wie ist die spezifische Wärme definiert und welche Dimension besitzt sie? | 13 |
| 3.2 | Diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme eines Festkörpers. | 14 |
| 3.3 | Warum dehnen sich Festkörper bei Erwärmung aus? | 15 |
| 3.4 | Erläutern Sie die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (Bild 3.5). | 16 |
| 3.5 | Wie lautet die Fermiverteilung und welches sind die relevanten Parameter ? Wie groß ist $k_B T$ bei Raumtemperatur (300K)? . . . | 17 |
| 3.6 | Welche physikalischen Größen verknüpft das Wiedemann-Franzsche Gesetz? | 17 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Ladungstransport in Festkörpern | 18 |
| 4.1 | Was versteht man unter Energiebändern? | 18 |
| 4.2 | Warum treten verbotene Bänder auf? | 18 |
| 4.3 | Wie ist die effektive Masse definiert ? Welchen Vorteil bietet die Verwendung dieser Größe? | 18 |
| 4.4 | Wie ist der Bandabstand eines Festkörpers definiert? | 19 |
| 4.5 | Diskutieren Sie anhand des Bändermodells die Unterschiede zwischen Isolatoren, Halbleitern und Metallen. | 19 |
| 5 | Elektrische Eigenschaften der Metalle, Supraleitung | 21 |
| 5.1 | Erläutern Sie die Mattiessensche Regel. Wodurch wird der Restwiderstand bestimmt? | 21 |
| 5.2 | Wie hängt die Leitfähigkeit einer Legierung prinzipiell von Mischungsverhältnis ab? | 22 |
| 5.3 | Warum ist die elektrische Leitfähigkeit temperaturabhängig? | 22 |
| 5.4 | Welche Metalle weisen die höchsten Leitfähigkeiten auf? | 22 |
| 5.5 | Welche Anforderungen werden an Kontaktwerkstoffe gestellt? | 23 |
| 5.6 | Was geschieht bei der Korrosion von Metallen? | 23 |
| 5.7 | Wie funktioniert ein Thermoelement und wie mißt man damit die Temperaturen (Schaltungsskizze)? Welche Empfindlichkeit ($\Delta U/\Delta T$) ist erreichbar? | 23 |
| 5.8 | Erklären Sie den Peltier-Effekt. | 24 |
| 5.9 | Was ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt? | 24 |
| 5.10 | Welche äußeren Einflüsse können die Supraleitung zerstören? | 25 |
| 5.11 | Was unterscheidet einen Supraleiter von einem idealen Leiter? | 25 |
| 6 | Halbleiter | 26 |
| 6.1 | Was versteht man unter effektiver Zustandsdichte und wie hängt diese von der effektiven Masse ab? | 26 |
| 6.2 | Welchen Wert besitzt die intrinsische Ladungsträgerdichte von Silizium bei Raumtemperatur und wie hoch sind typische Dotierungen von p- und n-Silizium? | 27 |
| 6.3 | Warum sind Halbleiter mit kleinem Bandabstand für Hochtemperaturanwendungen schlecht geeignet? | 27 |
| 6.4 | Wann spricht man von entarteter Dotierung eines Halbleiters? | 27 |
| 6.5 | Erläutern Sie die Begriffe Störstellenschöpfung und Störstellenreserve. | 27 |
| 6.6 | Was ist die Ionisierungsenergie einer Störstelle. Wie hängt sie von der Konzentration der Ladungsträger ab? | 28 |
| 6.7 | Wie ist die Beweglichkeit definiert und welche Dimensionen besitzt sie ? Diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit! | 28 |
| 7 | Dielektrische Eigenschaften von Festkörpern | 30 |
| 7.1 | Was versteht man unter der elektrischen Polarisierung? Welche Dimension besitzt sie? | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7.2 | Warum weist ein Festkörper mit komplexer Permittivität Verluste auf? Warum gibt man diese zumeist in Form des $\tan \delta$ an? | 30 |
| 7.3 | Wie hängt der Imaginärteil der Permittivität mit der elektrischen Leitfähigkeit zusammen? | 30 |
| 7.4 | Welche Polarisationsmechanismen gibt es? | 30 |
| 7.5 | Skizzieren Sie die prinzipielle Frequenzabhängigkeit der komplexen Permittivität. | 31 |
| 7.6 | Was ist Ferroelektrizität und welche Temperaturabhängigkeit besitzt sie? | 32 |
| 7.7 | Was ist der Unterschied zwischen Piezoelektrizität und Elektrostriktion? | 32 |
| 8 | Magnetische Eigenschaften von Festkörpern | 33 |
| 8.1 | Wie sind magnetische Polarisation und Suszeptibilität definiert? | 33 |
| 8.2 | Wodurch werden der Dia- und Paramagnetismus verursacht und wie hängen sie von der Temperatur ab? | 33 |
| 8.3 | Welches magnetische Verhalten zeigen Leitungselektronen? | 34 |
| 8.4 | Was ist Ferromagnetismus und welche Materialien weisen ihn auf? | 34 |
| 8.5 | Nennen sie Beispiele und Anwendungen für Ferromagnetika? | 34 |
| 8.6 | Was sind Weiss'sche Bezirke? | 35 |
| 8.7 | Welche Materialien sind für Dauermagnete besonders gut geeignet? | 35 |
| 8.8 | Warum treten beim Durchlaufen der Magnetisierungskurve (Bild 8.13) Verluste auf? Wie sehen Magnetisierungskurven mit niedrigen bzw. hohen Verlusten aus? | 36 |

1 Aufbau der Materie

1.1 Nennen Sie je einen physikalischen Vorgang, der die Wellennatur bzw. den Teilchencharakter von Licht repräsentiert.

Ein Experiment welches die quantenmechanische Natur des Lichtes zeigt ist Youngs Doppelschlit Experiment. Der Experimentaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen.

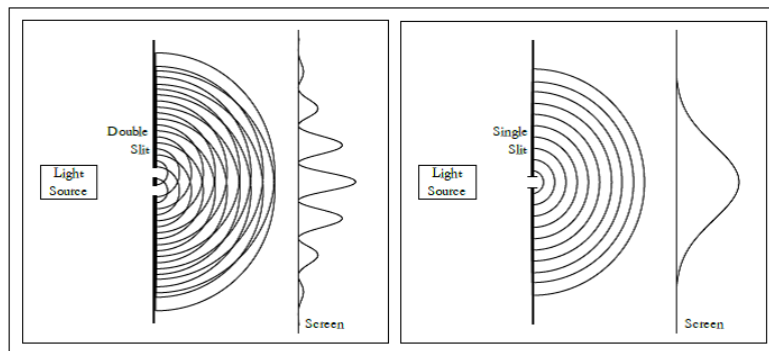


Abbildung 1: Doppelschlitexperiment Wellennatur

Sobald man den Doppelschlit mit Licht bestrahlt, nimmt man eine Interferenz des Lichtes wahr. Dies schließt auf die Wellennatur des Lichtes. Dies gilt aber nicht wenn man die Intensität des Lichtes sehr stark verringert.

Man stelle sich vor der Hintergrund bestehe aus tausenden kleiner Photodetektoren, welche die Energie, die sie absorbieren detektieren können. Für hohe Intensitäten sehen wir dasselbe Interferenzmuster wie zuvor. Doch sobald die Intensität sehr gering wird, erreicht die Energie, welche die Photodetektoren messen, ein Minimum und alle Detektoren messen die gleiche Energie E_0 , nur mit unterschiedlicher Frequenz. Die Energie E_0 entspricht der Energie eines Photons. Dieser Effekt beweist die Teilchennatur des Lichtes. Ein anderes Beispiel für die Teilchennatur des Lichtes ist der photoelektrische Effekt.

1.2 Welche Bedeutung hat die Ψ -Funktion und wie kann man mit ihrer Hilfe physikalisch relevante Aussagen treffen?

Die Schrödingergleichung löst quantenmechanische Problemstellungen. Mit Hilfe ihrer kann man die Wellenfunktion Ψ bestimmen. Die Ψ -Funktion selbst hat keinerlei physikalische Bedeutung. Das Betragsquadrat von Ψ definiert aber die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines Teilchens. Integriert man diese, erhält man die Aufenthaltswahrscheinlichkeit :

$$P[a; b] = \int_a^b \Psi^* \Psi d\tau$$

1.3 Welche mathematischen Forderungen bedingen die Energiequantisierung in quantenmechanischen Systemen?

Die Schrödingergleichung ist eine Differentialgleichung 2.Ordnung. Betrachtet man nun ein Elektron in einem System wie beispielsweise einem Potentialtopf, ergeben sich durch die Randbedingungen an das System nur diskrete Energieeigenwerte.

1.4 Durch welche Quantenzahl ist eine Schale ausgezeichnet und welche Werte nimmt diese Zahl an für K-, L- und M-Schalen?

Löst man die Schrödingergleichung für das Coulombpotential am Beispiel des Wasserstoffatoms, ergeben sich ebenfalls diskrete Energiezustände. Da es sich um eine dreidimensionale Problemstellung handelt, ergeben sich drei Quantenzahlen n , l und m . Die Hauptquantenzahl n beschreibt die Energie des Elektrons und somit auch die Schale auf der es sich um den positiven Kern befindet. Für $n = 1$ befindet sich das Elektron in der K-Schale, für $n = 2$ in der L-Schale und für $n = 3$ in der M-Schale. Weitere Schalen folgen.

1.5 Durch welche Quantenzahl ist ein Orbital ausgezeichnet und welche Werte nimmt diese Zahl an für s-, p- und d-Orbitale?

Die Nebenquantenzahl l beschreibt die Orbitale, also in gewisser Weise die Verteilung der Elektronenwahrscheinlichkeitsdichte. Sie nimmt Werte im Bereich von 0 bis $n - 1$ an. Für $l = 0$ bildet sich ein s-Orbital, für $l = 1$ ein p-Orbital und für $l = 2$ ein d-Orbital. Die magnetische Quantenzahl m beschreibt die magnetischen Eigenschaften der Elektronen und die Orientierung der Orbitale. Sie nimmt Werte von $-l$ bis l an. So existieren also drei p-Orbitale mit unterschiedlicher Orientierung, in denen insgesamt 6 Elektronen Platz finden. Abbildung 2 verdeutlicht dies.

Zusätzlich gibt es noch eine vierte Quantenzahl s , welche den Eigendrehimpuls, oder Spin des Elektrons charakterisiert. s nimmt den Wert $\pm\frac{1}{2}$ an. Abbildung 3 zeigt den Ablauf, nach welchem die Schalen gefüllt werden.

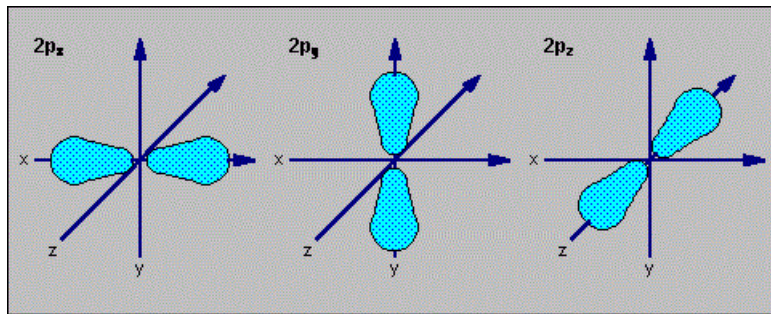


Abbildung 2: Orientierung der 2p-Orbitale

| | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Q | 7s | 7p | | |
| P | 6s | 6p | 6d | |
| O | 5s | 5p | 5d | 5f |
| N | 4s | 4p | 4d | 4f |
| M | 3s | 3p | 3d | |
| L | 2s | 2p | | |
| K | 1s | | | |
| | s | p | d | f |

Abbildung 3: Füllreihenfolge der Schalen und Orbitale

1.6 Nennen Sie die Teilprozesse bei der Bildung einer Ionenbindung. Wann kann die entsprechende Reaktion ablaufen?

Die Voraussetzung für eine Ionenbindung sind zwei unterschiedliche Atome, die leicht ionisiert werden können. Außerdem kann eine Ionenbindung zwischen zwei Teilchen nur dann gebildet werden, wenn, ausgehend von der absoluten Energiebilanz, Energie abgegeben wird. Dadurch bildet sich ein stabiles Molekül. Die Entstehung einer Ionenbindung kann in drei Teilreaktionen zerlegt werden. Hier am Beispiel von $NaCl$:

1. Ionisierung des Kations : $Na \Rightarrow Na^+ + e^-$
2. Ionisierung des Anions : $Cl + e^- \Rightarrow Cl^-$
3. Molekülbildung : $Na^+ + Cl^- \Rightarrow NaCl$

Die Ionenbindung ist sehr fest und praktisch nicht verformbar. Da die Elektronen fest an den Ionen lokalisiert sind, gibt es keine freien Elektronen. Das entstehende Material ist somit ein Isolator.

1.7 Welche spezifischen Eigenschaften zeichnen Metalle aus und wie sind diese qualitativ zu erklären?

Die metallische Bindung ist ein Sonderfall der kovalenten Bindung, bei der Atome durch gemeinsame Elektronen binden. Die bindenden Valenzelektronen sind hierbei aber nicht fest lokalisiert, sondern es entsteht so etwas wie ein See aus Elektronen, ein Elektronengas. Die freien Elektronen verursachen hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Die metallische Bindung ist schwächer als die ionische bzw. kovalente Bindung. Dies schlägt sich in niedrigen Schmelztemperaturen nieder.

1.8 Erläutern Sie drei verschiedene Verfahren zur Bildung von Kunststoffen.

Kunststoffe sind organische Stoffe, basierend auf der Kohlenstoffchemie. Sie enthalten im wesentlichen die Elemente C, H, N und O. Mögliche Herstellungsprozesse von Kunststoffen sind :

Polykondensation : Polykondensation ist eine chemische Reaktion organischer Stoffe, bei der aus vielen Molekülen, unter Abspaltung kleinerer Moleküle, Makromoleküle gebildet werden.

Polyaddition : Bei der Polyaddition gelten dieselben Kriterien wie bei der Polykondensation. Mit dem Unterschied, dass hier keine Abspaltungsprozesse entstehen.

Polymerisation : Aus Monomeren, welche Doppelbindungen enthalten, entstehen in einer Kettenreaktion lange Polymerketten. Hierbei entstehen keine Abspaltungsprodukte.

2 Mechanische Eigenschaften der Festkörper

2.1 Wie sind Elastizitäts- und Kompressionsmodul E bzw. K definiert und welcher Zusammenhang besteht zwischen ihnen?

Der Elastizitätsmodul E verknüpft, für uniaxiale Zugbelastung, die Spannung σ mit der Dehnung ϵ . Im Falle einer elastischen Dehnung lautet das Hooksche Gesetz für den eindimensionalen Fall :

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

Der Kompressionsmodul K beschreibt, welche allseitige Druckänderung nötig ist, um eine bestimmte Volumenänderung hervorzurufen.

$$K = -\frac{p}{\Delta V/V}$$

Bei hydrostatischer Kompression ergibt sich also folgender Zusammenhang zwischen Kompressionsmodul und Elastizitätsmodul :

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Hierbei ist ν die Poisson-Zahl, welche der Tatsache gerecht wird, dass bei einer Längenzunahme auch stets eine Querkontraktion stattfindet. Sie ist bei den meisten Metallen 0.3, womit $K \approx 0.8E$ ist.

2.2 Was sind Phononen?

Aufgrund elastischer Rückstellkräfte im Festkörper und der Massenträgheit, kann es durch äußere Anregung zu mechanischen Gitterschwingungen kommen. Bei Gitterschwingungen nahe des Atomabstandes, z.B durch thermische Anregung, müssen die Atome als einzelnes betrachtet werden um den Schwingungsmechanismus zu beschreiben. Ein übliches Modell ist eine lineare Kette elastisch gekoppelter Massepunkte. Die sich ergebende Schwingung kann aufgrund des Welle- Teilchen Dualismus mit sogenannten Phononen beschrieben werden.

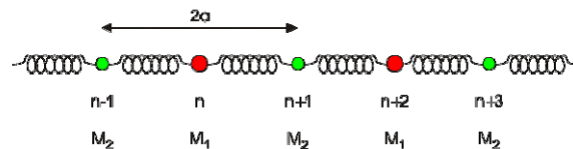


Abbildung 4: Modell der linearen Kette elastisch gekoppelter Massepunkte

2.3 Interpretieren Sie in Bild 2.4. Warum gibt es für einen k-Wert jeweils 2 Frequenzen der Gitterschwingungen?

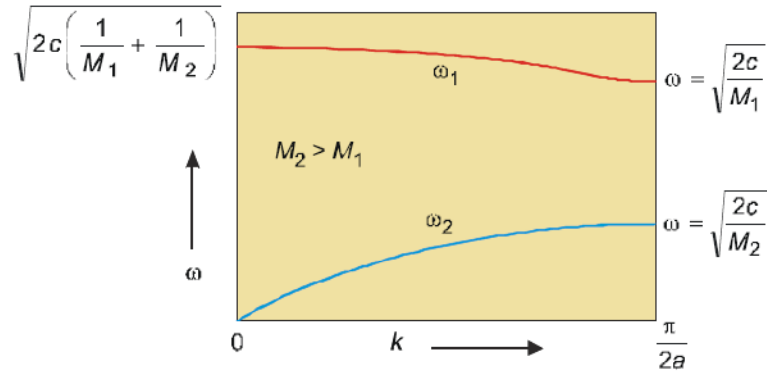


Abbildung 5: Bild 2.4: Schematisches Phononenspektrum einer linearen Kette

In Abbildung 5 ist die Frequenz der optischen Gitterschwingung ω_1 und die Frequenz der akustischen Gitterschwingung ω_2 in Abhängigkeit der Wellenzahl k gegeben. Die Wellenzahl k ist der Betrag des Wellenvektors. Der Wellenvektor ist ein Vektor, der senkrecht auf der Wellenfront einer Welle steht. Er hat die Einheit $1/m$. In Formeln wird für ihn üblicherweise das Zeichen \vec{k} gewählt. In den meisten Fällen gibt er die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Die 2 unterschiedlichen Frequenzen stehen für unterschiedliche Ausbreitungsarten der Gitterschwingung und ergeben sich durch das Lösen des Differentialgleichungssystems, das sich durch die Betrachtung der Gitterschwingungen aufstellen lässt. Beide Schwingungsarten treten im Kristall parallel auf.



Abbildung 6: Transversal akustische Gitterschwingung

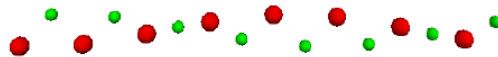


Abbildung 7: Transversal optische Gitterschwingung

2.4 Skizzieren Sie schematisch das Zugspannungs-Dehnungsdiagramm.

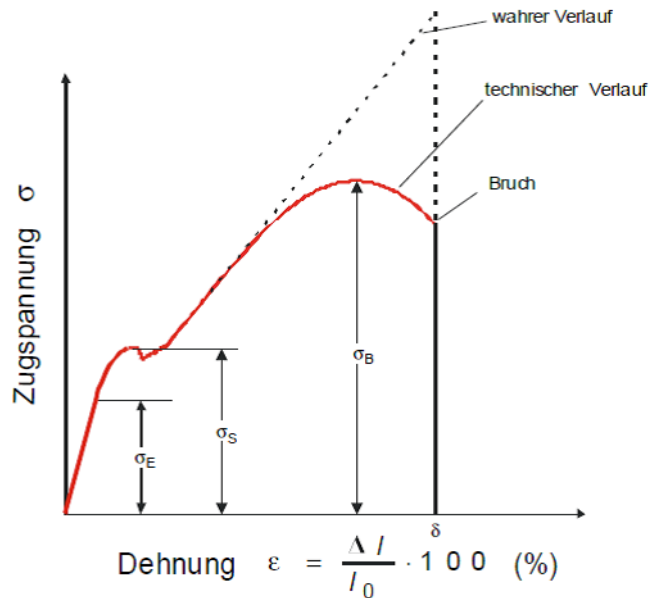


Abbildung 8: Zugspannungs-Dehnungsdiagramm

Unterhalb von σ_E ist der elastische Bereich, hier gilt das Hooksche Gesetz. Oberhalb von σ_S kommt es zur plastischen Verformung. σ_B ist die Zugfestigkeit und kennzeichnet die maximal übertragbare Kraft. δ ist die Bruchdehnung. Der technische Verlauf berücksichtigt nicht die Querkontraktion des Materials, welche mit einer Längenzunahme einher geht.

2.5 Was versteht man unter plastischer Verformung und warum ist diese meist richtungsabhängig?

Unter plastischer Verformung die irreversible Verformung eines Werkstoffes, das durch Abgleiten von Gleitebenen zueinander zustande kommt. Aufgrund der Stufenbildung wird die Oberfläche dabei aufgeraut. Abbildung 9 zeigt diesen Vorgang. Die Richtungsabhängigkeit ist aufgrund der Kristallstruktur gegeben. Die Gleitebenen bilden sich in Ebenen aus, an denen die Packungsdichte der Oberfläche am höchsten ist. Diese Ebenen werden durch die Millerschen Indizes definiert. Abbildung 10 zeigt einige dieser Ebenen.

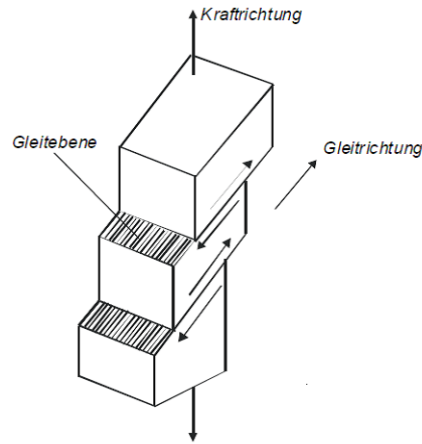


Abbildung 9: Plastische Verformung

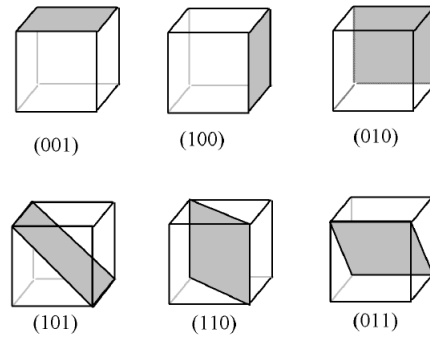


Abbildung 10: Millersche Ebenen

2.6 Beschreiben Sie eine Methode zur Härteprüfung.

Unter Härte versteht man den Widerstand eines Werkstoffes gegen das Eindringen eines härteren Prüfkörpers. Ein mögliches Verfahren zur Härteprüfung ist es, den Prüfkörper eine bestimmte Zeit mit einer bekannten Kraft auf den Werkstoff wirken zu lassen. Nach dem Entlasten wird der bleibende Eindruck gemessen und anhand dessen die Härte des Werkstoffes bestimmt. Ein konkretes Beispiel ist das sogenannte Rockwell B Verfahren, bei dem eine harte Stahlkugel mit einer bestimmten Kraft auf den Prüfkörper gedrückt, und die dabei entstandene Eindringtiefe als Härtemaß gemessen wird.

3 Thermische Eigenschaften der Festkörper

3.1 Wie ist die spezifische Wärme definiert und welche Dimension besitzt sie?

Die spezifische Wärme ist die auf die Masse bezogene Wärmekapazität eines Festkörpers. Sie kennzeichnet diejenige Wärmemenge, die notwendig ist, die Temperatur eines Kilo des Festkörpers um ein Grad zu erhöhen. Hierbei wird angenommen, dass die gesamte zugeführte Wärmeenergie in innere Energie umgesetzt wird. Die spezifische Wärmekapazität lautet :

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

Sie besitzt die Dimension : $\frac{\text{Joule}}{\text{kg}\cdot\text{T}}$. In einem Festkörper mit N Atomen ist die innere Energie :

$$U = 3Nk_B T$$

k_B ist die Boltzmann-Konstante, sie verknüpft die Temperatur eines freien Teilchens mit dessen thermischen Energie. Aufgrund der 3 translatorischen Freiheitsgrade kommt bei der Energie des Festkörpers noch der Faktor 3 dazu, da jedem Freiheitsgrad die Energie $k_B T$ zugeordnet wird. Somit lautet die spezifische Wärmekapazität :

$$c = \frac{3Nk_B}{m}$$

Betrachtet man die molare spezifische Wärmekapazität, ergibt sich das Dulong-Petitsche Gesetz:

$$c_m = 3N_A k_B = 3R = 24.9 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

N_A ist die Avogadro Zahl und beschreibt die Anzahl der Atome in einem Mol. Ein Mol ist diejenige Stoffmenge einer Substanz, in der so viele Atome enthalten sind wie in 12 Gramm des Kohlenstoffnuklids ^{12}C . Diese Temperaturunabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität beobachtet man jedoch nur für hohe Temperaturen.

3.2 Diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme eines Festkörpers.

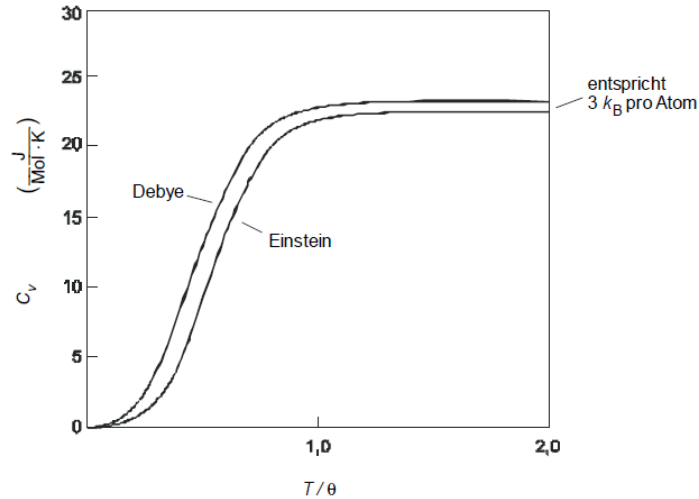


Abbildung 11: Temperaturabhängigkeit der spezifischen molaren Wärmekapazität

Für tiefe Temperaturen nimmt die spezifische Wärmekapazität, entgegen des Dulong-Petitsche Gesetzes ab. Beim absoluten Nullpunkt verschwindet sie sogar, da die innere Energie hier ein Minimum haben muss. Im Einstein Modell betrachtet man jeden Freiheitsgrad der N Atome als unabhängigen harmonischen Oszillator. Der erreichte Abfall der Temperatur stimmt jedoch nicht mit den experimentell gefundenen Ergebnissen zusammen. Die Ursache für das Scheitern dieses Modells liegt darin, dass innerhalb eines Freiheitsgrades allen Atomen eine einzige Oszillationsfrequenz zugeordnet wird. Man muss jedoch das Spektrum der Phononenschwingung betrachten. Dies ergibt schließlich die Debye-Näherung :

$$k_B\theta = \frac{h}{2\pi}\omega_D$$

Die Debye Grenzfrequenz ω_D beschreibt die maximale Frequenz für mögliche Phononenzustände. Also die Frequenz der optischen Phononen. Oberhalb der Debye Temperatur sind also alle Schwingungszustände angeregt. In Abbildung 11 sind beide Modelle dargestellt. Der Anstieg der spezifischen molaren Wärmekapazität geht mit der dritten Potenz der Temperatur, T^3 einher.

3.3 Warum dehnen sich Festkörper bei Erwärmung aus?

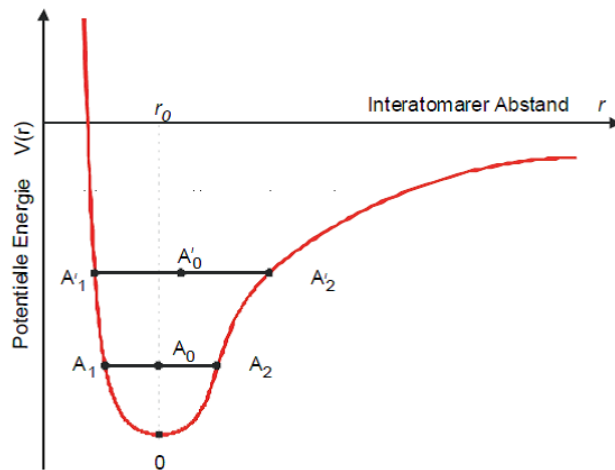


Abbildung 12: Thermische Ausdehnung durch asymmetrischen Verlauf der potentiellen Energie

Durch thermische Anregung erhöht man die innere Energie im Festkörper. Damit verbunden also die Schwingungsamplitude der Gitterschwingungen. Abbildung 12 zeigt diesen Vorgang. Zu Beginn schwingt das Atom um den Gleichgewichtsabstand r_0 . Diese Gleichgewichtsposition wird mit A_0 gekennzeichnet. Bei thermischer Anregung verschiebt sich der Mittelpunkt der thermischen Anregung in den Punkt A'_0 . Aufgrund des unsymmetrischen Potentialverlaufs weicht dieser Punkt von dem Gleichgewichtspunkt ab, der Körper dehnt sich aus!

3.4 Erläutern Sie die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (Bild 3.5).

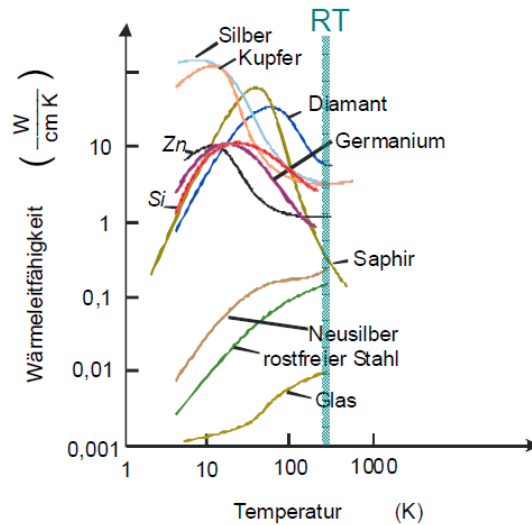


Abbildung 13: Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe

Die transportierte Wärmemenge pro Flächeneinheit ΔQ ist proportional zu dem negativen Temperaturgradienten und der Zeit :

$$\Delta Q = -\lambda \cdot \nabla T \cdot \Delta t$$

Die Proportionalitätskonstante ist die Wärmeleitfähigkeit λ . Der Wärmestrom wird von Phononen und frei beweglichen Elektronen übernommen. Mit diesem Modell ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit folgendermaßen :

$$\lambda = \frac{1}{3} C \cdot \overline{v^2} \cdot l$$

Hierbei ist die die gesamte Wärmekapazität aller Teilchen, $\overline{v^2}$ das mittlere Geschwindigkeitsquadrat der Teilchen und l die freie Weglänge ist. Betrachtet man nun den Temperaturverlauf der Leitfähigkeit λ in Abbildung 13, so ist zu erkennen, dass sich meistens ein Maximum bildet. Dies liegt daran, dass die Wärmekapazität mit sinkender Temperatur abnimmt, die freie Weglänge hingegen mit steigender Temperatur.

3.5 Wie lautet die Fermiverteilung und welches sind die relevanten Parameter ? Wie groß ist $k_B T$ bei Raumtemperatur (300K)?

Die Fermiverteilung lautet:

$$f(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) + 1}$$

Die Fermiverteilung bestimmt die Besetzungswahrscheinlichkeit möglicher Energiezustände der Energie E im thermodynamischen Gleichgewicht. Der relevante Parameter ist hierbei die Fermienergie E_F , welche angibt bis zur welcher Energie Zustände bei der Temperatur $0K$ besetzt sind. Durch eine Temperaturerhöhung können nun auch höher energetisch liegende Zustände besetzt werden. Die thermische Energie $k_B T$ beträgt bei Raumtemperatur ungefähr $26meV$.

3.6 Welche physikalischen Größen verknüpft das Wiedemann-Franzsche Gesetz?

Das Wiedemann-Franzsche Gesetz verknüpft über die Fermiverteilung die thermische Leitfähigkeit mit der elektrischen Leitfähigkeit bis auf einen konstanten Faktor L , der Lorentzzahl. Die Lorentzzahl beträgt $2.44 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2}$. Das Wiedemann-Franzsche Gesetz lautet :

$$\frac{\lambda_{el}}{\sigma T} = \frac{(\pi \cdot k_B)^2}{3e^2} = L$$

4 Ladungstransport in Festkörpern

4.1 Was versteht man unter Energiebändern?

Betrachtet man einen Festkörper, so ergibt sich ein periodisches Coulombpotential mit erhöhtem Potential an der Oberfläche des Materials (siehe Abbildung 14). Nähert man das Coulombpotential wieder mit einer Anordnung von Potentialtöpfen und löst hierfür die Schrödingergleichung, so ergeben sich statt diskreten Lösungen Intervalle von gültigen Lösungen, den Energiebändern. Dies ist einer Aufspaltung der diskreten Energieniveaus in Bänder zurückzuführen. Siehe hierfür Abbildung 15.

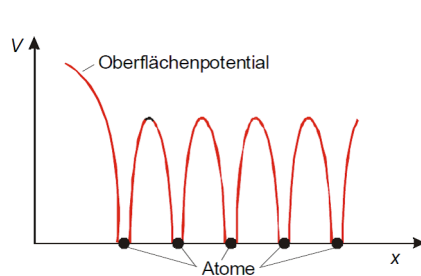


Abbildung 14: Periodisches Potential im Festkörper

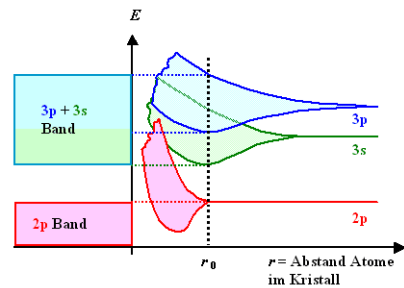


Abbildung 15: Auspaltung Energieniveaus

4.2 Warum treten verbotene Bänder auf?

Verbotene Bänder treten deshalb auf, da die Diskretisierung der Energieniveaus im Atommodell bei der Aufspaltung zum Teil erhalten bleibt. Siehe hierzu Abbildung 15.

4.3 Wie ist die effektive Masse definiert? Welchen Vorteil bietet die Verwendung dieser Größe?

Die effektive Masse berücksichtigt den Einfluss des Gitterpotentials auf das Elektron:

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E(k) / dk^2}$$

Der Vorteil der Einführung der effektiven Masse ist, dass wieder mit den Formeln für ein freies Elektron gerechnet werden kann, indem in den ursprünglichen Formeln die Masse der freien Elektronen mit der effektiven Masse ersetzt wird. Die effektive Masse ist stets kleiner als die Elektronenmasse, da das Coulombpotential im Kristall, im Vergleich zum Atom, verringert wird (siehe Abbildung 14).

4.4 Wie ist der Bandabstand eines Festkörpers definiert?

Der Bandabstand E_g ist der energetische Abstand zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband. Das Valenzband ist im Allgemeinen das höchste besetzte Energieband am absoluten Temperatur-Nullpunkt bzw. es sind die Bänder, deren Elektronen (Valenzelektronen) zur chemischen Bindung beitragen, und somit auch die höchste Energie besitzen. Das Leitungsband bezeichnet das Energieband, das am absoluten Temperatur-Nullpunkt über dem Valenzband liegt.

4.5 Diskutieren Sie anhand des Bändermodells die Unterschiede zwischen Isolatoren, Halbleitern und Metallen.

Bei Metallen gibt es zwei Möglichkeiten der Bänderanordnung. Die erste Möglichkeit ist, dass das Valenzband nur zum Teil mit Elektronen gefüllt ist und somit freie Zustände innerhalb des Bandes vorhanden sind. Dadurch stehen Elektronen zum Ladungstransport bereit. Die zweite Möglichkeit ist, dass das Valenzband mit dem Leitungsband(hier auch zweites Valenzband genannt) überlappt und dadurch eine Leitfähigkeit bereitgestellt wird.

Bei Isolatoren ist das Valenzband vollkommen gefüllt. Außerdem ist die Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband so groß, dass Elektronen nicht durch thermische Anregung in das unbesetzte Leitungsband angehoben werden könnten. Es stehen also keine Elektronen zur Leitfähigkeit bereit.

Bei Halbleitern zuletzt ist das Valenzband ebenfalls vollkommen gefüllt. Die Bandlücke beträgt aber nur einige eV, womit durch thermische Anregung Elektronen in das Leitungsband gehoben werden können. Zusätzlich entsteht ein freier Platz im Valenzband.

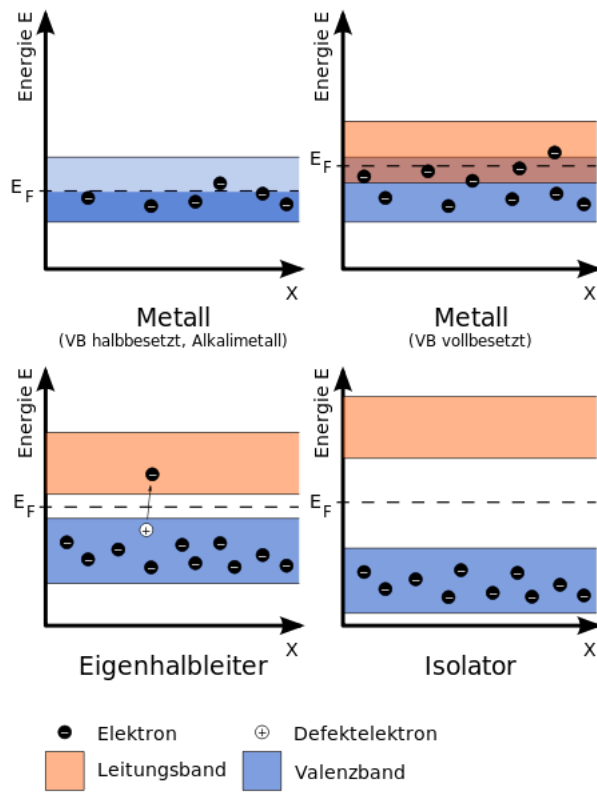


Abbildung 16: Bändermodell verschiedener Materialien

5 Elektrische Eigenschaften der Metalle, Supraleitung

5.1 Erläutern Sie die Mattiessensche Regel. Wodurch wird der Restwiderstand bestimmt?

Sie besagt allgemein, dass der spezifische Widerstand ρ für mehrere voneinander unabhängige Streuprozesse sich aus der Summe der spezifischen Widerstände der einzelnen Streuprozesse zusammensetzt.

Sie lautet:

$$\rho = \rho_{ph} + \rho_i$$

Die Streuung an Gitterschwingungen, die ρ_{ph} verursacht, ist temperaturabhängig, da die Streuwahrscheinlichkeit von der Anzahl an Phononen abhängt. Damit folgt, dass der spezifische Widerstand mit der Temperatur zunimmt. Für tiefe Temperaturen gilt für den Phononenanteil $\rho_{ph} \propto T^5$ und es bleibt ein Restwiderstand ρ_i , der durch die Streuung an Verunreinigungen verursacht wird. Der Restwiderstand ρ_i ist ein Maß für die Reinheit eines Metalls. Abbildung 17 veranschaulicht den Verlauf des spezifischen Widerstandes.

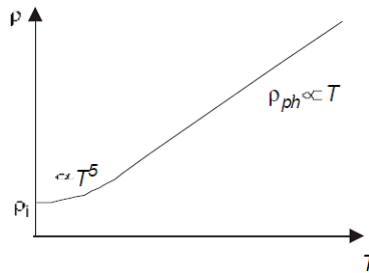


Abbildung 17: Verlauf spezifischer Widerstand

5.2 Wie hängt die Leitfähigkeit einer Legierung prinzipiell von Mischungsverhältnis ab?

Mit der Gleichung:

$$\sigma = 1/\rho$$

kann man, anhand des spezifischen Widerstandes Aussagen über die Leitfähigkeit treffen. Bei Legierungen nimmt der spezifische Widerstand mit steigender Unreinheit zu, d.h. die Leitfähigkeit nimmt ab. Die größte Legierungsstreuung erfolgt etwa in der Mitte des Mischungsverhältnisses. Liegen jedoch geordnete intermetallische Phasen vor, wobei das Mischungsverhältnis stöchiometrisch ist, dann nimmt der Widerstand stark ab und die Leitfähigkeit stark zu. Siehe hierzu Abbildung 18.

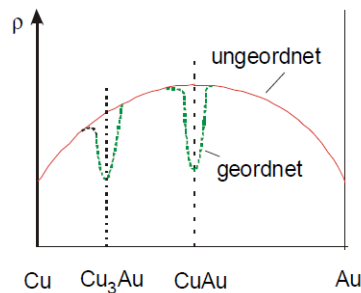


Abbildung 18: spezifischer Widerstand bei Legierungen

5.3 Warum ist die elektrische Leitfähigkeit temperaturabhängig?

Der Anteil ρ_i der spezifischen Leitfähigkeit ist im normaleitenden Fall temperaturunabhängig, da dieser nur von der Reinheit des Kristalls bestimmt wird. Ausnahmen ergeben sich bei der Supraleitung. Der phononenabhängige Anteil ρ_{ph} hingegen ist temperaturabhängig, da mit steigender Temperatur beispielsweise mehr Phononen im Kristall entstehen, an denen Streuung auftritt.

5.4 Welche Metalle weisen die höchsten Leitfähigkeiten auf?

Die besten Leiter sind:

Ag (Silber) mit $\sigma = 62.5 \cdot 10^4 \frac{S}{cm}$ und Cu (Kupfer) mit $\sigma = 58.1 \cdot 10^4 \frac{S}{cm}$.

5.5 Welche Anforderungen werden an Kontaktwerkstoffe gestellt?

Kontaktwerkstoffe sind Werkstoffe, welche in elektrische Verbindung mit gleichartigen oder ungleichartigen Werkstoffen treten. Die Anforderungen an Kontaktwerkstoffe sind:

- geringer Übergangswiderstand
- geringe Elektronenmigration
- Korrosionsbeständigkeit
- Verschleißfestigkeit

5.6 Was geschieht bei der Korrosion von Metallen?

In Wasser löst sich das Metall nur in Form von positiv geladenen Ionen auf. Die bei der metallischen Bindung als *Elektronengas* frei gewordenen Elektronen verbleiben im Festkörper und laden ihn negativ auf. Das elektrostatische Feld hemmt den Lösungsprozess, so dass sich bei einem bestimmten negativen Potential des Metalls ein Gleichgewichtszustand einstellt. Durch diesen Prozess verliert das Metall seine ursprünglichen Eigenschaften.

5.7 Wie funktioniert ein Thermoelement und wie mißt man damit die Temperaturen (Schaltungsskizze)? Welche Empfindlichkeit ($\Delta U/\Delta T$) ist erreichbar?

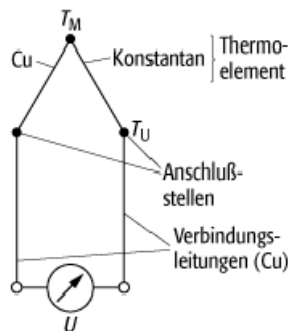


Abbildung 19: Schaltungsskizze Thermoelement

Ein Thermoelement ist eine Anordnung von zwei Metalle mit unterschiedlichem Seebeckkoeffizienten. Hierbei wird Wärme in elektrische Energie umgewandelt. Eine Temperaturdifferenz erzeugt durch einen

Wärmefluss der Elektronen eine elektrische Spannung. Sie kann gemessen werden und ist proportional der Differenz der Thermokräfte und dem Temperaturunterschied beider Lötstellen. Die erreichbare Empfindlichkeit ist $\frac{\Delta U}{\Delta T} = S$. Der Seebeckkoeffizient S verknüpft also einen Temperaturgradienten mit der entstehenden elektrischen Spannung in einem Leiter. Die einfache Idee direkt an einem einzigen Leiter diese Potentialdifferenz zu messen schlägt fehl, weil die Enden zum Messen bei gleicher Temperatur sein müssen, da man sonst zusätzlich die in der Messleitung entstehende Thermospannung misst.

5.8 Erklären Sie den Peltier-Effekt.

Beim Peltier-Effekt wird ein aufgeprägter Strom benutzt, um Wärme zu transportieren. Die elektrische Stromdichte \vec{j} ist mit einer Teilchenstromdichte verknüpft. Die Teilchen transportieren dabei eine thermische Energie entsprechend ihrer mittleren kinetischen Energie. Die Formel, welche die Wärmestromdichte w über die Peltierkonstante Π mit elektrischen Stromdichte j verknüpft, lautet:

$$w = \Pi \cdot j$$

5.9 Was ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt?

Supraleitung entsteht durch ein Abkühlen des Materials auf tiefe Temperaturen. Ab einer Sprungtemperatur T_c verschwindet der spezifische Restwiderstand und es tritt unendlich hohe Leitfähigkeit auf. Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt beschreibt zusätzlich den perfekten Diamagnetismus von Supraleitern : im supraleitenden Zustand werden Magnetfelder aus dem Material herausgedrängt. Das passiert, weil Ströme auf der Oberfläche des Leiters generiert werden, die ein zu dem äußeren angelegten magnetischen Feld entgegengesetztes Feld erzeugen. Das ganze passiert auch ohne eine Induzierung des Stroms, wie es beim idealen Leiter notwendig wäre. Abbildung 20 verdeutlicht nochmals, dass beim idealen Leiter eine Änderung des Magnetfeldes zur Erzeugung von Strömen und somit von Magnetfeldern notwendig ist. Beim Supraleiter werden Ströme ohne Induzierung erzeugt, um das Magnetfeld abzuschirmen.

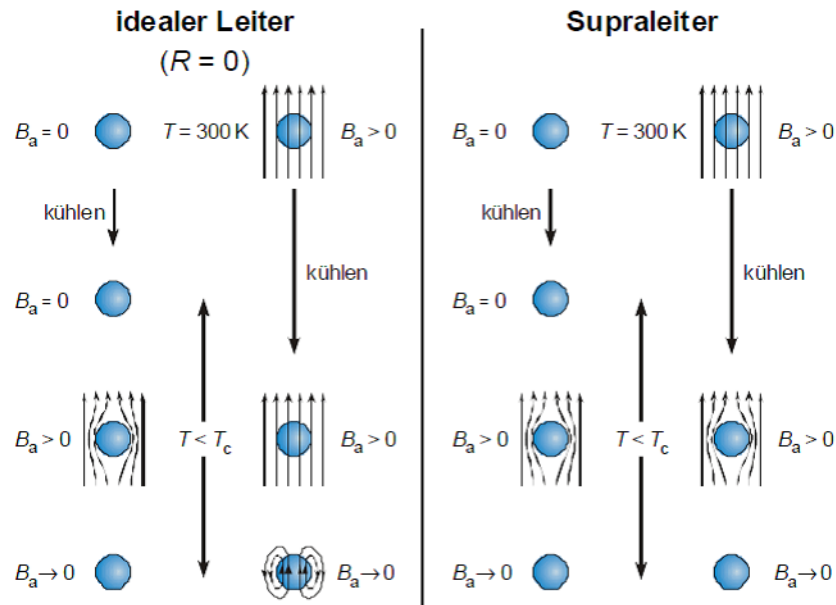


Abbildung 20: Meißner-Ochsenfeld-Effekt

5.10 Welche äußeren Einflüsse können die Supraleitung zerstören?

Die Supraleitung wird natürlich abgebrochen, wenn die Temperatur des Materials größer als die Sprungtemperatur wird. Außerdem zerstören sehr starke Magnetfelder ($H > H_c$) die Supraleitung. Die Formel für die kritische Feldstärke lautet:

$$H_c = H_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right)$$

5.11 Was unterscheidet einen Supraleiter von einem idealen Leiter?

Der Unterschied zwischen einem idealen Leiter und einem Supraleiter wird durch den Meißner-Ochsenfeld-Effekt beschrieben. Siehe hierzu Frage 5.10 und Abbildung 20!

6 Halbleiter

6.1 Was versteht man unter effektiver Zustandsdichte und wie hängt diese von der effektiven Masse ab?

Verwendet man bei der Berechnung der Elektronendichte n die Boltzmannnäherung der Fermiverteilung, ergibt sich folgender Ausdruck:

$$n = N_L^* \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

N_L^* ist die effektive Zustandsdichte für Elektronen. Die zuvor im Energiebereich $\Delta E = k_B T$ verteilten Zustände werden durch einen Dirac der Höhe N_L^* an der Bandkante beschrieben. Man ordnet somit also allen Elektronen die Energie der Bandkante E_L zu. Selbige Überlegungen gelten für das Valenzband und die Löcher. Die Zustandsdichte der Elektronen lautet:

$$N_L^* = 2M_L \left[\frac{m_n^* \cdot k_B T}{2\pi \hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

M_L beschreibt die Anzahl der äquivalenten Leitungsbandminima. Indirekte Halbleiter besitzen mehr als ein Leitungsbandminima, diese Entartung wird in M_L berücksichtigt. m_n^* ist die effektive Masse der Elektronen. Abbildung 21 veranschaulicht das Bild der effektiven Zustandsdichten.

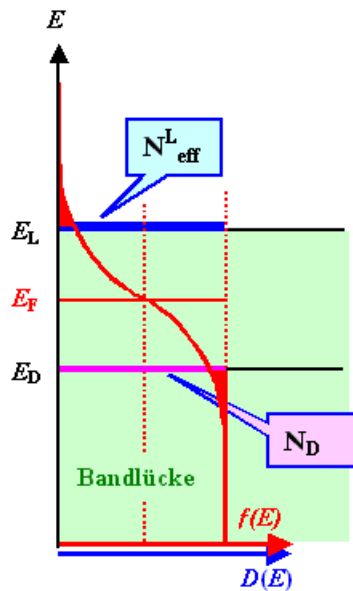


Abbildung 21: effektive Zustandsdichten

6.2 Welchen Wert besitzt die intrinsische Ladungsträgerdichte von Silizium bei Raumtemperatur und wie hoch sind typische Dotierungen von p- und n-Silizium?

Bei dem intrinsischen Halbleiter Silizium (keine Dotierung) beträgt die Ladungsträgerdichte der Elektronen, sowie der Löcher bei Raumtemperatur ungefähr $1.5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}$. Dotierungen sind mehrere Größenordnungen höher als die intrinsischen Ladungsträgerdichten und bewegen sich im Bereich von $10^{16} - 10^{21} \frac{1}{\text{cm}^3}$.

6.3 Warum sind Halbleiter mit kleinem Bandabstand für Hochtemperaturanwendungen schlecht geeignet?

Halbleiter in Hochtemperaturanwendungen sollten auch bei hohen Temperaturen ihr Verhalten nicht stark ändern. Bei Halbleitern mit kleinem Bandabstand werden jedoch durch Temperaturzufuhr viele Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband gehoben, wodurch sich das elektrische Verhalten des Halbleiters ändert. Halbleiter mit größeren Bandabständen sind also weniger temperaturempfindlich.

6.4 Wann spricht man von entarteter Dotierung eines Halbleiters?

Bei sehr hohen Dotierstoffkonzentrationen ($N_D > N_L^*$ oder $N_A > N_V^*$) entarten die Halbleiter. Aus den lokalisierten Donator- bzw. Akzeptorzuständen werden ebenfalls Bänder von erlaubten Zuständen, die sich schließlich mit dem Leitungs- bzw. dem Valenzband vereinigen. Der Bandabstand verringert sich und wird unscharf. Die Fermi-Energie liegt nun im Leitungs- bzw. Valenzband. Der Halbleiter hat quasi metallisches Verhalten.

6.5 Erläutern Sie die Begriffe Störstellenschöpfung und Störstellenreserve.

Bei dotierten Halbleitern hängt die Dichte der Ladungsträger stark von der Temperatur ab. Zum einen aufgrund der Temperaturabhängigkeit der intrinsischen Ladungsträger, zum anderen durch die Abhängigkeit der Ionisierung der Dotieratome. Bei niedrigen Temperaturen sind die Dotieratome nur zum Teil ionisiert und es stehen noch zusätzliche nicht aktivierte Ladungsträger zur Verfügung, d.h. es besteht eine Störstellenreserve. Bei höheren Temperaturen tritt die Störstellenschöpfung ein, alle Dotieratome sind ionisiert. Bei sehr hohen Temperaturen überwiegen dann wieder die intrinsischen Ladungsträger und der Halbleiter zeigt wieder nahezu intrinsisches Verhalten. Abbildung 22 zeigt diesen Vorgang.

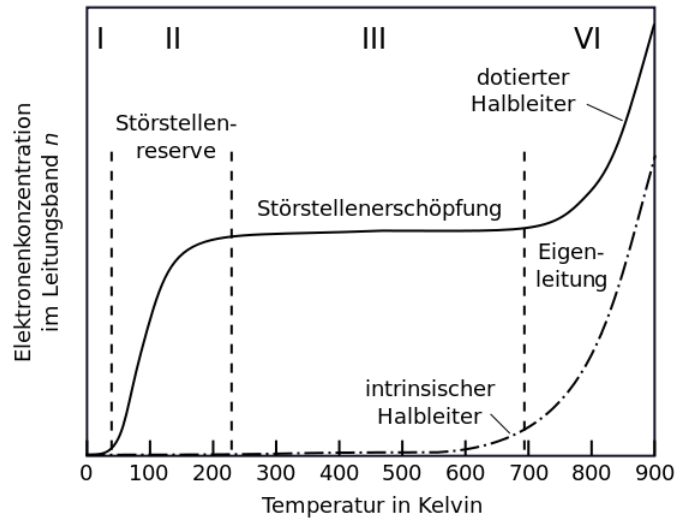


Abbildung 22: Temperaturabhängigkeit von Halbleitern

6.6 Was ist die Ionisierungsenergie einer Störstelle. Wie hängt sie von der Konzentration der Ladungsträger ab?

Die Ionisierungsenergie einer Störstelle ist diejenige Energie, welche notwendig ist, um eine Störstelle zu ionisieren. Bei einem Donator beispielsweise muss ein Elektron vom Dotieratom gelöst und in das Leitungsband gehoben werden. Bei hohen Dotierungen beeinflussen die bereits freien Ladungsträger die Ionisierungsenergie, indem sie das Coulombpotential der ionisierten Störstellen abschirmen. Dadurch wird die Ionisierungsenergie geringer.

6.7 Wie ist die Beweglichkeit definiert und welche Dimensionen besitzt sie? Diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit!

Die Ladungsträgerbeweglichkeit μ ist folgendermaßen definiert :

$$\mu = \frac{e \cdot \tau}{m^*}$$

Hierbei steht m^* für die effektive Masse (Elektronen oder Löcher) und τ für die mittlere Zeit zwischen 2 Stößen des Teilchens. Die Dimension der Beweglichkeit ist $\frac{cm^2}{Vs}$. Die Beweglichkeit nimmt mit steigender Temperatur zuerst zu, da die Streuung an ionisierten Störstellen mit steigender thermischer Energie der Elektronen abnimmt. Nimmt die Temperatur weiter zu, sinkt die

Beweglichkeit jedoch wieder, da die Phononenstreuung einsetzt. Abbildung 23 verdeutlicht dies.

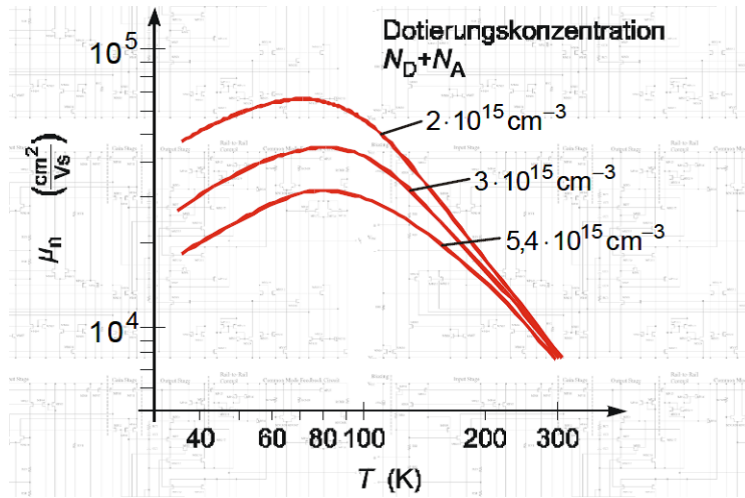


Abbildung 23: Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit

7 Dielektrische Eigenschaften von Festkörpern

7.1 Was versteht man unter der elektrischen Polarisation? Welche Dimension besitzt sie?

Die Polarisation \vec{P} beschreibt den Einfluss des Mediums auf das elektrische Verschiebungsfeld \vec{D} im Vergleich zum Vakuum. So ist der Anteil der elektrischen Flussdichte, der nicht durch die Permittivität des Vakuums erzeugt wird, die Polarisation \vec{P} des Körpers. Somit gilt :

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

Aufgrund ihrer Polarisierbarkeit α orientieren, oder bilden sich Dipole in einem Medium, wenn sich dieses in einem äußeren Feld befindet. Somit wird die Polarisation durch eben diese Dipole gebildet: $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$. χ ist die Suszeptibilität des Körpers, welche mit der Polarisierbarkeit α verknüpft ist. Die Dimension der elektrischen Polarisation ist $\frac{As}{m^2}$.

7.2 Warum weist ein Festkörper mit komplexer Permittivität Verluste auf? Warum gibt man diese zumeist in Form des $\tan \delta$ an?

Eine komplexe Permittivität hat die Form $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'')$. Durch Einsetzen sieht man, dass der Imaginärteil ϵ'' die in-Phase-Komponente von \vec{j} , oder anders gesagt ϵ'' im Realteil von \vec{j} ist. Wegen dieses Realteils des elektrischen Stroms wird genau der Verlust erzeugt und deswegen weist ein Körper mit komplexer Permittivität Verluste auf. $\tan \delta$ entspricht dabei $\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$, was genau der Verlustfaktor ist.

7.3 Wie hängt der Imaginärteil der Permittivität mit der elektrischen Leitfähigkeit zusammen?

Die Leitfähigkeit beschreibt den frequenzabhängigen Imaginärteil der relativen Permittivität, also ϵ'' . Der Zusammenhang lautet: $\epsilon'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$, ϵ'' nimmt also mit kleinen Frequenzen zu.

7.4 Welche Polarisationsmechanismen gibt es?

Es gibt elektronische Polarisation, ionische Polarisation und Orientierungspolarisation.

1. Elektronische Polarisation kommt durch Verschiebung der Ladungsschwerpunkte in einem Atom zustande
2. Die ionische Polarisation tritt auf, wenn man man an einem polaren Material, z.B einem Ionenkristall ein \vec{E} -Feld anlegt.

3. Die Orientierungspolarisation ist die Orientierung der permanenten Dipole eines Körpers entlang des angelegten \vec{E} -Felds. Die Dipole sind auch ohne externes Feld vorhanden, sind aber nicht gerichtet sondern aufgrund der Wärmebewegung statistisch gestreut.

7.5 Skizzieren Sie die prinzipielle Frequenzabhängigkeit der komplexen Permittivität.

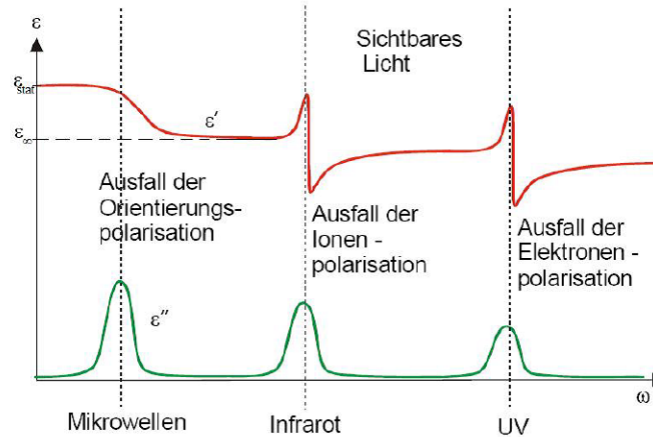


Abbildung 24: Frequenzgang der komplexen Permittivität

In Abbildung 24 ist die Frequenzabhängigkeit des Real- und Imaginärteils der relativen Dielektrizitätskonstante eines allgemeinen Körpers gegeben. Es treten elektronische, Ionen- und Orientierungspolarisation auf. Die erste Polarisation welche ausfällt ist die Orientierungspolarisation, da diese höheren Frequenzen nicht mehr folgen kann. Ab sehr hohen Frequenzen tritt keine Polarisation mehr auf und die relative Dielektrizitätskonstante ϵ bzw. ϵ_r geht gegen 1. Der Imaginärteil ϵ'' ist im wesentlichen im Bereich der Dipolrelaxationsfrequenz und der Eigenfrequenzen der Elektronischen und Ionenpolarisation von null verschieden.

Der für die Elektrotechnik relevante Bereich endet bei ungefähr 100 GHz. Hier ist die Permittivität somit im wesentlichen von der Orientierungspolarisation (χ_{Dipol}) bestimmt. Die Permittivität kann hier vereinfacht dargestellt werden als:

$$\epsilon'(\omega) = 1 + \chi'_{Ion}(0) + \chi'_{el}(0) + \chi'_{Dipol}(\omega)$$

$$\epsilon''(\omega) \approx \chi''_{Dipol}(\omega)$$

7.6 Was ist Ferroelektrizität und welche Temperaturabhängigkeit besitzt sie?

Ferroelektrizität ist die Eigenschaft, dass ein Körper bereits ohne ein angelegtes \vec{E} -Feld polarisiert ist. Also befinden sich im ferroelektrischen Kristall Domänen, bei den wegen starker Wechselwirkung zwischen den elementaren Dipolen, viele Nachbaratome sich gleichartig ausrichten. Die spontanen Dipole verschwinden, wenn die charakteristische Curie-Temperatur T_C überwunden wird, da wegen der starken Wärmebewegung die Wechselwirkung der elementaren Zellen zerstört wird. Über T_C werden ferroelektrische Stoffe also Paraelektrika und gehorchen dem Curie-Weiss-Gesetz $\chi = \frac{C}{T-\Theta}$, wobei die Suszeptibilität mit weiterem Temperaturanstieg abnimmt. Hierbei ist die Weiss-Konstante Θ ungefähr die Curietemperatur T_C und C ist die Curiekonstante.

7.7 Was ist der Unterschied zwischen Piezoelektrizität und Elektrostriktion?

Piezoelektrizität beschreibt den Effekt einer Polarisierung durch mechanische Verformung eines Körpers ohne äußeres \vec{E} -Feld. Die Elektrostriktion dagegen ist durch das angelegte Feld erzeugt, indem der Körper von dem Feld gestört wird. Die Längenänderung kommt wegen Polarisierung und \vec{E} -Feld zustande und ist quadratisch zum Feld, es gilt also $\frac{\Delta l}{l} \propto |\vec{E}|^2$. Außerdem gibt es bei Piezoelektrizität den inversen Effekt, d.h. durch ein angelegtes \vec{E} -Feld wird eine mechanische Spannung σ erzeugt. Der inverse Effekt der Elektrostriktion tritt nicht auf. Ein anderer Unterschied ist, dass Piezoelektrizität nur bei Kristallen ohne Inversionsschicht, Elektrostriktion aber auch in solchen Kristallen mit Inversionsschicht, auftritt.

8 Magnetische Eigenschaften von Festkörpern

8.1 Wie sind magnetische Polarisation und Suszeptibilität definiert?

Die beiden entscheidenden Größen im Magnetismus sind die magnetische Feldstärke \vec{H} und die magnetische Flussdichte \vec{B} . Hierbei gilt:

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

μ_0 ist die magnetische Feldkonstante (vergleichbar mit ϵ_0) und μ_r ist die relative magnetische Permeabilität (vergleichbar mit ϵ_r). Im Vakuum ist $\mu_r = 1$ und somit beschreibt die Permeabilität den Einfluss des Mediums auf ein magnetisches Feld. Außerdem gilt:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}$$

Dabei ist \vec{J} die magnetische Polarisation (vergleichbar mit der elektrischen Polarisation). Die magnetische Suszeptibilität χ^m ist nun definiert als:

$$\chi^m = \mu_r - 1 = \frac{|\vec{J}|}{\mu_0 |\vec{H}|}$$

8.2 Wodurch werden der Dia- und Paramagnetismus verursacht und wie hängen sie von der Temperatur ab?

Bei dem Diamagnetismus ($\mu_r < 1$) stellt sich im Körper ein dem äußeren magnetischen Feld entgegengesetztes Feld ein. Er tritt immer auf und wird durch die induzierte Lorentzkraft auf ein umlaufendes Elektron verursacht (Bohr'sches Atommodell). Dadurch versucht das Elektron seine Umlauffrequenz um die Larmorfrequenz ω_L zu vergrößern. Da der Drehimpuls jedoch gequantelt ist, muss das Elektron nun der Lorentzkraft unter Beibehaltung des Drehimpulses durch Präzessionsbewegung mit der Frequenz ω_L ausweichen. Dadurch entsteht ein *zusätzlicher* Drehimpuls L_{dia} und damit ein gegen das äußere Feld gerichtetes magnetisches Moment. Da der Diamagnetismus also von der Bewegung des Elektrons um den Atomkern abhängt, ist er temperaturunabhängig.

Der Paramagnetismus beruht auf der Ausrichtung permanenter magnetischer Dipole in Richtung des äußeren Feldes. Das magnetische Dipolmoment setzt sich nun aus Bahndrehimpuls L und Spindrehimpuls S zusammen. Mit dem Gesamtdrehimpuls $J = L + S$ gilt :

$$M_z = g(-\mu_B)J$$

Sind die Elektronenschalen folglich nicht abgeschlossen, ergibt sich ein Netto-Gesamtdrehimpuls und damit ein permanentes magnetisches Dipolmoment. Beim Paramagnetismus interessiert nun das Zusammenspiel dieser einzelnen magnetischen Momente jedes Atoms. Diese sind durch Temperaturbewegung statistisch verteilt und somit gilt:

$$M_{para} \propto \frac{1}{T}$$

Beim Paramagnetismus ergibt sich ohne äußeres Feld jedoch im Gegensatz zum Ferromagnetismus keine permanente Netto-Magnetisierung!

8.3 Welches magnetische Verhalten zeigen Leitungselektronen?

Leitungselektronen in Metallen besitzen auch einen Eigendrehimpuls s und damit eine verbundene Magnetisierung m_{spin} . Es gilt:

$$m_{spin} = -2\mu_B s_z$$

Somit ist die Magnetisierung antiparallel zur z-Komponente des Spins. Ohne äußeres Feld gleichen sich die Leitungselektronen im Spin genau aus. Wird ein Feld angelegt so steigt die Energie der Elektronen mit antiparalleler Magnetisierung zum magnetischen Feld (bzw. parallelem Spin) und entsprechend sinkt die Energie der Elektronen mit paralleler Magnetisierung (siehe Abbildung 25). Nun muss durch Umklappen von **parallelen** Spins, das Fermi-niveau ausgeglichen werden. Somit entsteht eine paramagnetische Nettomagnetisierung.

Quelle:<http://www.wmi.badw.de/teaching/LectureNotes/magnetismus/Kapitel-5.pdf>

8.4 Was ist Ferromagnetismus und welche Materialien weisen ihn auf?

Der Ferromagnetismus ($\mu_r \gg 1$) beruht auf der spontanen Ausrichtung der elementaren Dipole durch gegenseitige Wechselwirkung im Kristallgitter ohne Einwirkung eines äußeren Feldes. Die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt, sowie Legierungen aus diesen Stoffen sind ferromagnetische Stoffe.

8.5 Nennen sie Beispiele und Anwendungen für Ferromagnetika?

Beispiele sind Fe, Ni und Co. Anwendungen sind zum Beispiel Dauermagnete (harte Magnetisierung) oder Bleche für Transformatorkerne (weiche Magnetisierung).

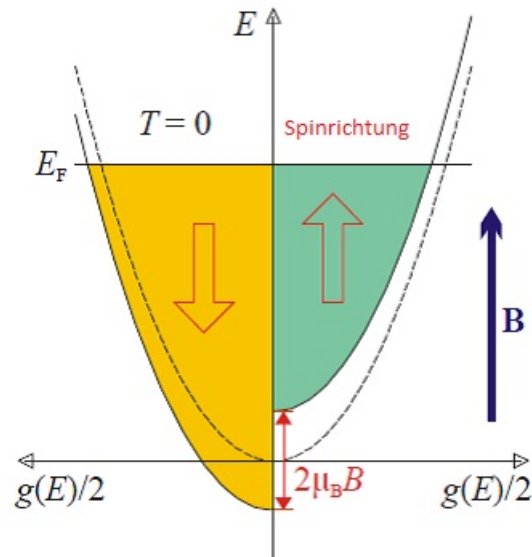


Abbildung 25: Magnetisierung der Leitungselektronen in Metallen

8.6 Was sind Weiss'sche Bezirke?

Weiss'sche Bezirke treten in Ferromagnetika auf und kennzeichnen Domänen mit einheitlicher Magnetisierung. So kann ein Ferromagnet aus mehreren Domänen mit unterschiedlicher Magnetisierung bestehen, sodass keine äußere Magnetisierung messbar ist. Der Ferromagnet muss erst aufmagnetisiert, sprich die Domänen ausgerichtet werden.

8.7 Welche Materialien sind für Dauermagnete besonders gut geeignet?

Betrachtet man die Hysteresekurve eines Ferromagnetikums in Abbildung 26 erkennt man den Zusammenhang zwischen äußerem Magnetfeld \vec{B} und Magnetisierung des Ferromagneten \vec{M} . Schaltet man das Feld nach einer "Aufmagnetisierung" aus, so bleibt eine remanente Magnetisierung M_r bestehen. Um die remanente Magnetisierung zu beseitigen, muss ein entgegengesetztes Feld vom Betrag der Koerzitivfeldstärke B_k aufgebracht werden. Für Dauermagnete muss ein großer Widerstand gegen eine Ummagnetisierung, also eine große Koerzitivfeldstärke B_k bestehen.

8.8 Warum treten beim Durchlaufen der Magnetisierungskurve (Bild 8.13) Verluste auf? Wie sehen Magnetisierungskurven mit niedrigen bzw. hohen Verlusten aus?

Die Fläche innerhalb der Hysteresekurve aus Abbildung 26 ist ein Maß für die Verluste bei der Ummagnetisierung durch irreversible Wandverschiebungen. Weitere Verluste werden durch Wirbelströme (bei leitfähigen Werkstoffen) oder in Ferriten durch Elektronenplatzwechsel und damit verbundener Änderung der Magnetisierung ($Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$) verursacht. Bei niedrigen Verlusten muss also eine schmale und niedrige Magnetisierungskurve vorliegen, um eine kleine Fläche unter der Kurve und damit geringe Verluste sicherzustellen.

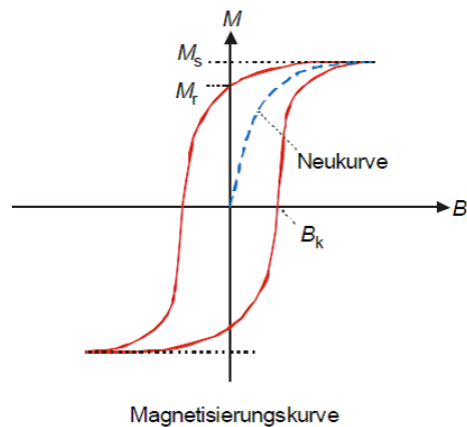


Abbildung 26: Hysteresekurve Ferromagnetika