

3.5 Temperaturabhängigkeit von R

Allgemein nimmt der Widerstand von Metallen bei Temperaturerhöhung zu. Bei verschiedenen Legierungen ist die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes nur sehr gering. Im Temperaturbereich von $t = 0^\circ\text{C}$ und $t = 100^\circ\text{C}$ ist die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands ϱ von der Temperatur t für metallische Leiter, einschließlich Graphit, in guter Näherung linear:

$$\varrho = \varrho_0 (1 + \alpha t). \quad (3.33)$$

α ist der **Temperaturkoeffizient** des Widerstandes. Er ist positiv für Metalle (PTC-Leiter) und negativ für Halbleiter (NTC-Leiter).

Versuch 3.3

Wir erhitzen eine Metallspirale und beobachten, dass bei konstanter Spannung der Strom durch die Spirale kleiner wird.

Nun erhitzen wir eine Si- Probe und beobachten hier, wie der Strom bei konstanter Spannung größer wird.

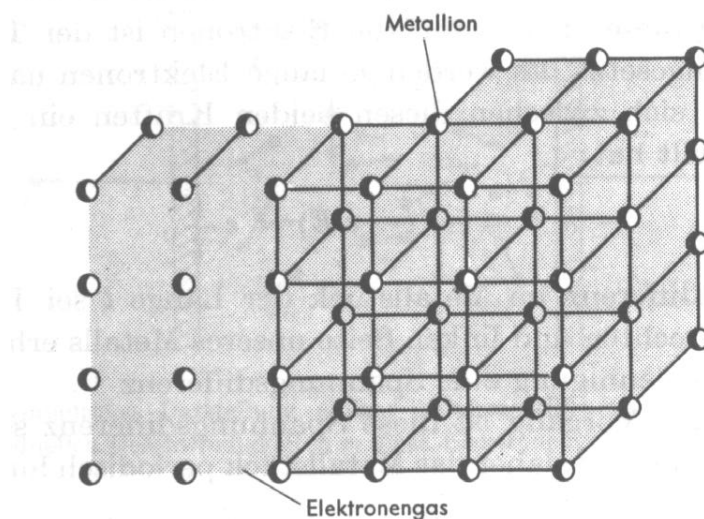


Abbildung 3.4: "Elektronengas"

Dies lässt leicht verstehen: In Metallen ist die Ladungsträgerdichte n fest vorgegeben, denn alle Valenzelektronen der Metallatome sind als "Elektronengas" durch das Gitter

der Ionenrümpfe beweglich (s. Abb. 3.4, entnommen aus [5]). Je heißer aber das Metall wird, desto stärker schwingen die Ionenrümpfe, und um so mehr behindern sie die Elektronenbewegung. Die Relaxationszeit τ nimmt also ab und da

$$\mu = \frac{v_D}{E} = \frac{q}{m_e} \tau \quad (3.34)$$

gilt, nimmt auch die Beweglichkeit μ mit steigender Temperatur ab. In Halbleitern ist dies auch der Fall. Eine viel stärkere, steigende Temperaturabhängigkeit hat hier aber die Ladungsträgerdichte n , denn die Träger müssen erst mittels thermischer Energie aus ihrem normalerweise gebundenen Zustand in einen beweglichen angehoben werden. Wie dies genau geschieht wird später erklärt.

Um zu zeigen, dass der Widerstand in Isolatoren bei steigender Temperatur abnimmt, wird folgender Versuch durchgeführt:

Versuch 3.4

Glas leitet bei Zimmertemperatur nicht. Wird es jedoch erhitzt, so wird das Glas leitend und schmilzt sogar bei Entfernen der Flamme, da es sich durch den Stromfluss weiter erwärmt.

Das Verhalten der Isolatoren wird erst in der Festkörperphysik verständlich. An dieser Stelle sei nur gesagt, dass in Isolatoren bei Zimmertemperatur keine freien Elektronen vorhanden sind. Sie müssen erst eine Energielücke ΔE überwinden, deshalb gibt es bei hohen Temperaturen mehr freie Elektronen. Es gilt:

$$\varrho(T) \sim e^{-\Delta E/kT} \Rightarrow \ln \varrho \sim -\frac{1}{T}. \quad (3.35)$$

3.5.1 Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Gute Wärmeleiter sind auch gute elektrische Leiter (siehe Metalle), schlechte Wärmeleiter sind auch schlechte elektrische Leiter (siehe Isolatoren). Bei konstanter Temperatur stehen Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit in einem konstanten Verhältnis zueinander. Es gilt das

WIEDEMANN- FRANZsche Gesetz

$$\text{Wärmeleitfähigkeit} = \lambda = a \cdot t \cdot \sigma \quad (3.36)$$

wobei die Konstante a für alle Metalle etwa gleich ist.

3.5.2 Supraleitung

Im Bereich tiefer Temperaturen sinkt der spezifische Widerstand ρ für reine Metalle mit abnehmender Temperatur proportional zu T^5 . In der Nähe des absoluten Nullpunktes gilt dieses Verhalten jedoch nicht mehr. Hier strebt ρ nicht wie zu erwarten gegen null, sondern nähert sich einem von null verschiedenen endlichen Widerstand, dem sogenannten Restwiderstand ρ_{Rest} (s. Abb. 3.5, entnommen aus [2]). Dieser ist etwa um den Faktor 1000 kleiner als der Widerstand ρ_0 bei $t = 0^\circ C$ ($\rho_{Rest} = 10^{-3} \rho_0$). Er lässt sich durch

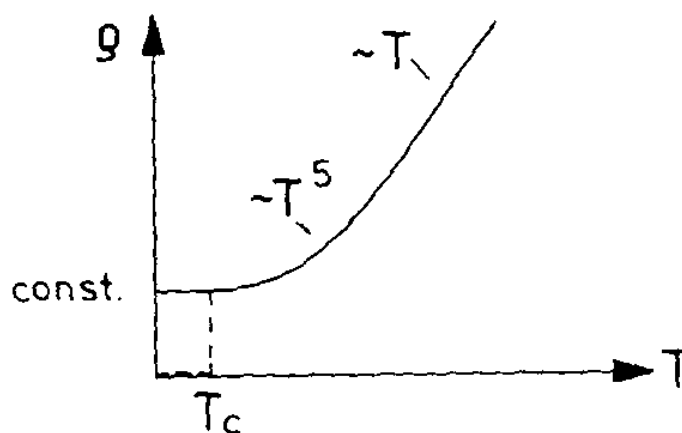


Abbildung 3.5: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands bei Metallen

die Verunreinigungen und Störungen des Kristallgitters erklären, an denen die Elektronen gestreut werden. Die thermische Bewegung des Gitters spielt hier keine Rolle mehr. Unterhalb einer bestimmten Temperatur zeigen einige Metalle und Keramiken hingegen ein völlig anderes Verhalten. Bei einer bestimmten, für das jeweilige Material charakteristischen Temperatur T_c , **Sprungtemperatur** oder **kritische Temperatur** genannt, fällt der Widerstand auf einen unmessbar kleinen Wert ab. Unterhalb der kritischen Temperatur besitzen diese Stoffe keinen elektrischen Widerstand mehr. Ein bei dieser Temperatur vorhandener Strom fließt in einem solchen Leiter auch dann dauernd weiter (in Experimenten schon über Jahre hinweg !!), wenn die Stromquelle abgeschaltet (überbrückt) wird. Man sagt: diese Materialien befinden sich im Zustand der **Supraleitung**. Diese Erscheinung wurde 1911 von H. KAMERLINGH- ONNES (1853- 1926) an Quecksilber entdeckt, nachdem es ihm drei Jahre vorher gelungen war, Helium als letztes der Edelgase zu verflüssigen und damit den Temperaturbereich in der Nähe des absoluten Nullpunktes ($1K - 10K$) zu erschließen.

Versuch 3.5

Wir halten einen Supraleiter, durch den ein konstanter Strom fließt, in flüssigen Stickstoff. Wir beobachten, dass die Spannung gegen Null geht, d.h. der Widerstand verschwindet.

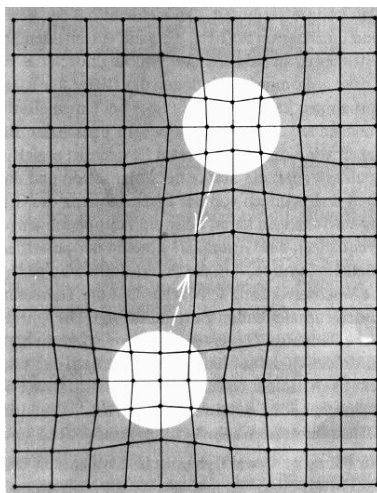


Abbildung 3.6: Veranschaulichung der Cooper-Paare

Nach der BCS- Theorie (von J. BARDEEN, L. COOPER und J.R. SCHRIEFFER 1957 entwickelt; Physiknobelpreis 1972) bilden je zwei Leitungselektronen eines supraleitenden Materials unterhalb der Sprungtemperatur sogenannte **Cooper-Paare**. Dies kann man sich anschaulich so erklären: In der Umgebung, in der sich ein Elektron aufhält, deformiert es das Kristallgitter, da die positiven Rumpfionen von ihm angezogen werden. Diese Ansammlung von Rumpfionen wiederum zieht nun ein weiteres Elektron an. Die resultierende effektive Anziehungskraft ist größer als die abstoßende Kraft zwischen den Elektronen. Dies ist so ähnlich, wie wenn man zwei Kugeln auf eine Membran legt. An den Stellen, an denen sie liegen, entstehen Mulden, sie deformieren also die Membran. Sind die Mulden in ausreichend kleinem Abstand, so vereinen sie sich zu einer Mulde, in der sich beide Kugeln befinden. Natürlich hinkt dieser Vergleich, denn die Kugeln auf der Membran sind statisch, während sich die Elektronen mit großen Geschwindigkeiten bewegen. Siehe auch Abb. 3.6, entnommen aus [14].

Die Cooper-Paare befinden sich nun in dem Zustand der kleinstmöglichen Energie. Sie können sich durch das Metallgitter bewegen, das heißt, der elektrische Widerstand verschwindet. Ihren Zustand halten die Cooper-Paare so lange bei, bis die Temperatur die Sprungtemperatur wieder übersteigt. Dann werden sie getrennt und treten wieder als normale Leitungselektronen auf. Bis vor etwa 10 Jahren lagen alle Sprungtemperaturen

unterhalb von 30 K. Im Jahr 1986 entdeckten A. MÜLLER UND J. BEDNARZ die Supraleitung in Y-Ba-Cu-Oxyd mit einer Sprungtemperatur von 35 K. Sie erhielten dafür 1987 den Nobelpreis. Ein Jahr später fand man weitere, sogenannte **warme Supraleiter**, wie Y-Ba₂-Cu₃-O₇, das bei T = 95 K supraleitend wird oder Tl-Ca₂Ba₂-Cu₃-O₁₀, welches bei T = 125 K supraleitend wird.

An Supraleitern beobachtet man folgende weitere Phänomene:

1. Ein Magnetfeld hat einen wesentlichen Einfluss auf die Supraleitung. Oberhalb einer für jeden Supraleiter charakteristischen magnetischen Feldstärke tritt auch bei tiefster Temperatur keine Supraleitung mehr auf. Bei einer magnetischen Feldstärke unterhalb der kritischen Feldstärke tritt Supraleitung erst bei einer Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur, wie sie ohne Magnetfeld ist, auf. Diese Erscheinung hat zur Folge, dass in Supraleitern nicht beliebig große Ströme fließen können, denn bei einer bestimmten Stromstärke zerstört das Magnetfeld des Stromes selbst die Supraleitfähigkeit.
2. In einen Supraleiter dringt kein Magnetfeld ein (MEISSNER– OCHSENFELD– Effekt). Bei Temperaturen oberhalb der kritischen Temperatur durchdringt ein Magnetfeld zunächst den Leiter. Kühlt er bis unterhalb der kritischen Temperatur ab, so werden die magnetischen Kraftlinien aus ihm herausgedrängt.
3. Die Supraleitung hängt nicht vom Atomaufbau, sondern von der Kristallstruktur des Materials ab. So unterscheiden sich beispielsweise das weiße und das graue Zinn im Kristallaufbau, und nur das weiße Zinn wird supraleitend.
4. Verschiedene Isotope des gleichen Elements haben auch verschiedene Sprungtemperaturen.

Supraleiter werden als Stromleiter und zur Erzeugung großer Magnetfelder, z.B. in Teilchenbeschleunigern, eingesetzt.

3.5.3 Technische Widerstände

Dieser kleine Exkurs soll die verschiedenen Arten von Widerständen und ihre Anwendung erläutern. Man unterscheidet zwischen festen und einstellbaren Widerständen.

- Die **Festwiderstände** können weiter unterteilt werden in lineare und nichtlineare Widerstände.
 - Die **linearen Widerstände** genügen dem OHMSchen Gesetz, d.h. bis auf ihr Temperaturverhalten. Sie werden aus Draht (Nicklin, Konstantan) oder aus Schichtmaterialien wie Kohlenstoff, Metallen oder Edelmetallen hergestellt und überwiegend in der Nachrichten-, Mess-, Daten- und Starkstromtechnik sowie bei extremen Klimabeanspruchungen, zur Temperaturkompensation, als

Sicherheitswiderstand und als Vorwiderstand bei hohen Spannungen eingesetzt. Der Widerstandswert und die Toleranzen werden häufig als Farbringe aufgebracht.

- Bei den **nicht-linearen Widerständen** ist der Widerstand von folgenden physikalischen Größen abhängig:

Temperatur: Es gibt Heißleiter und Kaltleiter. Ein Heißleiter zeichnet sich durch einen fallenden Widerstand bei steigender Temperatur aus (**Negative Temperature Coefficient**). Sie werden als Temperaturfühler, zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten oder zur Spannungsstabilisierung verwendet und bestehen aus einer halbleitenden Oxidkeramik. Bei Kaltleitern steigt der Widerstand stark bei zunehmender Temperatur (**Positive Temperature Coefficient**). Sie werden als Temperaturfühler, als Thermostat und zur Stromstabilisierung verwendet und bestehen aus Metalldrähten.

Spannung: VDR-Widerstände oder Variatoren (**Voltage Dependent Resistance**) sind stark spannungsabhängig und werden zur Spannungsstabilisierung und zur Stoßspannungsbegrenzung eingesetzt.

Licht: Hierbei handelt es sich um lichtempfindliche Widerstände (**Light Dependent Resistance**), die z.B. in Belichtungsmessern eingesetzt werden.

- Die **einstellbaren Widerstände** ändern den Widerstand entweder linear oder logarithmisch. Linear einteilbare Widerstände werden als Spannungsteiler (Potenziometer oder Trimmer) eingesetzt, logarithmisch verstellbare Widerstände zur Lautstärkeregelung verwendet. Als Werkstoffe werden Draht, Kohleschichten und Keramikträger mit eingebranntem Metalloxid und Glaspulver (Cermet) eingesetzt.

3.6 Stromkreise

3.6.1 Die KIRCHHOFFSchen Gesetze

Bisher haben wir den elektrischen Strom in nur einem Leiter betrachtet. Nun wollen wir uns mit der Stromverteilung in einem Leitersystem befassen, in dem die einzelnen Stromführenden Leiter zu einem beliebig komplizierten Netz verknüpft sind. Dabei helfen uns folgende Regeln: