

V10 Elektrischer Widerstand als Funktion der Temperatur

1. Aufgabenstellung

- 1.1 Messung Sie den elektrischen Widerstand vorgegebener Materialien als Funktion der Temperatur bei tiefen Temperaturen.
- 1.2 Stellen Sie $R(T)$ für alle Proben grafisch dar.
- 1.3 Bestimmen Sie die Sprungtemperatur T_c des vorhandenen Supraleiters.
- 1.4 Schätzen Sie mit Hilfe der Geometriedaten den spezifischen elektrischen Widerstand ab, und vergleichen Sie mit den Literaturwerten.
- 1.5 Interpretieren Sie das Widerstandsverhalten der Proben.
- 1.6 Führen Sie eine Größtfehlerabschätzung durch.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Bändermodell, Leitungsvorgänge in Metallen, Halbleitern, Supraleitern, Bloch-Grüneisen-Gesetz, Fermi-Dirac-, Bose-Einstein-Statistik, Matthiesen-Regel, Restwiderstand, Dotierung, Erzeugung und Messung tiefer Temperaturen.

Literatur:

Schilling	Festkörperphysik, Fachbuchverlag Leipzig (1976), Seite 164-209
Gerthsen, Vogel	Physik, Springer-Verlag (1993), Seite 747-760
Buckel	Supraleitung, VHC Verlagsgesellschaft Weinheim (1990), Seite 9-44
Weißmantel, Hamann	Grundlagen der Festkörperphysik, DVW (1979), Seite 330 ff. Seite 526 ff.

2.1 Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit

2.1.1 Metalle

In Metallen existieren frei bewegliche Elektronen als Ladungsträger. Bei Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes erfolgt ein gerichteter Ladungstransport, es fließt ein Strom. Die Elektronen können aufgrund der noch vorhandenen (positiven) Ionenrümpfe, die das Gitter bilden, nicht völlig ungestört durch den Festkörper wandern. Sie werden auf ihrem Weg durch die Gitterschwingungen, auch Phononen genannt, und durch vorhandene Gitterdefekte behindert. Die Dynamik der Gitterschwingungen, die die Beweglichkeit der Elektronen also maßgeblich beeinflusst, ist stark temperaturabhängig. Mit wachsender Temperatur schwingen die Atome stärker um ihre Ruhelage, der Widerstand wächst (Abb. 1).

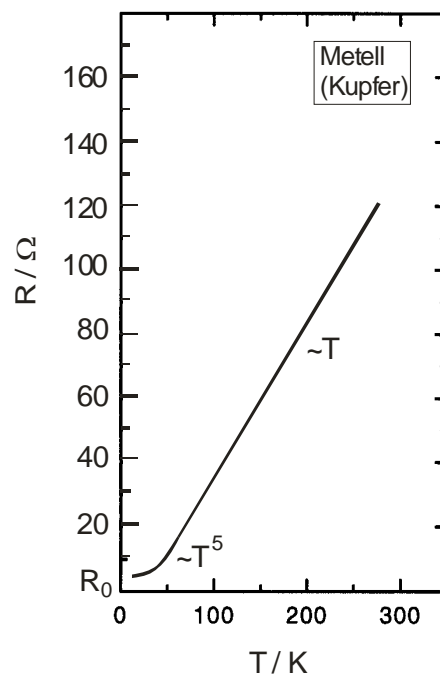


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalls am Beispiel von Kupfer

Bei Zimmertemperatur und darüber beobachtet man das aus der „Schulphysik“ bekannte lineare Verhalten des Widerstandes als Funktion der Temperatur.

Bei tiefen Temperaturen wird aufgrund der sich ändernden Elektron-Phonon-Wechselwirkung eine Widerstandsänderung beobachtet, die proportional der 5. Potenz der Temperatur ist. Quantitativ wird dieser Sachverhalt durch das Bloch-Grüneisen-Gesetz beschrieben. Bei sehr tiefen Temperaturen sind die Gitterschwingungen eingefroren, die Elektronen werden nur noch am nicht perfekten Gitteraufbau, also an Störstellen gestreut. Der Widerstand wird temperaturunabhängig. Deshalb mündet die $R(T)$ -Kurve bei $T=0$ in den endlichen Restwiderstand R_0 . Der spezifische elektrische Widerstand ergibt sich nach der Matthie-

sen-Regel aus dem temperaturunabhängigen spezifischen Restwiderstand ρ_0 und einem temperaturabhängigen Teil $\rho(T)$

$$\rho = \rho_0 + \rho(T) \quad . \quad (1)$$

2.1.2 Halbleiter

In Halbleitern gibt es zunächst keine freien Ladungsträger. Bei $T=0$ ist ein Halbleiter ein Isolator, der Widerstand ist unendlich groß (Abb.2)

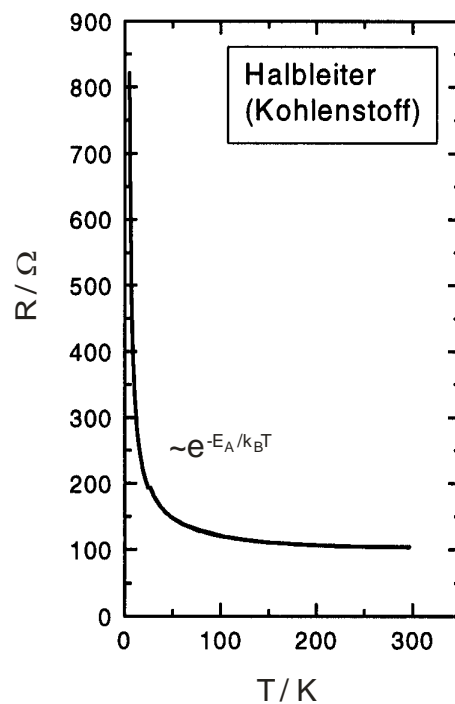


Abb. 2: Widerstandsverhalten eines Kohlewiderstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes lässt sich mit Hilfe des Bändermodells verstehen. Die Lösung der Schrödinger-Gleichung liefert Bereiche mit erlaubten Energieeigenwerten, die so genannten Bänder, und Bereiche mit verbotenen Energieeigenwerten, also Lücken zwischen den Bändern. Das oberste vollständig besetzte Band heißt Valenzband (Abb. 3). Das darüber liegende leere Band ist das Leitungsband.

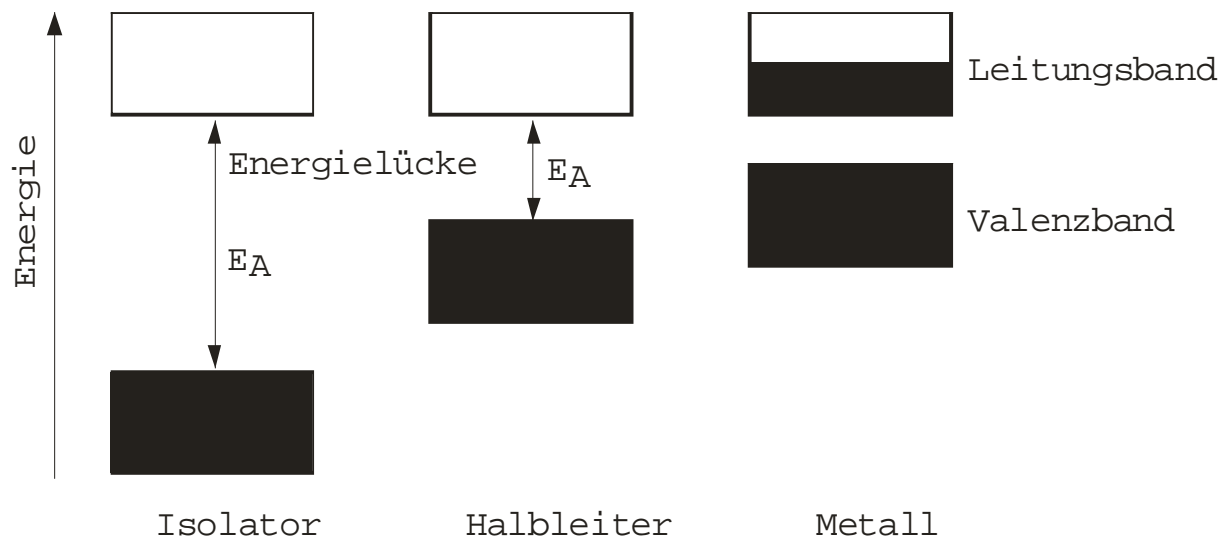


Abb. 3: Idealisiertes Schema zur Demonstration des Bändermodells

Zwischen Valenz- und Leitungsband gibt es bei Halbleitern und Isolatoren eine Energielücke. Es existiert demnach eine energetische Barriere zwischen diesen beiden Bändern. Deshalb müssen in Halbleitern die Ladungsträger erst aktiviert werden, um ins Leitungsband zu gelangen. Sie müssen durch Energiezufuhr, also mit Temperaturerhöhung erst angeregt und damit beweglich gemacht werden. Mit steigender Temperatur sinkt der Widerstand, weil immer mehr Ladungsträger vorhanden sind. Die Größe der vorhandenen Energielücke ist materialspezifisch. Mittels Dotierung mit Fremdatomen kann die Aktivierungsenergie herabgesetzt und damit $\rho(T)$ beeinflusst werden.

2.1.3 Supraleiter

Bei Supraleitern verschwindet bei einer kritischen Temperatur T_c der elektrische Widerstand sprunghaft unter seine Nachweisgrenze (Abb. 4)

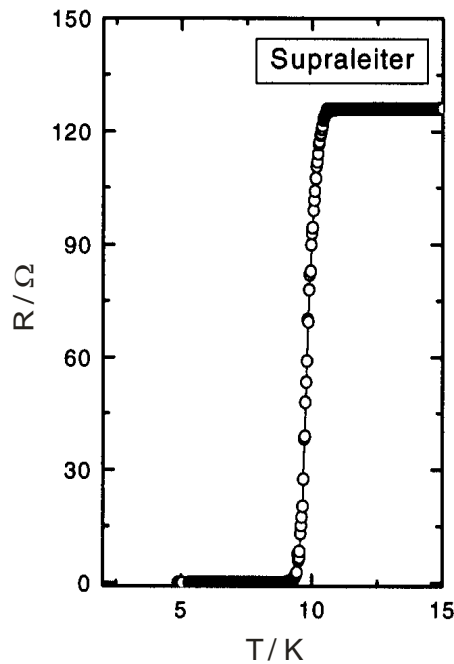


Abb. 4: Widerstandsverhalten eines Supraleiters (Nb-Ti) in Abhängigkeit von der Temperatur

Der elektrische Strom wird verlustfrei transportiert. Das wird in solchen Substanzen dadurch ermöglicht, weil es eine Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen gibt, die die normale Elektron-Phonon-Wechselwirkung ab einer bestimmten Temperatur kurzschließt. Wie dieser energetisch günstigere Zustand genau entsteht, wird detailliert u. a. durch die BCS-Theorie beschrieben.

2.2 Temperaturmessung

Bei tiefen Temperaturen versagen handelsübliche Thermometer. Zur Temperaturmessung werden Materialien verwendet, deren temperaturabhängiger Widerstandsverlauf genau bekannt und langzeitstabil ist, also Edelmetalle, wie z. B. Platin oder auch geeignete Halbleiter, wie z. B. Kohle oder Silizium.

Wichtig ist, dass die $R(T)$ -Kennlinie des entsprechenden Materials im zu untersuchenden Temperaturbereich eine ausreichende Empfindlichkeit besitzt.

3. Versuchsdurchführung

Den prinzipiellen Versuchsaufbau zeigt Abb. 5

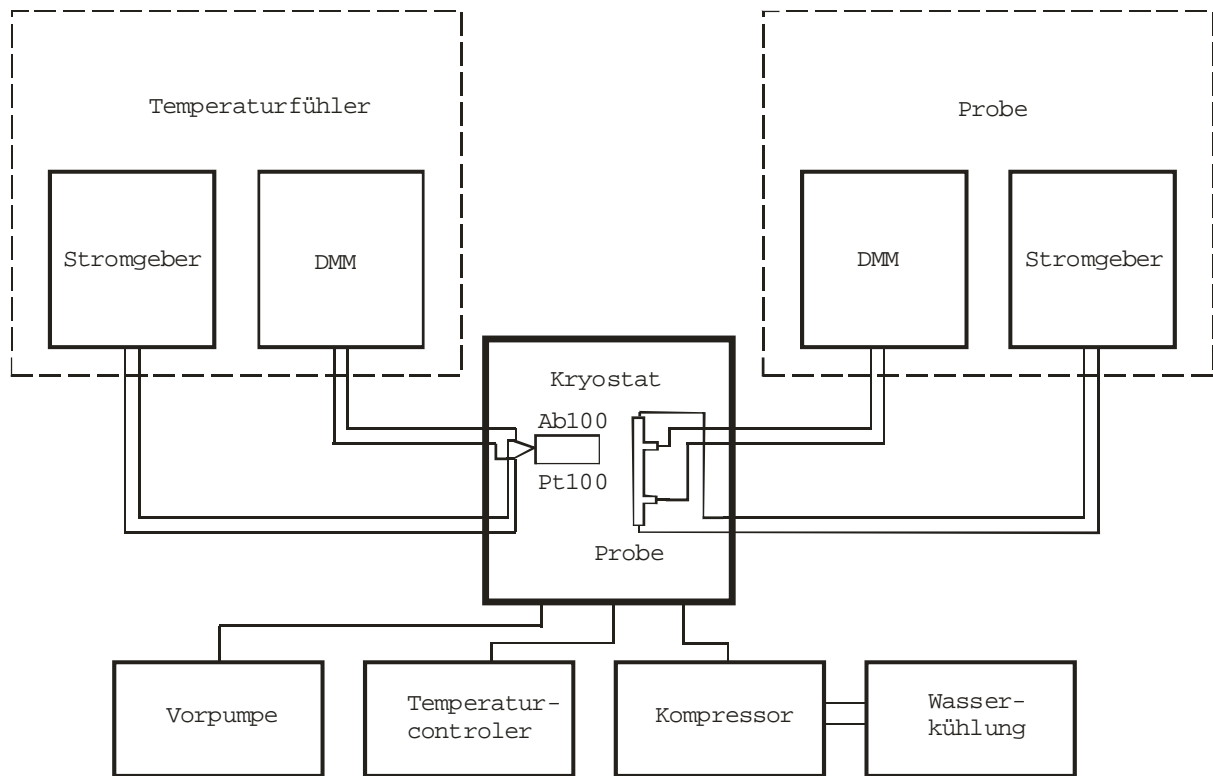


Abb. 5: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus

Alle Messungen werden in einem speziellen Kryostaten, der auf Hochvakuum evakuiert ist, durchgeführt.

Der Widerstand der einzelnen Bauelemente bzw. Proben wird mittels Vierpunkt-messung gemessen und auf bereitstehenden Digitalmultimetern angezeigt. Die $R(T)$ -Kennlinie wird beim Erwärmen aufgenommen. Die Kalibrierungskurven der Widerstandsthermometer liegen am Versuchsplatz aus.

4. Kontrollfragen

- 4.1 Welche Grundannahmen machte Drude zur Beschreibung der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen?
- 4.2 Was besagt das Bloch-Grüneisen-Gesetz?
- 4.3 Beschreiben Sie die Matthiesen-Regel!
- 4.4 Wodurch unterscheiden sich die Fermi-Dirac- und die Bose-Einstein-Statistik?
- 4.5 Beschreiben Sie das Entstehen n- und p-dotierter Halbleiter!
- 4.6 Wie kann man die anziehende Wechselwirkung von Leitungselektronen verstehen?
- 4.7 Wozu benötigt man das gute Isolationsvakuum während der Versuchsdurchführung? Welche Methoden der Wärmeausbreitung sind Ihnen bekannt?