

Thema 2: Elektrische Kennlinien verschiedener Leiter

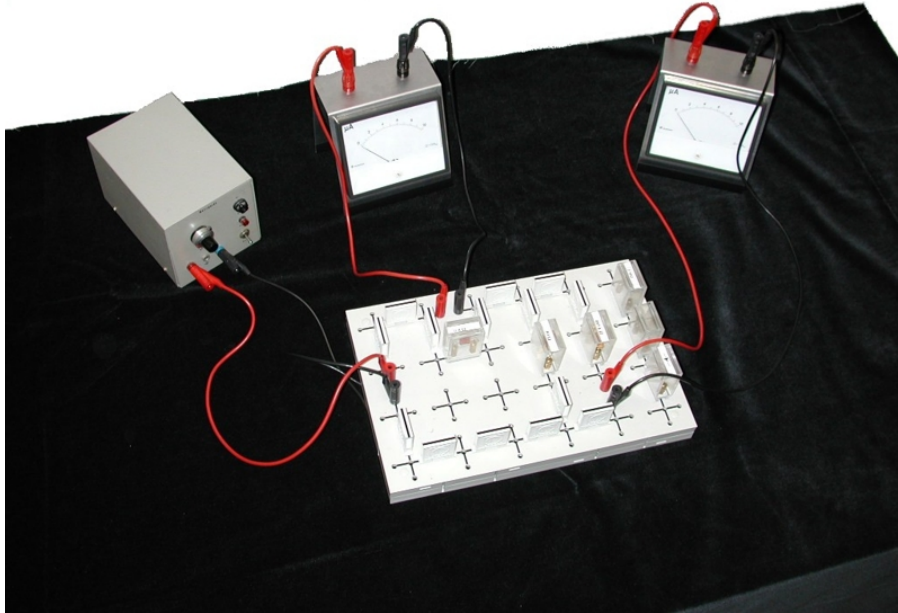


Abbildung 2.1: Der Versuchsaufbau in der Übersicht

1 Grundlagen

1.1 Metallische Leiter, Halbleiter und Isolatoren

In einem elektronischen Leiter gibt es hinreichend viele leicht bewegliche Elektronen, um bei Vorhandensein eines äußeren elektrischen Feldes einen Stromfluss zu bewirken. Der typische elektronische Leiter ist ein Metallkristall. Man kann sich ihn vorstellen als Kristallgitter positiv geladener ortsfester Metallionen, in dem sich, je nach Element oder Legierung, ca. 0,01 bis 1 Elektron pro Gitteratom frei bewegen können wie die Teilchen eines Gases („Elektronengas“). Dieses „Leitungselektronengas“ ist die wesentliche Eigenschaft, die ein Metall definiert! Substanzen, deren atomare Hüllenelektronen zu fest gebunden sind, um im Kristallgitterverband frei bewegliche Leitungselektronen zuzulassen, sind elektronische Isolatoren. Elemente oder chemischen Verbindungen ohne freie Leitungselektronen sind Nichtmetalle. Nichtmetalle leiten elektrischen Strom erst bei hohen Temperaturen, wenn die thermische Energie des Systems ausreicht, gelegentlich ein Atom bzw. Molekül zu ionisieren oder es von seinem Platz im Kristallgitter zu lösen. Dann zeigen solche Substanzen in der Regel eine Mischform von elektronischer und ionischer Stromleitung.

Zwischen diesen beiden Substanzklassen stehen die Halbleiter. Hier ist die Bindung der äußeren Hüllenelektronen gerade so stark, dass bei Zimmertemperatur die thermische Energie im Kristall nur gelegentlich ausreicht, um ein Gitteratom zu ionisieren. Halbleiter haben etwa $10^3 \dots 10^9$ mal weniger frei bewegliche Leitungselektronen pro Gitteratom aufzuweisen als Metalle und reagieren mit großen Veränderungen ihrer Leitfähigkeit auf Verunreinigungen (durch benachbarte Elemente des Periodensystems). Das macht ihre große technische Bedeutung aus!

Die Gitterionen im Halbleiter sind ortsfest, nehmen also nicht am Ladungstransport teil. Ihre Ladung beeinflusst jedoch die Ladungstransporteigenschaften ganz entscheidend¹.

¹Bei lebenden Zellen wird diese Rolle von ortsfesten ionisierten Molekülen in der Zellenmembran übernommen.

1.2 Maßeinheiten

Durch die Anzahl n der beweglichen Ladungsträger mit jeweils der Elementarladung e wird die für den Ladungstransport (= Stromfluss) verfügbare Ladungsmenge Q im Kristall bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{Ladungsmenge } Q &= n \cdot e \\ \text{Einheit } [Q] &= 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} \\ \text{Elementarladung } e &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{aligned}$$

Der elektrische Strom I ist definiert als die Ladung dQ , die pro Zeiteinheit dt durch den Leiter fließt: $I = \frac{dQ}{dt}$ bzw. bei konstantem Stromfluss einfacher $I = \frac{Q}{t}$.

$$\begin{aligned} \text{Strom } I &= \frac{dQ}{dt} \quad \text{bzw.} \quad I = \frac{Q}{t} \\ \text{Einheit } [I] &= 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ein Elektron erfährt im elektrischen Feld eine Kraft

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

Der Begriff der Spannung definiert die Arbeit, die zum Transport einer elektrischen Ladung Q im elektrischen Feld \vec{E} geleistet werden muss:

$$\begin{aligned} \text{Spannung } U &= \frac{\text{Arbeit } W}{\text{Ladung } Q} = \frac{W}{Q} \\ \text{Einheit } [U] &= 1 \text{ Volt} = 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{N m}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N m}}{\text{A s}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Im homogenen elektrischen Feld, z.B. im Innern eines Plattenkondensators, sind elektrische Feldstärke und Spannung einfach verknüpft durch:

$$\begin{aligned} \text{Feldstärke } E &= \frac{\text{Spannung } U}{\text{Elektrodenabstand } d} = \frac{U}{d} \\ \text{Einheit } [E] &= 1 \frac{\text{Volt}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2 Leitereigenschaften

2.1 Kirchhoffsche Regeln

Die Kirchhoffschen Regeln für die Verknüpfung elektrischer Leiter (Widerstände) miteinander beschreiben die Tatsache, dass die Leiter selbst keine Strom- oder Spannungsquellen darstellen. Das Leitungsdiagramm eines konkreten Leiternetzwerks muss eventuell geeignet umgezeichnet werden, so dass darin enthaltene Spannungs- bzw. Stromquellen separat von den elektrischen Leitern erkennbar werden.

1. Kirchhoffsche Regel: Die Summe aller Ströme, die zu einem Knotenpunkt in einem Leiternetzwerk hinfließen, ist gleich der Summe der Ströme, die von diesem Knotenpunkt wegfließen:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (2.5)$$

Im einfachsten Fall bedeutet dies: Durch zwei in Serie geschaltete Widerstände fließt der gleiche Strom.

2. Kirchhoffsche Regel: Entlang einer Masche eines Leiternetzwerks ist die Summe der auftretenden Spannungen Null:

$$\sum_k U_k = 0 \quad (2.6)$$

Der einfachste Fall einer Masche ist die Parallelschaltung zweier Widerstände R_1 und R_2 (siehe Abb. 2.2). Hier besagt die 2. Kirchhoffsche Regel, dass die Spannungen U_1 und U_2 an den beiden Widerständen gleich groß sind. Entlang dieser Masche wird in Pfeilrichtung summiert: $U_1 + (-U_2) = 0$.

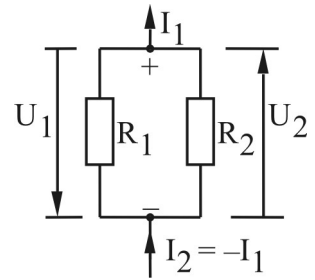


Abbildung 2.2: Beispiel einer Masche eines Leiternetzwerkes

2.2 Ohmsche Gesetze

Metallische Leiter², einfache Halbleiter und Elektrolyte zeigen bei konstanter Temperatur unabhängig vom Wert von U ein konstantes Verhältnis

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.} \quad (\text{Ohmsches Gesetz}) \quad (2.7)$$

Elektrische Leiter zeigen bei vorgegebener Geometrie (z.B. Draht, Flüssigkeit in Leitfähigkeits-Messzelle) eine materialcharakteristische Abhängigkeit der Stromstärke I von der angelegten Spannung U . Oft ist diese Abhängigkeit eine nichtlineare Funktion $I = f(U)$ oder gar mehrdeutig, falls die Leitfähigkeit von der Vorgeschichte bezüglich Spannung oder Temperatur abhängig ist.

3 Strom- und Spannungsmessung

3.1 Strom- und Spannungsmessung mit Drehspulgalvanometern

Im Geltungsbereich des ohmschen Gesetzes (s. Kap. 2.2) können Messungen eines Stroms I immer auf Messungen des Spannungsabfalls U über einem von diesem Strom I durchflossenen Widerstand³ und umgekehrt zurückgeführt werden. Welche Messtechnik eingesetzt wird, hängt stark von technisch/wirtschaftlichen Überlegungen ab. Entweder werden U und I durch Strommessung - z.B. mit Drehspulmessinstrumenten - oder durch Spannungsmessung - z.B. mit Digitalvoltmetern - bestimmt.

Bei allen nicht-ohmschen Leitern ist zur Bestimmung ihrer Charakteristik (Kennlinie) die gleichzeitige Messung von U und I notwendig (s. Abb. 2.3). Dort besteht kein konstantes Verhältnis von Strom zu Spannung wie bei ohmschen Leitern, aus dem vom Strom auf die Spannung (oder umgekehrt) zurückgeschlossen werden könnte.

Bei der Schaltung nach Abb. 2.3a liegt das Voltmeter mit dem Innenwiderstand R_V parallel zum Messobjekt, misst also eine korrekte Spannung U_M . Das Amperemeter hingegen misst statt des gesuchten Stromes I_M durch das Messobjekt die Summe der Ströme durch Messobjekt und Voltmeter

$$I_A = I_M + I_V = I_M + \frac{U_M}{R_V} \quad (2.8)$$

Bei der Spannungsmessung sollte der Strom durch das Spannungsmessgerät möglichst klein gegen den durch das Messobjekt fließende Strom I_M sein. Daher muß der Innenwiderstand R_V des Spannungsmessgeräts groß sein im Vergleich zum Widerstand des Messobjekts.

In Abb. 2.3b liegt das Voltmeter parallel zur Serienschaltung aus Ampèremeter und Messobjekt, misst also statt der korrekten Spannung U_M am Messobjekt die Summe von U_M und dem Spannungsabfall U_A über dem Ampèremeter. Hingegen wird der Strom I_M korrekt bestimmt.

$$U_V = U_M + U_A = U_M + R_A \cdot I_M \quad (2.9)$$

²ohne innere Grenzflächen zwischen gebieten unterschiedlicher Dichten n_{\pm} beweglicher Ladungsträger

³allgemein: ohmscher Leiter

⁴Voltmeter und Ampèremeter haben jeweils noch eine innere Struktur, die recht komplex sein kann.

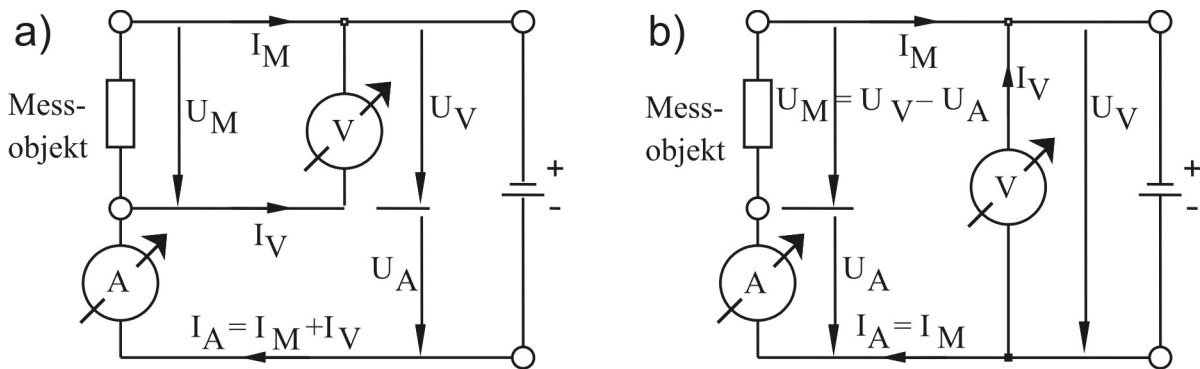


Abbildung 2.3: Die beiden Prinzipschaltbilder zur gleichzeitigen Messung der am Messobjekt anliegender Spannung U und des durch das Messobjekt fließenden Stroms I . Beide Schaltungen erzeugen zwangsläufige, jedoch jeweils verschiedene systematische Messfehler⁴.

Dabei ist R_A der Innenwiderstand des Amperemeters.

Bei der Strommessung sollte der Spannungsabfall am Strommessgerät möglichst klein gegen den Spannungsabfall U_M am Messobjekt sein und somit der Innenwiderstand R_A des Strommessgeräts möglichst klein im Vergleich zum Widerstand des Messobjekts.

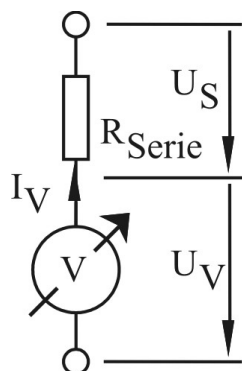
3.2 Messanordnung , Messbereichswahl

Im Versuchsaufbau sind zur Strom- und Spannungsmessung identische Drehspul- μ A-Meter vorgesehen. Ihre Daten sind:

$$R_A = R_V = 4100 \Omega, \quad \text{Vollausschlag bei } I_{A,max} = 10 \mu\text{A}, \quad \text{bzw. bei } U_{V,max} = 41 \text{ mV} \quad (2.10)$$

Sie müssen gemäss den Bedingungen aus Gl. 2.7 bis 2.12 mit geeigneten Parallel- oder Serienwiderständen für die Messaufgabe optimal hergerichtet werden.

3.2.1 Messbereichswahl beim Voltmeter



Um das Drehspul- μ A-Meter als Voltmeter zu nutzen, muss der Spannungsmessbereich vom Vollausschlagwert $U_{V,max}$ durch einen Serienwiderstand R_S zum Messinstrument auf den benötigten x -fachen Wert vergrößert werden:

$$x \cdot U_{V,max} = U_S + U_{V,max} \quad (2.11)$$

mit dem Spannungsabfall U_S über den Vorwiderstand R_S . Aus Gl. 2.11 folgt $U_S = (x - 1) \cdot U_{V,max}$ (siehe Abb. 2.4).

Bei gegebenem Strom gilt also wegen $U \propto I$ und Gl. 2.4

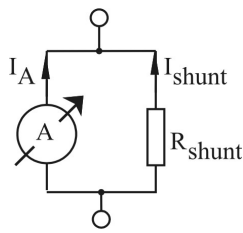
$$R_{\text{Serie}} = (x - 1) \cdot R_V \quad (2.12)$$

Abbildung 2.4:

3.2.2 Messbereichswahl beim Amperemeter

mit dem Strom I_{shunt} durch R_{shunt} . Wegen Gl. 2.6 ist $U_{\text{shunt}} = U_{A,max}$. Aus 2.13 folgt

$$I_{\text{shunt}} = (x - 1) \cdot I_{A,max}$$



Zur Nutzung des Drehspul- μA -Meters als Amperemeter, muss der Strommessbereich durch einen Parallelwiderstand R_{shunt} zum Messinstrument („Shunt-Widerstand“) von $I_{A,max}$ auf den benötigten x -fachen Wert vergrößert werden:

$$x \cdot I_{A,max} = I_{shunt} + I_{A,max} \quad (2.13)$$

Abbildung 2.5:

Wegen $U \approx I$ ergibt sich

$$R_{shunt} = \frac{R_A}{(x - 1)} \quad (2.14)$$

3.2.3 Beispiele von Messbereichserweiterungen

Spannungsmessung:

Der Messbereich eines vorhandenen Voltmeters soll von $U_{V,max} = 1 \text{ V}$ auf 20 V Vollausschlag erweitert werden. Mit $x = \frac{20 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 20$ ist der benötigte Serienwiderstand $R_S = 19 R_V$. Strommessung: Der Messbereich eines Amperemeters soll von $I_{A,max} = 10 \text{ mA}$ auf 20 mA Vollausschlag verdoppelt werden. Mit $x = \frac{20 \text{ mA}}{10 \text{ mA}} = 2$ wird der nötige Shunt-Widerstand $R_{sh} = \frac{R_A}{2-1} = R_A$, also gleich dem Innenwiderstand des Instruments.

4 Aufgabenstellung, Versuchsablauf

Es werden die Kennlinien ausgemessen:

1. Ohmscher Widerstand
2. Glühlampe
3. Halbleiterdiode

Als Spannungsquelle dient ein Netzgerät, das eine Spannung zwischen 0 und 25 V liefert. Die Spezifikationen der zum Einsatz kommenden Messgeräte sind in Kap. 3.2 angegeben. Die Kennlinien der zu messenden Leiter sind nicht bekannt. Sie sollten sich daher zunächst einen groben Überblick über den Verlauf der Kennlinien verschaffen. Berechnen Sie den Vorwiderstand R_S derart, dass der vom Voltmeter abgedeckte Bereich zwischen 0 und 20 V liegt. Das Messgerät soll also nun nicht 41 mV bei Vollausschlag anzeigen, sondern 20 V ! Der Messbereich muss also um das $x = \frac{20}{0,041}$ -fache erweitert werden. Damit erhalten wir $R_S = 2 \cdot 10^6 \Omega$ (wieso?). Zur Berechnung von R_{sh} bei einer Erweiterung des Strommessbereichs müsste man bei vorgegebener Spannung den minimalen Wert von R kennen. Da dieser aber nicht bekannt ist, muss der richtige Wert von R_{sh} durch Probieren gefunden werden. Anschließend lässt sich dann aus R_{sh} und R_A die Erweiterung x des Messbereichs und damit dieser selber berechnen. Zur Vereinfachung dient eine am Versuchsplatz vorhandene Tabelle.

Achtung: Die Halbleiterdiode darf weder in Durchlass- noch in Sperrrichtung mit zu hohen Spannungen betrieben werden!

Zeichnen Sie die 3 gemessenen Kennlinien auf mm-Papier in geeignete Diagramme. Diskutieren Sie abschließend die Kurvenverläufe.

5 Praxisbezug

Signalübermittlung im Nervensystem, Membranpotentiale der Zellen, Wirkstofftransport in Zellen („Ionenpumpen“)...

Korrosion an Metallteilen (Endoprothesen, Zahnfüllungen, Bauwerke, Autos, etc.),

EEG, EKG, alle elektrischen Messungen in der Physiologie, alle Arten von elektronischer Widerstands- und Leitfähigkeitsmessung.

6 Stichworte zur Vorbereitung

Definitionen von Strom, Spannung, Widerstand, Kirchhoffsche Regeln, Ohmsches Gesetz, Parallel- und Serienschaltung von Gleichstromwiderständen, Spannungs- und Strommessung, Halbleiterdiode in Durchlass- und Sperrrichtung