

1 Leitungsvorgänge

In *Metallen* können sich Ladungen auf Grund der Gitterstruktur und den darin frei beweglichen Elektronen leicht bewegen. Je höher die Temperatur wird, desto größer werden jedoch die Schwingungsamplituden der Ionen im Metallgitter und desto häufiger kommt es zu Zusammenstößen innerhalb des Metalls, der Widerstand nimmt zu.

In *Halbleitern* sind die Elektronen nicht frei beweglich, sie sind innerhalb der Atome gebunden. Durch Erhöhung der Temperatur können diese jedoch zunehmend gelöst werden. Da die Zunahme der Leitfähigkeit stärker ist, als sich der Widerstand durch die Zusammenstöße erhöht, sinkt der Widerstand insgesamt bei höherer Temperatur.

→ Kennlinie: Temperatur/Widerstand für Halbleiter (+ Metall, zum Vergleich)

2 Leitfähigkeit und Beweglichkeit

Der Widerstand R ergibt sich aus der Länge l , des Querschnittes A und des spezifischen Widerstandes ρ .

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ρ wird als Leitfähigkeit σ bezeichnet. Aus diesem ergibt sich der Leitwert:

$$G = \sigma \cdot \frac{A}{l}$$

Leitfähigkeit

Die *Leitfähigkeit* ergibt sich durch:

$$\sigma = ne\mu$$

Bei Halbleitern werden zusätzlich zu den Elektronen auch die Löcher berücksichtigt:

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

Dabei beschreibt n die Ladungsdichte für Elektronen und p die Ladungsdichte für Löcher. Wobei sich n aus der Anzahl der Elektronen N in einem bestimmten Leiterstück $\Delta V = A\Delta x$ ergibt:

$$n = \frac{N}{\Delta V} = \frac{N}{A\Delta x}$$

μ_n und μ_p ist die *Beweglichkeit* der Ladungsträger bzgl. der Elektronen und der Löcher. Sie ergibt sich aus der Driftgeschwindigkeit v der Ladungsträger in einem elektrischen Feld E :

$$\mu = \frac{v}{E}$$

Falls bei Halbleitern eine der beiden Ladungsträgersorten (Elektronen oder Löcher) überwiegt, kann die Beziehung vereinfacht werden auf:

$$\mu_n = -R_H \cdot \sigma = \frac{\sigma}{ne}$$

bzw.

$$\mu_p = R_H \cdot \sigma = \frac{\sigma}{pe}$$

Dabei ist R_H die Hallkonstante (siehe Abschnitt 5).

Temperaturabhängigkeit

Da der Widerstand von Halbleitern temperaturabhängig ist und sich Querschnitt und Länge des Leiters nur minimal ändern, ist folglich auch die Leitfähigkeit temperaturabhängig. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

Dabei ist σ_0 ein Vorfaktor, E_G die Bandlückenenergie und k_B die Boltzmannkonstante.

3 Thermoelektrischer Effekt und Thermoelement

In *Thermoelementen* wird der Seebeck-Effekt (*Thermoelektrischer Effekt*) genutzt, um eine Temperaturmessung durchführen zu können. Dabei werden zwei unterschiedliche Metalle verbaut. Eine Temperaturdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$ an zwei Messpunkten erzeugt durch den Wärmefluss direkt eine elektrische Spannung.

→ Skizze Thermoelement

Die thermoelektrische Spannung lässt sich für kleine Temperaturbereiche beschreiben als:

$$U_T = a \cdot \Delta T + b \cdot (\Delta T)^2$$

Dabei sind a und b thermoelektrische Materialkonstanten.

Für einen begrenzten Temperaturbereich kann eine Näherung verwendet werden:

$$U_T = a \cdot \Delta T$$

4 Lorentzkraft

Bewegte Ladungen erzeugen Magnetfelder. Ebenso wirkt in einem Magnetfeld \vec{B} auch eine Kraft \vec{F}_L auf eine Ladung q , die sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt. Diese Kraft wird als *Lorentzkraft* bezeichnet.

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Die Kraft ist maximal, wenn sich die Ladung senkrecht und Null, wenn sich die Ladung parallel zum Magnetfeld bewegt. Da Kraft und Geschwindigkeit senkrecht aufeinander stehen, ändert sich durch die Krafteinwirkung nicht der Betrag der Geschwindigkeit, sondern lediglich die Richtung.

5 Hall-Effekt

Bewegen sich Ladungen durch die Coulomb-Kraft in einem elektrischen Feld von links nach rechts und wirkt gleichzeitig eine Lorentzkraft durch ein Magnetfeld, welches die Ladungen nach unten ablenkt, dann kann zwischen dem oberen und dem unteren Punkt eine Spannung gemessen werden.

→ Schematischer Hall-Effekt, Leiterplatte (siehe Praktikumsbuch, S. 185)

Liege eine Leiterplatte mit dem Querschnitt $A = a \cdot d$ in der x,y-Ebene liegt. Das Magnetfeld wird in z-Richtung angelegt, während die Lorentzkraft somit in y-Richtung wirkt. Durch die Lorentzkraft kommt es zu einer Ansammlung von Ladungen und somit zu einem elektrischen Querfeld $E_{H,y}$, das wiederum - im stationären Fall - die oben erwähnten Spannung verursacht. Dabei wirkt die elektrostatische Kraft $F_{E,y} = Q \cdot E_{H,y}$ der Lorentzkraft entgegen. Es folgt:

$$F_{E,y} = F_{L,y}$$

$$QE_{H,y} = Qv_x B_z$$

Das elektrische Querfeld wird als homogen angenommen und ergibt sich aus:

$$E_{H,y} = \frac{U_H}{a}$$

Hall-Spannung

Damit ergibt sich die *Hall-Spannung*:

$$Q \cdot \frac{U_H}{a} = Qv_x B_z$$

$$U_H = av_x B_z$$

Mit der Stromdichte j_x kann die Hall-Spannung erweitert werden. Für die Stromdichte gilt:

$$j_x = nqv_x$$

$$j_x = \frac{I_x}{A} = \frac{I_x}{ad}$$

Dabei ist q die Ladung ($q = -e$ für Elektronen, $q = e$ für Löcher) und n die Ladungsträgerdichte. Damit ergibt sich:

$$U_H = a \cdot j_x \cdot \frac{1}{ad} \cdot B_z$$

$$U_H = a \cdot \frac{I_x}{ad} \cdot \frac{1}{nq} \cdot B_z$$

$$U_H = \frac{1}{nq} \cdot \frac{I_x \cdot B_z}{d}$$

Hall-Konstante

Die *Hall-Konstante* ist eine temperaturabhängige Materialkonstante, die einen Proportionalitätsfaktor für die Hall-Spannung bildet. Für die Hall-Konstante gilt:

$$A_H = \frac{1}{nq} = \frac{\mu}{\sigma}$$

Wobei μ wieder die Beweglichkeit der Ladungsträger beschreibt und σ die elektrische Leitfähigkeit bezeichnet. Damit ergibt sich die Hall-Spannung wie folgt:

$$U_H = A_H \cdot \frac{I_x \cdot B_z}{d} = \frac{\mu}{\sigma} \cdot \frac{I_x \cdot B_z}{d}$$

Anwendung des Hall-Effekts

Der Hall-Effekt kann genutzt werden um die magnetische Flussdichte zu messen, welche sich durch die magnetfeldabhängige Spannung ergibt.

Auch möglich ist die Messung der Ladungsträgerdichte und der Beweglichkeit der Ladungsträger, sofern zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit erfasst wird.

Eine technische Anwendung ist z.B. ein elektronischer Kompass, der mit Hilfe einer Hallsonde funktioniert.