

8.1.4 Merkmale zu Kapitel 8.1: Leitfähigkeit, Ladungsträgerdichte und Beweglichkeit

Das **Ohmsche Gesetz** ist nur sinnvoll für **spezifische** Größen:

- $j = \text{Stromdichte}$
- $E = \text{Feldstärke}$
- Wesentliche Materialkonstante ist: **Leitfähigkeit** σ oder **spez. Widerstand** ρ .

$$j = \sigma \cdot E$$

$$\sigma = 1 / \rho$$

Typische Werte sind wichtig!

- Man muss mit den ca. **1 $\mu\Omega\text{cm}$** guter reiner Metalle (**Ag, Cu**) leben, man kann sie immer nur verschlechtern (Defekte, Legieren, ...), aber nie besser machen.

$$\rho \text{ (Metall)} \approx 1 \mu\Omega\text{cm}$$

$$\rho \text{ (Halbleiter)} \approx 1 \Omega\text{cm}$$

$$\rho \text{ (Isolator)} \approx 1 \text{ G}\Omega\text{cm}$$

Elektrische Stromdichte ist ein **Netto**strom geladener Teilchen, gegeben durch Zahl der Ladungen = Teilchen, die pro Sekunde mit einer mittleren **Netto**geschwindigkeit v_D durch einen **cm²** fließen.

- Das lässt sich immer so schreiben \Rightarrow
- Die Driftgeschwindigkeit v_D , verursacht durch das elektrische Feld, ist aber extrem klein gegenüber der mittleren thermischen Geschwindigkeit v_{therm}
- Für die Leitfähigkeit ergibt sich sofort \Rightarrow
- Damit ist ein neuer, sehr wichtiger Materialparameter, die **Beweglichkeit** μ definiert.
- Das Ohmsche Gesetz ist nun hergeleitet, in der "Materialform" schreibt es sich \Rightarrow

$$j = q \cdot n \cdot v_D$$

$$\sigma := \frac{q \cdot n \cdot v_D}{E} = \text{constant}$$

$$\frac{v_D}{E} := \mu = \text{constant}$$

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu$$

Die Dichten n_{Met} der Ladungsträger in Metallen n_{Met} und Isolatoren n_{Iso} sind von der Größenordnung her bekannt: Ungefähr Dichte Atome bzw um Null.

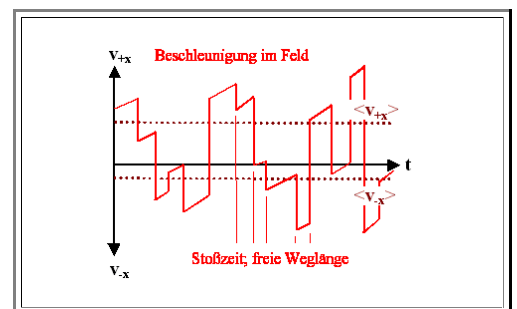
- Es bleibt, die Beweglichkeit μ zu bestimmen
- Bei Halbleitern ist n_{Halb} noch nicht klar, hier brauchen wir n_{Halb} und μ_{Halb} .

$$n_{\text{Met}} \approx \text{Atome}$$

$$n_{\text{Iso}} \approx 0$$

Eine relativ simple Betrachtung des Herumwuselns von Elektronen in Kristallen ergibt folgende Beziehungen:

- Stöße zwischen Elektronen und den den Hauptstoßpartner "Phononen" = Träger der thermischen Energie = anderes Wort für (quantisierte) Gitterschwingungen und Kristallgitterdefekten (Fremdatomen, Korngrenzen, Versetzungen, Ausscheidungen, ...) sorgen für eine im Mittel konstante Driftgeschwindigkeit.
- Charakteristische Parameter dazu sind die (mittlere) **Stoßzeit** τ und die **mittlere freie Weglänge** $l = v\tau$.
- Die Beweglichkeit ist dann direkt gegeben (d.h. proportional) zu $l = v\tau$ oder τ . (Formel muss man nicht wissen).



Die Temperatur bestimmt **klassisch** sowohl v (über $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$) als auch (über Stöße mit "Phononen") zum Teil die Beweglichkeit.

Es kommt Unsinn raus!

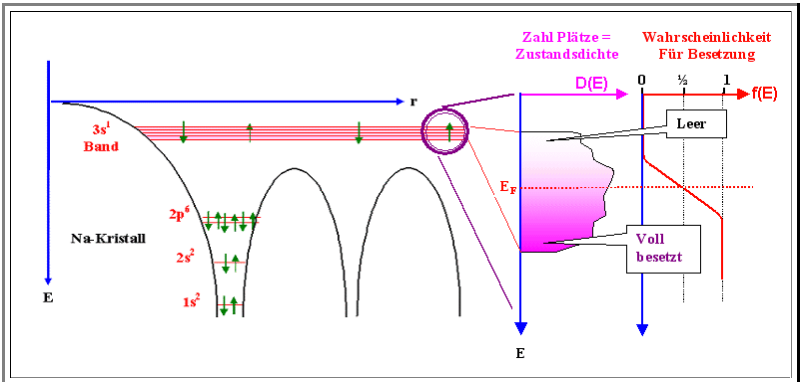
- Für eine gegebene Elektronendichte (z. B. typisches Metall) und eine gemessene Leitfähigkeit kann man damit alle Größen ausrechnen, aber \Rightarrow

Pauli-Prinzip!

- Elektronen können *nicht* mit beliebigen Geschwindigkeiten = Energie = Zuständen existieren; sie können z. B. nicht alle bei $T = 0 \text{ K}$ bewegungslos sein.
- Trotzdem behalten alle obigen Formeln *außer* $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2} k_B T$ auch in der nachfolgenden "richtigen" Betrachtung ihre Bedeutung – wir müssen nur die Geschwindigkeit richtig bestimmen.

Der Gleichverteilungssatz gilt nicht für Fermionen!

Wir müssen die möglichen Zustände für Elektronen (in Metallen) und die Besetzung dieser Zustände als Funktion der Temperatur betrachten. Das nachfolgende Bild enthält die relevante Information:



- Die Elektronenzustände im Metall (Kristall!) formen ein "Band" wie bereits bekannt und hier nochmal gezeigt.
- Von Interesse sind die möglichen Energieniveaus im Band (= *richtige* Energie der herumwuselnden Elektronen). Das wird am einfachsten durch den neuen Begriff *Zustandsdichte* erfasst.
- Entscheidend ist, welche Zustände mit Elektronen besetzt sind. Das regelt die (bereits bekannte) *Fermi-Verteilung*.

Zustandsdichte $D(E) \cdot dE = \text{Zahl der Zustände bei } E \text{ im Intervall } dE \text{ pro cm}^3$

Nur Elektronen im "*Aufweichungsbereich*" der Fermiverteilung sind "handlungsfähig", d. h. nur sie können auf elektrische Felder durch Zustandsänderung reagieren.

- In anderen Bereichen gibt es entweder keine Elektronen (z. B. hohe Energie) oder sie haben keine freien Plätze in der Nachbarschaft (kleine Energiedifferenz), auf die sich "ändern" könnten.
- Damit folgt eine weitreichende Aussage \Rightarrow

Die Bandstruktur der Elektronen in einem Kristall, d. h. $D(E)$, bestimmt die elektronischen Eigenschaften!