

---

## 2.1 Metalle

Metalle und Metall-Legierungen sind in der Elektrotechnik die wichtigsten elektrisch leitfähigen Materialien. Bei metallischen Leitern kann man (grob und jeweils bei einer Umgebungstemperatur von ca. 20 °C) zwischen sehr gut leitenden Metallen mit einem spezifischen Widerstand kleiner  $0,1 \mu\Omega\text{m}$  und schlecht leitenden Legierungen mit einem spezifischen Widerstand größer  $0,3 \mu\Omega\text{m}$  unterscheiden. Aus sehr gut leitenden Metallen werden z. B. Drähte, Kabel, Steckverbindungen sowie Spulen von Transformatoren und elektrischen Maschinen hergestellt. Legierungen mit hohem Widerstand werden für die Herstellung von Widerstandsbauteilen, Heizdrähten usw. verwendet. Folgende Faktoren sind für die Wahl eines Leitermaterials zur technischen Weiterverarbeitung von Bedeutung:

- Korrosionsverhalten
- Oxidationsverhalten
- Dauerfestigkeit
- Widerstands-Temperaturkoeffizient
- Beständigkeit gegen Chemikalien
- Kosten.

Metalle können somit in gute und schlechte Leiter eingeteilt werden.

Gute Leiter haben einen kleinen elektrischen Widerstand, sie können entsprechende Energie bzw. Leistung führen, ohne dass in ihnen nennenswerte Verluste entstehen (Verlustleistung in Form von unerwünschter Wärme).

Selektionskriterien für Leiter sind:

- elektrischer Widerstand des Materials
- Widerstands-Temperaturkoeffizient

- Beständigkeit gegen Korrosion
- Oxidationscharakteristik
- Verarbeitbarkeit beim Lötten oder Schweißen
- mechanische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit
- natürliches Vorkommen (ausreichende Verfügbarkeit)
- Beständigkeit gegen Chemikalien und Umwelt
- Kosten, Recyclbarkeit.

### 2.1.1 Elektrische Eigenschaften der Metalle

Der elektrische Widerstand eines Körpers aus leitendem Material hängt von Art, Form und Abmessungen des Körpers ab. Für einen langen, geraden Leiter kann der Widerstand nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Hierin sind:

$R$  = Widerstandswert in Ohm für niedrige Frequenzen (kein Skineffekt!)

$\rho$  = *spezifischer Widerstand* des Materials (eine temperaturabhängige Materialkonstante, meist als  $\rho_{20}$  für Raumtemperatur mit 20 °C angegeben)

$l$  = Länge des Leiters

$A$  = Querschnittsfläche des Leiters, konstant über die Länge  $l$ .

Der spezifische Widerstand  $\rho$  wird in  $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$  oder in  $\Omega \text{m}$  (Ohm-Meter) angegeben.

Der spezifische Leitwert  $\sigma$  ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes:

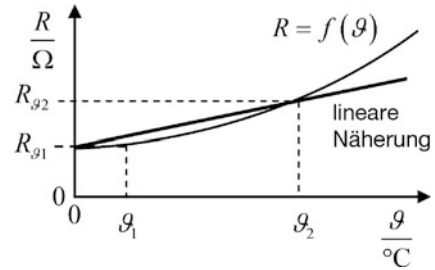
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

Der elektrische Leitwert  $G$  mit der Einheit S (Siemens) ist der Kehrwert des Widerstandes:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

Der Widerstand eines metallischen Leiters ändert sich mit der Temperatur. Mit steigender Temperatur verlassen durch die Zuführung von Energie immer mehr Elektronen die Atomhülle und werden zu freien Elektronen, die Anzahl der freien Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit nimmt zu. Diesem Effekt wirkt entgegen, dass mit zunehmender Temperatur die ortsfesten Atomrümpfe im Kristall-Gitterverband der Leiter größere Schwingungen ausführen (Wärmebewegung). Dadurch sinkt die Beweglichkeit der Elektronen, da sich der effektive Querschnitt für ihre Driftbewegung verkleinert, die Leitfähigkeit nimmt ab

**Abb. 2.1** Widerstandsänderung metallischer Leiter in Abhängigkeit der Temperatur



bzw. der Widerstand zu. Weil der zweite Effekt überwiegt, nimmt der Widerstand eines metallischen Leiters mit steigender Temperatur zu.

Diese Widerstandsänderung ist als Funktion der Temperatur  $\vartheta$  nichtlinear, die wahre Kennlinie kann durch ein Polynom angenähert werden.

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot \left[ 1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \beta (\vartheta_2 - \vartheta_1)^2 + \lambda (\vartheta_2 - \vartheta_1)^3 + \dots \right] \quad (2.4)$$

Im Temperaturbereich  $-50\text{ °C} \leq \vartheta \leq 150\text{ °C}$  (die Grenzen sind ungefähre Werte) kann die Widerstandsänderung durch eine Gerade angenähert werden (Abb. 2.1). Oberhalb ca.  $150\text{ °C}$  nimmt der Widerstand wieder stärker (nichtlinear) zu. Innerhalb des genannten Temperaturintervalles braucht also i. Allg. in Gl. 2.4 nur mit dem Koeffizienten  $\alpha$  gerechnet werden. Man erhält den linearen Ausdruck

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (2.5)$$

Als Bezugstemperatur wird  $\vartheta$  zu  $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$  gewählt. Bezogen auf  $\vartheta_1 = 20\text{ °C}$  ist  $\alpha_{20}$  der lineare *Temperaturkoeffizient* (TK) mit der Einheit  $\frac{1}{\text{K}}$  oder  $\frac{1}{\text{°C}}$ , der quadratische TK ist  $\beta_{20}$  mit der Einheit  $\frac{1}{\text{K}^2}$ . K bedeutet Kelvin. Der TK wird auch als *Temperaturbeiwert* bezeichnet.

Bis ca.  $\vartheta_2 = 150\text{ °C}$  gilt somit vereinfacht:

- für den Widerstandswert  $R_{\vartheta_2}$  bei der Temperatur  $\vartheta_2$ :

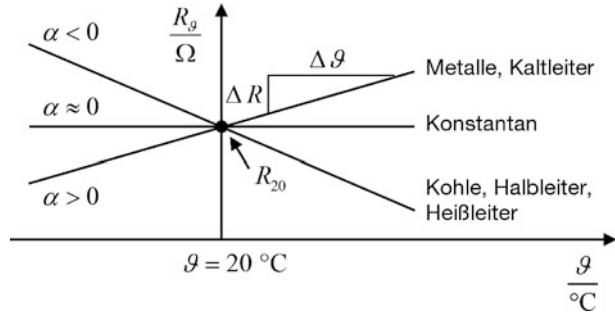
$$R_{\vartheta_2} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} (\vartheta_2 - 20\text{ °C})] \quad (2.6)$$

- für die Widerstandsänderung  $\Delta R$  in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - 20\text{ °C}$  zu  $20\text{ °C}$ :

$$\Delta R = \alpha_{20} \cdot R_{20} \cdot \Delta\vartheta \quad (2.7)$$

$R_{20}$  ist der Bezugswiderstandswert bei  $20\text{ °C}$ .

**Abb. 2.2** Widerstandsänderung von Materialien je nach Temperaturkoeffizient  $\alpha$



Für Temperaturen  $\vartheta_{\text{hoch}}$  über ca.  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  muss in Gl. 2.4 wegen der nichtlinearen Widerstandsänderung ein zweiter Koeffizient  $\beta = \beta_{20}$  berücksichtigt werden. Der Widerstandswert  $R_{\vartheta_{\text{hoch}}}$  bei der Temperatur  $\vartheta_{\text{hoch}}$  ist dann:

$$R_{\vartheta_{\text{hoch}}} = R_{20} \cdot \left[ 1 + \alpha_{20} (\vartheta_{\text{hoch}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) + \beta_{20} (\vartheta_{\text{hoch}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})^2 \right] \quad (2.8)$$

Je nach Materialart ist der lineare Temperaturkoeffizient  $\alpha$  positiv, annähernd Null, oder negativ (Abb. 2.2).

- $\alpha > 0$ : Viele Metalle, Kaltleiter oder PTC-Widerstände (PTC: **p**ositive **t**emperature **c**oefficient). Der Widerstand von Kaltleitern, z. B. von Metallen, nimmt bei Temperaturerhöhung also zu.
- $\alpha \approx 0$ : Z. B. Konstantan (eine Widerstandsdraht-Legierung) oder andere spezielle Legierungen, damit Temperaturunabhängigkeit erreicht wird. Bei einem temperaturstabilen Messwiderstand bedeutet z. B. die Angabe  $\text{TK} = 50\text{ ppm}$ , dass  $\alpha = 50 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$  ist. Die Bezeichnung „ppm“ bedeutet „parts per million“,  $1\text{ ppm} = 10^{-6}$ .
- $\alpha < 0$ : Kohlenstoff, Halbleiter, Heißleiter oder NTC-Widerstände (NTC: **n**egative **t**emperature **c**oefficient). Bei negativem TK überwiegt die stärkere Bereitstellung von Ladungsträgern mit steigender Temperatur gegenüber der Einschränkung der Beweglichkeit der Elektronen.

Der Widerstand von Heißleitern, Kohle und den meisten Halbleitern, nimmt bei Temperaturerhöhung ab.

**Faustregel** Bei vielen Metallen nimmt der Widerstand bei  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  Temperaturerhöhung um etwa 4 % zu.

Der spezifische Widerstand hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Reinheit der Metalle ab. Er kann sich bereits durch geringe Mengen an Fremdatomen im Metall erheblich ändern. Technisch genutzt wird dies bei Metalllegierungen, um Material mit geringem Temperaturkoeffizienten zu erhalten. Beispiele für solche Metalllegierungen sind Manganin und Konstantan, welche für Mess- und Präzisionswiderstände mit sehr geringer Temperaturabhängigkeit verwendet werden (siehe Tab. 2.1).

**Tab. 2.1** Spezifischer Widerstand  $\rho_{20}$  und Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{20}$  und  $\beta_{20}$  einiger Materialien

Material	Chem. Symbol	$\frac{\rho_{20}}{\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\alpha_{20}}{10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$	$\frac{\beta_{20}}{10^{-6} \cdot \text{K}^{-2}}$
Silber	Ag	0,016	3,8	0,7
Kupfer	Cu	0,01786	3,93	0,6
Gold	Au	0,023	4	0,5
Aluminium	Al	0,02857	3,77	1,3
Wolfram	W	0,055	4,1	1
Zink	Zn	0,063	3,7	2
Messing	–	0,07...0,09	1,5	–
Nickel	Ni	0,08...0,11	3,7...6	9
Eisen	Fe	0,10...0,15	4,5...6	6
Zinn	Sn	0,11	4,2	–
Platin	Pt	0,11...0,14	3,92	0,6
Blei	Pb	0,21	4,2	2
Manganin (84Cu, 4Ni, 12Mn)	–	0,43	$\pm 0,01$	–
Konstantan (55Cu, 44Ni, 1Mn)	–	0,50	$\pm 0,04$	–
Chromnickel (80Ni, 20Cr)	–	1,12	0,06	–
Kohle (Grafit)	–	40...100	–0,1	–

## 2.1.2 Metallische Leiter bei hohen Frequenzen

Gleichung 2.1 gilt für den Widerstand eines metallischen Leiters bei Gleichstrom und auch bei Wechselstrom mit niedriger Frequenz, solange keine Stromverdrängung auftritt. Bei höheren Frequenzen wird der Strom durch Induktionseffekte im Leiterinneren zunehmend an die Leiteroberfläche verdrängt (**Skineffekt**). Je nach Frequenz und Querschnitt wird das Innere des Leiters praktisch stromlos. Damit ist der für die Stromleitung zur Verfügung stehende Querschnitt reduziert, dies bewirkt eine Widerstandserhöhung.

Bei einem ausgeprägten Skineffekt nimmt die Stromdichte  $J$  mit zunehmendem Abstand  $x$  von der Leiteroberfläche exponentiell ab.

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.9)$$

Bei der so genannten **Eindringtiefe**  $\delta$  (Eindringmaß, Wirtiefe, äquivalente Leitschichtdicke) ist die Stromdichte auf den Bruchteil  $1/e$  ( $= 36,8\%$ ) des Wertes  $J_0$  an der Oberfläche abgesunken. Ab der fünffachen Eindringtiefe beträgt die Stromdichte weniger als 1%.

Die Eindringtiefe  $\delta$  dient zur Beurteilung der wirksamen Leiterschicht. Sie ist von der Frequenz und den Materialeigenschaften abhängig. Für runde Leiter gilt:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2.10)$$

**Tab. 2.2** Eindringtiefe  $\delta$  in Abhängigkeit der Frequenz bei einem Kupferleiter

$f$	60 Hz	10 kHz	1 MHz	100 MHz	10 GHz
$\delta$	8,6 mm	0,67 mm	67 $\mu\text{m}$	6,7 $\mu\text{m}$	0,67 $\mu\text{m}$

$\delta$  = Eindringtiefe in m (Meter),

$\omega = 2\pi f$  = Kreisfrequenz,

$\sigma$  = spezifische Leitfähigkeit

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  = Permeabilitätskonstante des Vakuums (magnetische Feldkonstante)

$\mu_r$  = Permeabilitätskonstante des Leitermaterials (relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl)

Gleichung 2.10 ist gültig, wenn gilt: Leiterdicke  $\gg$  Eindringtiefe.

Für einen Leiter aus Kupfer gilt:

$$\delta_{\text{Cu}} \approx \frac{0,067}{\sqrt{f}} (\delta_{\text{Cu}} \text{ in mm, } f \text{ in MHz}) \quad (2.11)$$

Einige Zahlenwerte für einen Kupferleiter gibt Tab. 2.2 an.

Da sich die Eindringtiefe umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Frequenz verhält, steigt der Wechselstromwiderstand proportional zu  $\sqrt{f}$ .

Als *spezifischer Oberflächenwiderstand*  $R_F$  wird der Wirkwiderstand eines quadratischen Oberflächenstückes (beliebiger Seitenlänge) eines elektrischen Leiters mit der Eindringtiefe  $\delta$  bezeichnet.

$$R_F = \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\sigma} \cdot f} = \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \rho \cdot f} \quad (2.12)$$

Der Widerstand eines kreisrunden Metalldrahtes in Abhängigkeit der Frequenz ist:

$$R(f) = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}{2 \cdot \sigma}} \quad (2.13)$$

$l$  = Drahtlänge,

$r$  = Drahtradius,

$\sigma$  = spezifische Leitfähigkeit.

Zur Beurteilung des Wechselstromwiderstandes eines Leiters bei hohen Frequenzen muss zuerst die Eindringtiefe  $\delta$  berechnet und mit dem Leiterradius  $r$  verglichen werden.

$r < \delta$ : Skineffekt nicht oder kaum wirksam

$r > 5\delta$ : Skineffekt wirksam, Widerstand steigt proportional zu  $\sqrt{f}$

$\delta < r < 5\delta$ : Übergangsgebiet, Skineffekt leicht spürbar.

Maßnahmen gegen den Skinneffekt:

- Leitfähigkeit der stromführenden Schicht verbessern, z. B. durch Versilbern.
- Auf eine gute Oberflächenqualität achten, eine raue Oberfläche erhöht die Leiterlänge und somit auch den Widerstand.
- Bis zu Frequenzen von ca. 10 MHz kann man **HF-Litze** verwenden. HF-Litze besteht aus einzelnen, sehr dünnen ( $\emptyset \leq 0,1 \text{ mm}$ ), voneinander isolierten, miteinander verflochtenen Drähten und weist damit für einen bestimmten Querschnitt eine größere Oberfläche auf als ein massiver Draht. Wegen der geringen Drahtstärke wird der Skinneffekt im Einzeldraht erst bei sehr hohen Frequenzen wirksam. Für  $f > 10 \text{ MHz}$  sind die einzelnen Litzen jedoch so stark kapazitiv miteinander gekoppelt, dass keine Verbesserung mehr gegenüber massiven Drähten auftritt. Die Hauptanwendung von HF-Litze liegt in der Realisierung von Spulen und Übertragern im Frequenzbereich von 1 MHz bis 10 MHz.

### 2.1.3 Thermische Eigenschaften der Metalle

Ein Metall dehnt sich bei Erwärmung aus. Der lineare Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  (Werte einiger Materialien siehe Tab. 2.3) ist definiert durch die Beziehung

$$l(T) = l_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.14)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (2.15)$$

Näherungsweise ist der Ausdehnungskoeffizient für alle Metalle umgekehrt proportional zur *Schmelztemperatur*  $T_S$  (absolut gemessen).

$$\alpha \sim \frac{1}{T_S} \quad (2.16)$$

Werden zwei verschiedene Materialien miteinander verbunden, so muss in der Elektrotechnik deren thermische Ausdehnung beachtet werden. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der kombinierten Materialien kann es zu großen mechanischen Belastungen der Verbindung kommen. Dieser mechanische Stress kann die elektrischen Eigenschaften der Verbindung verändern oder zu deren Zerstörung führen.

Beispiele für die Verbindung unterschiedlicher Materialien sind

- in Glas oder Keramik eingeschmolzene, metallische Stromdurchführungen
- Metallkontakte oder Lot-Bumps auf Siliziumchips
- durch Lot verbundene Metallteile.

**Tab. 2.3** Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  einiger Materialien

Material	$\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Aluminium	24
Zinn	21
Silber (rein)	19,8
Kupfer (rein)	17
Gold	14
Nickel (rein)	13
Eisen	12
Glas, Platin	9
Quarzglas	8
Tantal	6,5
Gold (rein)	4,4
Keramik	4
Grafit	3

Für die Elektrotechnik ist ebenfalls wichtig, dass Metalle eine gute Wärmeleitung haben, die proportional zur elektrischen Leitfähigkeit ist.

**Stoffe mit guter elektrischer Leitung weisen auch eine gute Wärmeleitung auf.**

Die gute Wärmeleitung von Metallen wird zur Abführung von Verlustleistung (Kühlkörper) verwendet. Zahlenwerte einiger Stoffe zeigt Tab. 2.4.

Anmerkung: Die gute Wärmeleitung der Metalle zeigt, dass der Wärmetransport bei den Metallen hauptsächlich durch die Leitungselektronen erfolgt, zusätzlich zu den Gitterschwingungen. Bei Festkörpern mit geringer Leitfähigkeit findet der Wärmetransport nur über Schwingungen der Gitteratome statt.

In der Technik gebräuchliche metallische Leitermaterialien sind:

Kupfer, Aluminium, Silber, Tungsten, Molybdän, Platin, Tantal, Niobium, karbonhaltige Leiter, bleihaltige Leiter, Konstantan, Manganin, Nickel-Chrom, Gold.

Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Temperatur abhängig.

**Tab. 2.4** Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe

Stoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ bei $20^{\circ}\text{C}$
Silber	417
Kupfer	394
Gold	297
Aluminium	210
Nickel	92
Platin	70
Stahl	58
Quarz	1,3
Beton	0,75...0,95
Glas	0,58...1,05
Luft	0,0257



## 2.2 Flüssigkeiten

*Metallische* Flüssigkeiten sind leitend, der Leitungsmechanismus entspricht dem fester Metalle (z. B. Quecksilber, geschmolzene Metalle).

Andere flüssige Stoffe sind *Nichtleiter*, wenn die Moleküle keine aufspaltbaren Gebilde sind, die sich nicht in einen elektrisch positiv und einen elektrisch negativ geladenen Anteil zerlegen lassen. Ein Beispiel für einen flüssigen Nichtleiter ist destilliertes Wasser. Darin sind die  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle elektrisch neutrale, festgefügte Einheiten, durch deren Bewegung keine Ladung transportiert wird. Mineralöle sind ebenfalls Nichtleiter.

Flüssige Stoffe sind *Leiter*, wenn sich die Moleküle in elektrisch entgegengesetzt geladene Teile aufspalten lassen, die einander nicht mehr fest zugeordnet und deshalb frei beweglich sind. Dies ist vor allem bei wässrigen Lösungen von Salzen, Säuren und Basen der Fall. Diese Lösungen heißen **Elektrolyte**. Ein Beispiel für einen flüssigen Leiter ist die Lösung von Kochsalz ( $\text{NaCl}$ ) in Wasser. Die  $\text{H}_2\text{O}$ -Dipole spalten die Ionenverbindung der elektrisch neutralen Kochsalzmoleküle in elektrisch positiv und negativ geladene Anteile auf, die unabhängig voneinander frei beweglich sind (freie Ladungsträger):  $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

Die positiv und negativ geladenen Teile heißen **Ionen**. Gegenüber elektrischer Neutralität hat  $\text{Na}^+$  ein Elektron weniger und  $\text{Cl}^-$  ein Elektron mehr. Diese Aufspaltung gelöster Moleküle in Ionen nennt man *elektrolytische Dissoziation*.

Die Nernst'sche Regel besagt, dass die dissoziierende Wirkung eines Lösungsmittels umso größer ist, je größer seine Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  ist. Wasser ist mit der relativ großen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r = 81$  eines der wichtigsten Lösungsmittel.

In einem elektrischen Feld wandern die positiv geladenen Ionen in Feldrichtung zur Kathode, sie werden *Kationen* genannt. Die negativ geladenen Ionen wandern gegen die Feldrichtung zur Anode, sie werden *Anionen* genannt.

Erreichen die Ionen Anode bzw. Kathode, so geben sie ihre überschüssigen Elektronen an den Stromkreis ab, bzw. entnehmen dem Stromkreis die fehlenden Elektronen. Dadurch verwandeln sich die Ionen in neutrale Moleküle zurück. Je nach Aggregatzustand entweichen sie dann als Gasbläschen oder lagern sich als fester Niederschlag an den Elektroden ab. Man sagt, durch die **Elektrolyse** wird Stoff abgeschieden.

Die Beweglichkeit der Ionen in den Flüssigkeiten ist wesentlich geringer als die der Elektronen im metallischen Leiter.

Innerhalb eines bestimmten Spannungsbereiches ist die Leitfähigkeit konstant, d. h. es gilt das ohmsche Gesetz.

Bei Temperaturerhöhung entstehen durch den höheren Dissoziationsgrad mehr Ladungsträger, sodass eine Zunahme der Leitfähigkeit auftritt (negativer Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes).

Ionenströme sind mit einem merklichen *Materietransport* verbunden. Der Transport von Materie wird z. B. beim galvanischen Überziehen mit Metallschichten und bei der elektrolytischen Herstellung sehr reiner Metalle genutzt.

## 2.3 Gase

Gase sind grundsätzlich Nichtleiter. Durch äußere Energiezufuhr wie Wärme, Strahlung oder starke elektrische Felder können Gase jedoch ionisiert, d. h. in Elektronen und positiv geladene Ionen zerlegt werden. Negative Gasionen können durch Anlagerung von Elektronen an Gasmoleküle entstehen (leitfähige Gase, Blitz). Die Nutzung Strom leitender Gase erfolgt z. B. in der Beleuchtungstechnik (Leuchtstoffröhren).

---

## 2.4 Halbleiter

Halbleiter sind feste Stoffe mit wenigen beweglichen elektrischen Ladungsträgern. Bei Halbleitern entstehen frei bewegliche Ladungsträger erst durch Energiezufuhr von außen (Wärme, Licht, Strahlung). Ladungsträger sind hier frei bewegliche Elektronen und Fehlstellen von Elektronen, die als *Defektelektronen* oder **Löcher** bezeichnet werden. Diese Fehlstellen bewegen sich scheinbar durch das Kristallgitter und verhalten sich wie positive Ladungsträger.

Die Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig. Die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit verhält sich umgekehrt wie bei Metallen, bei denen die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur abnimmt.

### **Die Leitfähigkeit von Halbleitern nimmt mit steigender Temperatur zu.**

Ein Beispiel für ein Halbleitermaterial ist Selen. Technisch bedeutend sind Halbleiterkristalle mit Diamantgitter: Silizium und Germanium. Sie erhalten durch bewusst eingebaute Gitterstörungen bewegliche Ladungsträger. Dies ist die so genannte *Dotierung* mit Fremdatomen aus der dritten oder fünften Gruppe im Periodensystem, z. B. Indium, Arsen, Gallium, Antimon.

Aus der Kombination von *n*-Halbleitern mit überwiegend Elektronen und *p*-Halbleitern mit überwiegend Löchern als frei bewegliche Ladungsträger werden z. B. Dioden, Transistoren und integrierte Schaltungen hergestellt.

Bei den kristallinen Halbleitern unterscheidet man zwischen Einkristallen und polykristallinen Materialien. Polykristalline Halbleiter bestehen aus einer größeren Anzahl kleiner Kristallite mit verschiedenen Kristallorientierungen. Zwischen diesen einzelnen Kristalliten befinden sich die Korngrenzen. An diesen Korngrenzen lagern sich leicht Verunreinigungen an und sie können auch sonst störende elektrische Eigenschaften haben. Daher werden elektronische Bauelemente, vor allem hochintegrierte, überwiegend aus einkristallinem Material ohne Korngrenzen hergestellt.

Zur Beschreibung der Leitung in Halbleitern wird das *Bändermodell* mit Valenzband und Leitungsband verwendet. In Halbleitern sind Valenzband und Leitungsband durch eine (Energie-) Lücke voneinander getrennt. Durch die Zuführung von Energie können einzelne Elektronen das Valenzband verlassen und in das Leitungsband gehoben werden. Dabei muss die Energie mindestens der energetischen Breite der verbotenen Zone entsprechen. Diesen Vorgang nennt man *Generation*. Ein Elektron im Leitungsband ist

frei beweglich und kann somit zum Stromtransport beitragen. Außerdem hinterlässt es im Valenzband ein Loch, sodass andere Elektronen die Möglichkeit haben diese Position einzunehmen. Das führt zur Wanderung eines Loches oder Defektelektrons. Von außerhalb des Kristalls entsteht der Eindruck, als würden im Halbleiter frei bewegliche positive Ladungen (Löcher) existieren, die ebenfalls zum Stromtransport beitragen. Durch die Generation ist also ein Elektron-Loch-Paar entstanden. Solche Paare haben aber nur eine bestimmte Lebensdauer. Danach fällt das Elektron von seinem energetisch höheren Niveau zurück auf einen freien Platz im Valenzband. Das Elektron-Loch-Paar ist damit wieder verschwunden. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Rekombination*. Im thermischen Gleichgewicht geschehen Generation und Rekombination gleich häufig.

Bei Halbleitern wird zwischen *Eigenleitung* in reinen Halbleitern (ohne Fremdatome) und *Störstellenleitung* in dotierten Halbleitern unterschieden.

---

## 2.5 Nichtleiter (Isolatoren)

Nichtleiter (Isolatoren) sind nichtmetallische Stoffe und Verbindungen, die fast keine frei beweglichen Ladungsträger besitzen.

Es gibt feste, flüssige und gasförmige Nichtleiter. Technisch wichtig sind z. B.:

- Papier, Glimmer, Keramik, Kunststoffe, Glas
- Öl
- Luft, Schwefelhexafluorid
- Vakuum.

In Isolatoren (z. B. Kunststoffen) kann ein elektrisches Feld bestehen bleiben, da die Ladungen nicht abfließen bzw. sich nicht ausgleichen können. In elektrischen Leitern (z. B. Metallen) ist kein elektrostatisches Feld möglich, da es sofort zu einem Ladungsausgleich kommt.

Isolierwerkstoffe sind Materialien zum Trennen von Potenzialdifferenzen. Bei ihnen spielen vor allem die elektrische *Durchschlagsfestigkeit*, die *Oberflächenleitfähigkeit* sowie die *Kriechstromfestigkeit* eine Rolle. Für dielektrische Werkstoffe (z. B. Keramik: Titanoxid  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgTiO}_3$ ) sind wiederum die relative Dielektrizitätszahl und der dielektrische Verlustfaktor wesentlich.

---

## 2.6 Zusammenfassung

1. Werkstoffe werden nach ihrer Leitfähigkeit in Leiter und Nichtleiter (Isolatoren) eingeteilt.
2. Metalle und Metall-Legierungen sind in der Elektrotechnik wichtige elektrisch leitfähige Materialien.

3. Metalle können in gute und schlechte Leiter eingeteilt werden.
4. Aus gut leitenden Metallen werden u.a. Drähte, Kabel, Steckverbindungen sowie Spulen von elektrischen Maschinen hergestellt.
5. Legierungen mit hohem Widerstand werden für die Herstellung von Widerstandsbau-teilen oder Heizdrähten verwendet.
6. Der elektrische Widerstand eines Körpers aus leitendem Material hängt von Materi-  
alart, Form und Abmessungen des Körpers ab.
7. Der Widerstand eines metallischen Leiters nimmt mit steigender Temperatur zu.
8. Der Temperaturkoeffizient TK (Temperaturbeiwert) gibt an, wie sich der Wider-  
standswert eines Materials in Abhängigkeit der Temperatur ändert.
9. Der TK kann positiv (Kaltleiter, PTC-Widerstände), annähernd null (spezielle Legie-  
rungen) oder negativ (Heißeiter, NTC-Widerstände) sein.
10. Bei höheren Frequenzen tritt bei metallischen Leitern der Skineneffekt auf. Der Strom  
wird an die Leiteroberfläche verdrängt, dies bewirkt eine Widerstandserhöhung.
11. Die Eindringtiefe dient zur Beurteilung der wirksamen Leiterschicht, sie kann be-  
rechnet werden.
12. Die Eindringtiefe verhält sich umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Frequenz,  
der Wechselstromwiderstand steigt somit proportional zu  $\sqrt{f}$ .
13. Ein Metall dehnt sich bei Erwärmung aus.
14. Flüssigkeiten können Leiter oder Nichtleiter sein.
15. Elektrolyte (wässrige Lösungen von Salzen, Säuren und Basen) sind elektrische Lei-  
ter.
16. Gase können durch Ionisierung leitfähig werden.
17. Bei Halbleitern sind die Ladungsträger Elektronen und Löcher.
18. Die Leitfähigkeit von Halbleitern nimmt mit steigender Temperatur zu.
19. Nichtleiter (Isolatoren) besitzen fast keine frei beweglichen Ladungsträger.



<http://www.springer.com/978-3-658-08651-0>

Passive elektronische Bauelemente  
Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und  
Anwendung

Stiny, L.

2015, XVII, 480 S. 347 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-08651-0