

<p>Technische Universität Dresden Fachrichtung Physik P. Eckstein, T. Schwieger 03/2003 bearbeitet: P. Eckstein, K. Richter 03/2009</p>	<p>Physikalisches Praktikum Grundpraktikum Versuch: EL</p>
--	---

Elektrische Leitfähigkeit

Inhaltsverzeichnis

- 1 Aufgabenstellung**
- 2 Grundlagen**
 - 2.1 Elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern
 - 2.2 Dotierung von Halbleitern
 - 2,3 Der p-n-Übergang
- 3 Experimentelle Aufgabenstellung und Auswertung**
 - 3.1 Temperaturkennlinien verschiedener Widerstände
 - 3.2 Strom – Spannung - Kennlinien verschiedener Halbleiterdioden
- 4 Experimentelle und messtechnische Hinweise**
 - 4.1 Versuchsaufbau
 - 4.2 Strom- und spannungsrichtige Messschaltung
- 5 Fragen zur Vorbereitung**
- 6 Literatur**

1 Aufgabenstellung

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine wichtige Materialeigenschaft fester Stoffe. Sie soll durch die Aufnahme der Temperatur-Kennlinien verschiedener Widerstände (Metall, Halbleiter) näher untersucht werden. Durch die Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien einiger Halbleiterbauelemente werden außerdem die Kenntnisse bzgl. der Wirkungsweise eines p-n-Übergangs vertieft. Der p-n-Übergang ist die Basisstruktur vieler Halbleiterbauelemente.

Es wird eine einfache Messschaltung begründet ausgewählt und aufgebaut. Die Auswertung der Messungen erfolgt anhand von graphischen Darstellungen.

2 Grundlagen

2.1 Elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern

Die elektrische Leitfähigkeit σ ist eine wichtige Materialeigenschaft fester Stoffe. Sie beruht auf der Existenz frei beweglicher Ladungsträger, z.B. von Elektronen (negative Ladungsträger) mit der Elementarladung e . Sowohl die Anzahldichte n als auch die Beweglichkeit μ_n dieser Ladungsträger bestimmen die Größe von σ .

Für Metalle gilt $\sigma = e n \mu_n$, bei Halbleitern gilt $\sigma = e(n \mu_n + p \mu_p)$, wobei p die Konzentration der Löcher (Defektelektronen) ist und μ_p deren Beweglichkeit. Der Größenbereich von σ umfasst viele Zehnerpotenzen: $10^{-20}/\Omega\text{cm} < \sigma < 10^{20}/\Omega\text{cm}$ (die Maßeinheit von σ ist $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$). Danach unterscheiden wir z.B. Isolatoren, Halbleiter, metallische Leiter und Supraleiter. Da sowohl n als auch μ von verschiedenen physikalischen Einflüssen, wie Temperatur, Lichtintensität, magnetische Feldstärke oder Druck abhängen, hängt auch σ davon ab.

Für den gerichteten Ladungstransport im Festkörper gibt es verschiedene Ursachen: elektrische Felder (Coulomb-Kraft), Temperaturgradienten sowie Konzentrationsunterschiede der frei beweglichen Ladungsträger (Diffusion).

Die technische Anwendung der Materialien in unzähligen elektrischen und elektronischen Bauelementen beruht u.a. auf ihrer speziellen elektrischen Leitfähigkeit. Die außerordentlich großen Unterschiede, die bei der elektrischen Leitfähigkeit von Festkörpern beobachtet werden, lassen sich mit Hilfe des Bändermodells der Energiezustände, welche die Elektronen im Festkörper einnehmen können, erklären. Das Bändermodell ist ein Ergebnis der Quantentheorie. Stark vereinfacht ergibt sich das in Abb. 1. dargestellte Bild.

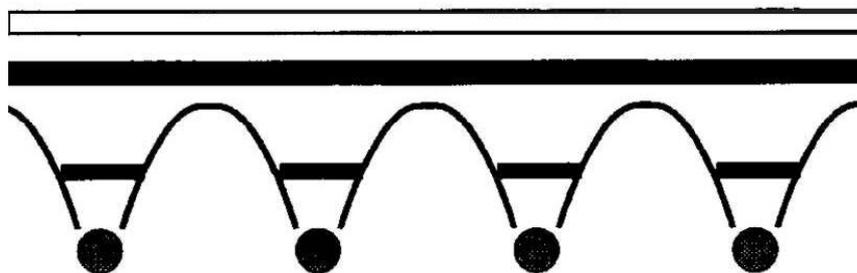


Abb. 1: Schematischer Verlauf des Potentials zwischen Atomrümpfen und der Lage von Bindungszuständen

Treten die Atome zu einem Atomgitter zusammen, so spalten die erlaubten diskreten Energieniveaus der Einzelatome (Bohr'sches Atommodell) in so viele dicht benachbarte Werte auf, wie Atome im Gitter enthalten sind (ca. $10^{23}/\text{cm}^3$), aus einem **Energiezustand** entsteht ein **Energiezustandsband** (nach dem Pauli-Prinzip dürfen nur zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin einen Energiezustand besetzen). Die Bänder sind bei einfachen Systemen durch **Energielücken** (einige eV) voneinander getrennt. In Abb. 1 ist der Sachverhalt schematisch für eine lineare regelmäßige Atomanordnung dargestellt. Die Größe der Energielücken hängt von der Atomsorte ab. Bänder, welche durch den bogenförmigen Potenzialverlauf zwischen den Atomrümpfen unterbrochen sind, werden von Elektronen besetzt, welche an ein bestimmtes Atom gebunden sind. Die Bindungskraft und damit die Bindungsenergie ist um so größer, je tiefer das Band liegt. Falls die zusammenhängenden Bänder oberhalb des „Potenzialgebirges“ mit (delokalisierten) Elektronen besetzt sind, kann der Festkörper den Strom leiten, da diese Elektronen durch ein elektrisches Feld leicht verschoben werden können. Bei Metallen ist das auch bei tiefen Temperaturen der Fall, die Valenzelektronen, das sind die äußeren am schwächsten gebundenen Elektronen, befinden sich im Leitungsband. Bei Halbleitern hingegen befinden sich die Valenzelektronen bei $T = 0 \text{ K}$ in gebundenen, lokalisierten Zuständen und müssen erst durch Energiezufuhr in das Leitungsband gehoben werden, damit das Material den Strom leiten kann. Die Besetzung der Energiebänder mit Elektronen ist für einige typische Fälle in Abb. 2 schematisch dargestellt.

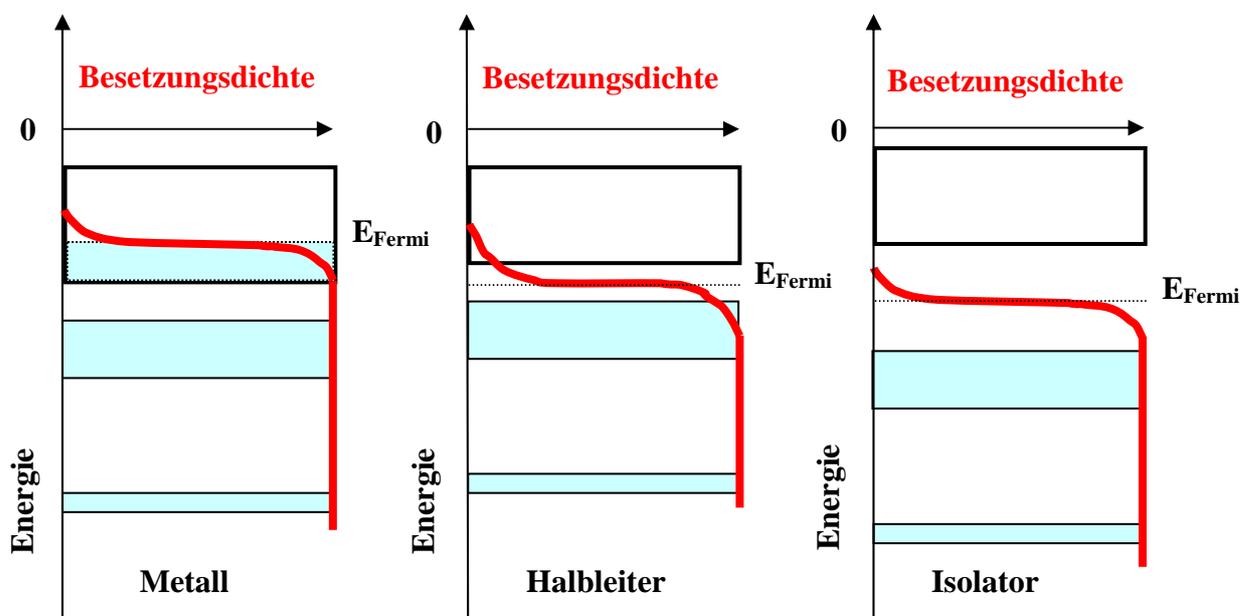


Abb. 2: Vereinfachtes Bändermodell: Die gefüllten Bereiche markieren die besetzten Zustände bei $T = 0 \text{ K}$.

Die Fermi-Kurve zeigt wie durch Wärmezufuhr ($T > 0 \text{ K}$) auch Zustände oberhalb der Fermi-Grenze von den Elektronen besetzt werden.

So gelangen beim Halbleiter einige Elektronen in das hervorgehoben umrandete Leitungsband, während beim Isolator dafür die Energielücke zu groß ist.

Die **Fermi-Energie** ist eine Grenzenergie für die Elektronen im Grundzustand. Nur die erlaubten Zustände bis zur Fermi-Energie (diese kann auch in der Energielücke liegen) können von den Elektronen eingenommen werden. Bei höheren Temperaturen werden auch andere erlaubte Zustände besetzt. Die **Fermi-Verteilung** beschreibt die Besetzungsdichte, sie ist in Bild 2 als Kurve für eine von $T=0\text{K}$ verschiedene Temperatur eingezeichnet. Man sieht, dass sich bei Metallen und Isolatoren im gewählten Beispiel die Anzahl der Ladungsträger im Leitungsband nicht geändert hat, während im Halbleiter einige Elektronen in das Leitungsband gelangt sind.

Die im Valenzband entstandenen „Löcher“ oder „Defektelektronen“ (unbesetzte Zustände) tragen ebenfalls zum Stromfluss bei.

Im Versuch EL soll die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern von der Temperatur näher untersucht werden. In beiden Fällen wird bei Wärmezufuhr der Ladungstransport (die Beweglichkeit) durch die Schwingungen der Atome zunehmend behindert, das führt zu einer Erhöhung des Widerstands mit steigender Temperatur. Die **Temperaturabhängigkeit von Widerständen mit metallischer Leitung** kann wie folgt beschrieben werden:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (T - T_0)^2 + \dots)$$

R_0 : Widerstand bei Temperatur T_0 (0°C, willkürliche Festlegung)

R_T : Widerstand bei Temperatur T

α : linearer Temperaturkoeffizient

β : quadratischer Temperaturkoeffizient

Die **Temperaturkoeffizienten sind materialspezifisch**. Sie können durch die Zusammensetzung des Widerstandsmaterials gezielt beeinflusst werden, so dass es nicht nur **Widerstände mit positiven** sondern auch solche mit **negativen oder zu vernachlässigenden Temperaturkoeffizienten** gibt. Für viele Metalle kann im Temperaturbereich von 0...100°C das quadratische Glied vernachlässigt werden.

Bei Halbleitern wird der Einfluss der Gitterschwingungen durch die starke Temperaturabhängigkeit der Zahl frei beweglicher Ladungsträger überkompensiert, so **nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur exponentiell ab**:

$$R_T = a \cdot e^{b/T}$$

R_T : Widerstand bei Temperatur T (Kelvin)

a, b : empirische Konstanten

2.2 Dotierung von Halbleitern

In Halbleitern kann man durch gezielte „Verunreinigung“ des Materials, man spricht von **Dotierung**, die Ladungsträgerdichte, sowohl im Leitungsband als auch im Valenzband in weiten Bereichen variieren. Durch die Dotierung werden erlaubte Zustände geschaffen, welche in der Energielücke liegen (Abb. 3). Elektronenübergänge aus dem Valenzband zu diesen Plätzen bzw. von entsprechenden Plätzen in das Leitungsband erfordern nur sehr wenig Energie und finden deshalb häufig statt.

Gibt man **Akzeptoren** hinzu, das sind Atome 3-wertiger Elemente (z.B. B), so kommt es zu einem Elektronenmangel, die „Löcherdichte“ im Valenzband wird erhöht, da die Elektronen in die nahe der Valenzbandgrenze gelegenen Zustände wechseln. Der Stromfluss wird in diesem Falle von den mobilen Defektelektronen getragen, man spricht von **p-Leitung**. Gibt man hingegen **Donatoren** hinzu, das sind Atome 5-wertiger Elemente (z.B. P), so wird das Leitungsband mit zusätzlichen Elektronen angereichert, da die Elektronen aus den nahe der Leitungsbandgrenze liegenden Zuständen leicht in das Leitungsband wechseln, der Stromfluss wird in diesem Fall hauptsächlich von den Elektronen getragen, man spricht von **n-Leitung**.

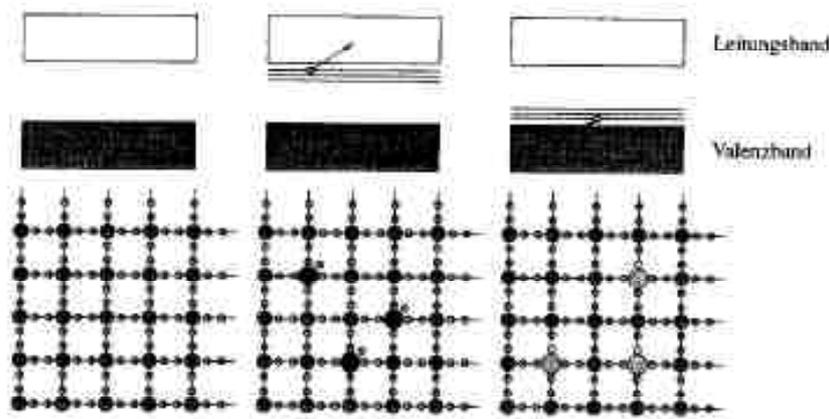


Abb. 3: Lage der zusätzlichen besetzten Niveaus beim n-Leiter (Mitte) und der unbesetzten Niveaus beim p-Leiter (rechts) im Vergleich zum reinen (intrinsischen) Halbleiter (links)

2.3 Der p-n-Übergang

Bringt man einen p-Halbleiter und einen n-Halbleiter in engen Kontakt, so ergibt sich ein **p-n-Übergang**. Diese Konfiguration wurde durch ihre besonderen elektrischen Eigenschaften zur Grundlage vieler elektronischer Bauelemente.

Durch die unterschiedliche Konzentration von Löchern und Elektronen auf beiden Seiten des p-n-Übergangs kommt es zu einem Stromfluss von Löchern und Elektronen aufgrund des Diffusionsgefälles. Im n-Bereich verbleiben die positiven Donator-Ionen, im p-Bereich die negativen Akzeptor-Ionen, d.h. es werden Raumladungsschichten erzeugt, die arm an freien Ladungsträgern sind. Die Gesamtladung des gesamten pn-Überganges beträgt weiterhin null. Die Diffusion der Ladungsträger führt nun zur Entstehung eines elektrischen Feldes in der Verarmungsschicht, welches dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Diffusionsstrom und dem Strom ein, der durch das elektrische Feld hervorgerufen wird (Driftstrom). Es fließt also kein resultierender Strom.

Die Breite der Verarmungsschicht hängt von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Ladungsträger d.h. der Dotierung - ab. Bei schwach dotierten pn-Übergängen ist die Verarmungsschicht relativ breit, während starke Dotierung zu einer schmalen Verarmungsschicht führt.

Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an den p-n-Übergang wird das Gleichgewicht zwischen Drift- und Diffusionsstrom gestört. Die äußere Spannung kann in Sperrrichtung oder Durchlassrichtung an den p-n-Übergang angelegt werden. Sperrrichtung bedeutet, dass der Minuspol an den p-Bereich und der Pluspol an den n-Bereich des Überganges angelegt wird. Der Übergangsbereich besitzt durch die geringe Anzahl von Ladungsträgern einen sehr hohen Widerstand, im Vergleich zum übrigen Halbleiter, so dass die Diffusionsspannung und die äußere angelegte Spannung hier abfallen. Die äußere Spannung hebt die Energieniveaus im p-leitenden Bereich an, da die Elektronenenergie durch Verstärken des negativen Potentials erhöht wird. Damit wächst auch die Höhe der Potentialbarriere um den Betrag der äußeren Spannung.

Wird die Richtung der angelegten Spannung umgedreht, ist der p-n-Übergang in Durchlassrichtung geschaltet. Die Potentialbarriere wird um den Betrag der äußeren Spannung abgesenkt. Dadurch nimmt der Diffusionsstrom stark zu, während der Driftstrom nahezu unverändert bleibt. Folglich fließt ein resultierender Gesamtstrom. Dieser wird durch die *Shokley-Gleichung* beschrieben:

$$I = I_0 \cdot (e^{eU/kT} - 1)$$

Hierbei ist I_0 der Sättigungsstrom, der bei genügend hoher Spannung durch den p-n-Übergang in Sperrrichtung fließt. U ist die angelegte Spannung (positiv in Durchlassrichtung und negativ in Sperrrichtung), sowie T die Temperatur. Die typische Strom-Spannungs-Kennlinie eines p-n-Überganges ist in Abb. 4 dargestellt.

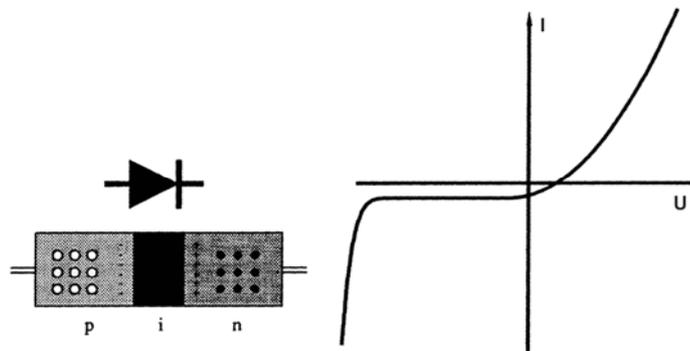


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Diode und Schaltzeichen (links) sowie der typische Verlauf einer Diodenkennlinie

In Abb. 4 sieht man bei hohen Spannungen in Sperrrichtung eine sehr starke Zunahme des Stromes, welche durch die *Shokley-Gleichung* nicht beschrieben wird. Dieser Effekt wird als Durchbruch bezeichnet. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten: den Zener-Durchbruch und den Lawinen- (oder Avalanche) Durchbruch.

Der Lawinendurchbruch tritt an schwach dotierten pn-Übergängen auf. Die Ladungsträger, die durch das elektrische Feld in der Übergangszone beschleunigt werden, haben häufig Gelegenheit mit den Gitterionen zu kollidieren.

Wird bei einem solchen Stoß genügend Energie übertragen, so kann Stoßionisation auftreten, es werden also Elektron-Loch Paare erzeugt. Die neuen Ladungsträger können weiterhin Stoßionisation hervorrufen. Die lawinenartige Verstärkung verursacht einen hohen Sperrstrom im pn-Übergang.

Der Zenerdurchbruch dagegen tritt in stark dotierten pn-Übergängen auf. Dort kommt es schon bei relativ kleinen Sperrspannungen zu einer Kreuzung der Energiebänder, d.h. die Leitungsbandkante der n-dotierten Seite liegt energetisch niedriger als die Valenzbandkante der p-dotierten Seite. Damit liegen sehr viele Elektronen im p-Valenzband energetisch etwas höher als die leeren Zustände im n-Leitungsband, die allerdings noch durch eine Potenzialbarriere voneinander getrennt sind. Ist diese Barriere jedoch hinreichend dünn, besteht für die Elektronen im p-Valenzband eine nennenswerte Wahrscheinlichkeit, aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffektes zum n-Leitungsband zu gelangen. Man kann diesen Effekt auch so auffassen, daß die Atome in der Verarmungsschicht feldionisiert werden. Dabei herrscht in der Verarmungsschicht ein so starkes elektrisches Feld, dass die kovalenten Bindungen zwischen den Atomen aufgebrochen werden und Elektronen aus den Bindungen gerissen werden, die dann zum n-Bereich des Überganges beschleunigt werden.

In Durchlassrichtung wird die Potentialbarriere zwischen den Fermi-niveaus der jeweiligen p- und n-leitenden Diodenschicht um den Betrag der angelegten Spannung abgesenkt, so dass nun wesentlich mehr Elektronen die Barriere vom n- zum p-leitenden Bereich passieren können. Der Driftstrom vom p- in den n-Bereich bleibt dabei praktisch unverändert. Dieser Strom wird durch die *Shockley-Gleichung* beschrieben. Ist die angelegte Spannung größer als die Differenz der Fermi-niveaus der p- und n-Schicht, geht der p-n-Übergang in den ohmschen Bereich über, d.h. er verhält sich wie ein normaler Widerstand. Dieser Übergang entspricht dem "Knick" in der I-U-Kennlinie in Abb. 4. In pn-Übergängen von stark dotierten Halbleitern entspricht die Lage dieses Knickes ungefähr der Bandlücke der Halbleiter.

Im Falle der Leuchtdioden können Löcher und Elektronen im pn-Übergang miteinander rekombinieren und ein Exciton (ein angeregtes Elektronen-Loch Paar) bilden. Dieser angeregte Zustand zerfällt dann wieder unter Abstrahlung von Photonen (Licht). Die Energie (Farbe) der abgestrahlten Photonen wird durch die Bandlücke der verwendeten Halbleiter bestimmt.

3 Experimentelle Aufgabenstellung und Auswertung¹

3.1 Temperaturkennlinien verschiedener Widerstände

3.1.1 Für einen **NiCr -Schichtwiderstand**, einen **Platin-Dünnschichtwiderstand** und einen **Halbleiter-Widerstand** (Metalloxid-Keramik) sind die Widerstände in Abhängigkeit von ihrer Temperatur durch Strom- und Spannungsmessungen zu bestimmen.

Dabei soll die durch Messstrom und -spannung in den jeweiligen Widerstand umgesetzte Leistung maximal 1/100 der Heizleistung des Thermostaten betragen! Warum?

3.1.2 Die Widerstandsverläufe sind als Funktion der Temperatur grafisch darzustellen und hinsichtlich ihres Verlaufes (Linearität) und ihrer Empfindlichkeit zu charakterisieren. Darauf Bezug nehmend sind mögliche Anwendungen zu diskutieren.

Sinnvoll ist die Darstellung der unterschiedlichen Widerstandsverläufe in einem Diagramm mit mehrfacher Ordinatoreinteilung!

3.1.3 Aus der grafischen Darstellung sind die Nennwiderstände, die bei 20°C angegeben werden einschließlich ihrer F zu ermitteln. Außerdem ist für den Platinwiderstand der lineare Temperaturkoeffizient zu bestimmen.

3.2 Strom-Spannungs-Kennlinien verschiedener Halbleiterdioden

3.2.1 Für eine **Gleichrichterdiode**, eine **Z - Diode** und eine **Leuchtdiode (LED)** sind unter Beachtung der jeweils zulässigen Verlustleistung die Strom-Spannungs-Kennlinien im Durchlassbereich, für die Z-Diode auch im Sperrbereich, zu messen und grafisch darzustellen.

3.2.2 In den Kennliniendarstellungen sind die jeweiligen Flussspannungen bzw. die Durchbruchspannung (Z - Diode) grafisch zu ermitteln und einzuzeichnen.

3.2.3 Der differentielle Widerstand r_{diff} der Dioden im Durchlassbereich sowie im Durchbruchbereich (Z-Diode) ist zu bestimmen.

4 Experimentelle und messtechnische Hinweise

4.1 Versuchsaufbau

Für die Messungen zur Aufnahme verschiedener Kennlinien stehen ein Experimentierchassis, ein Stromversorgungsgerät mit variabler Spannungsquelle sowie zwei Multimeter für Strom- und Spannungsmessungen zur Verfügung (Abb. 5). Auf dem Experimentierchassis (Abb. 6) befinden

¹ Die konkreten, den jeweiligen Studiengängen angepaßten, Aufgabenstellungen sowie notwendige technische Daten der Experimentier- und Meßgeräte liegen am Versuchsplatz aus.

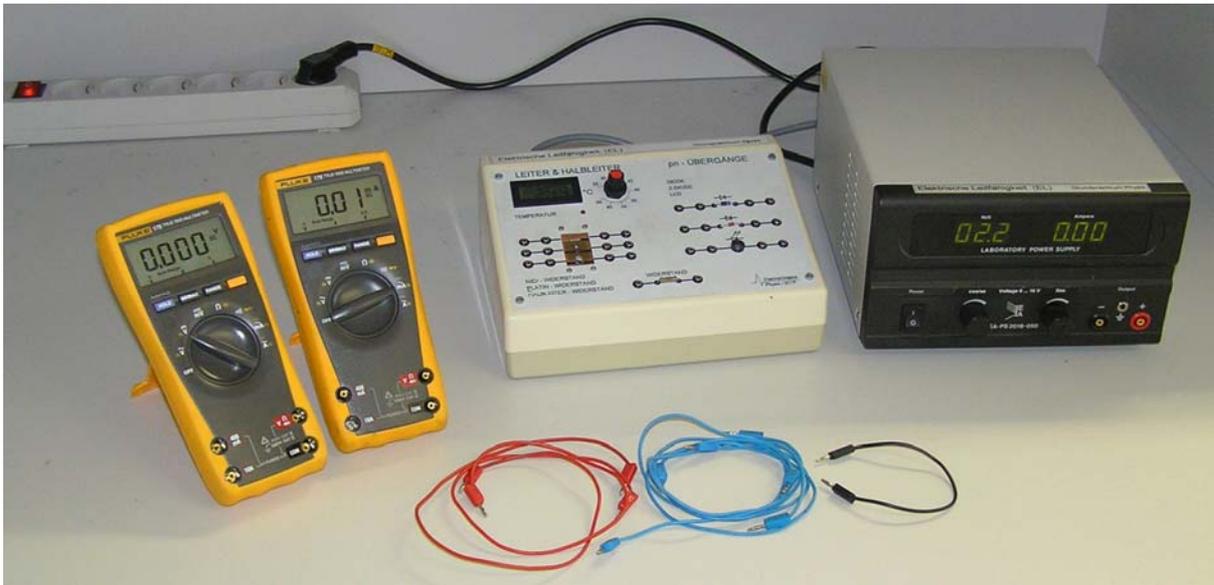


Abb. 5: Versuchsplatz

sich die Bauelemente [a], deren Temperaturabhängigkeit untersucht werden soll, in direktem Wärmekontakt mit einem beheizten temperaturstabilisierten Kupferkörper [b]. Die gewünschte Temperatur wird mit einem Potentiometer [c] eingestellt, mittels Temperaturfühler gemessen und digital angezeigt [d]. Die Halbleiterbauelemente [e], deren Strom-Spannungs-Kennlinien aufzunehmen sind, befinden sich ebenfalls auf diesem Chassis. Außerdem steht dort ein Widerstand [f], der als "Vorwiderstand" zur Strombegrenzung für die Bauelemente, deren Verlustleistung auf keinem Fall überschritten werden darf, zur Verfügung.

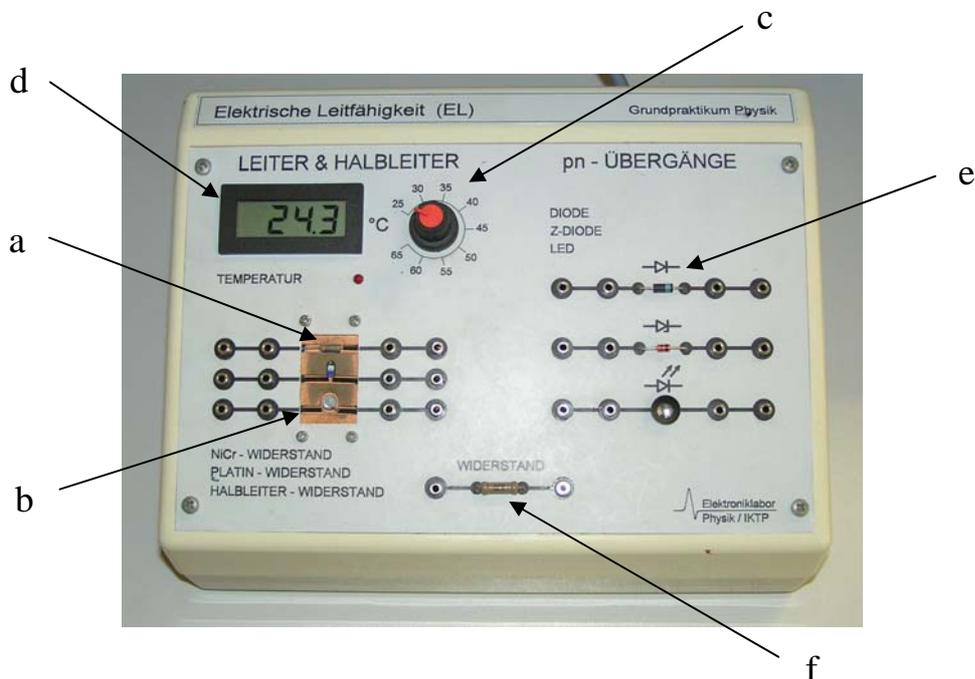


Abb. 6: Experimentierchassis

Am Stromversorgungsgerät wird die benötigte Spannung mittels Potentiometern zur Grob- und Feineinstellung gewählt. Die Multimeter verfügen über eine automatische Messbereichseinstellung, die für jeden Messwert die bestmögliche Auflösung und Genauigkeit garantiert.

4.2 Strom- und spannungsrichtige Messschaltung

Zur Messung des elektrischen Widerstandes mittels Spannungs- und Strommessung können zwei Schaltungen verwendet werden. Dabei wird jeweils nur eine der beiden Messgrößen richtig, d.h. bis auf die üblichen Messfehler korrekt bestimmt. In die andere Größe geht ein durch die Innenwiderstände der Messgeräte bedingter systematischer Fehler ein, der korrigiert werden muss. Mit der Schaltung (A) wird die Stromstärke richtig gemessen. Das Voltmeter zeigt eine um den Spannungsabfall ΔU über dem Amperemeter zu große Spannung an. Mit dem Innenwiderstand R_A des Amperemeters beträgt der durch die Schaltung verursachte relative Fehler für die Spannungsmessung:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R_A}{R}$$

Die Schaltung (B) hat den Vorteil einer richtigen Spannungsmessung. Die Stromstärke wird um den durch das Voltmeter fließenden Strom zu groß gemessen. Bei bekanntem Innenwiderstand R_V des Voltmeters beträgt der Schaltungsfehler bei der Strommessung:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{R}{R_V}$$

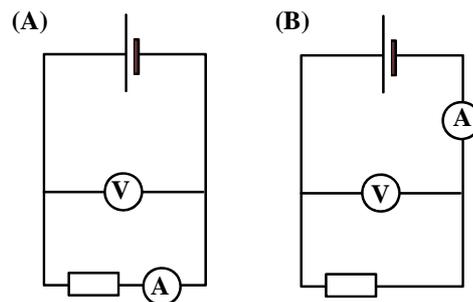


Abb. 5: Stromrichtige (A) und spannungsrichtige (B) Schaltung zur Widerstandsmessung

Grundsätzlich liefern nach Ausführung der Korrektur beide Schaltungen das gleiche Ergebnis. Es sollte dennoch immer die Schaltung mit dem kleineren Schaltungsfehler verwendet werden, da R_A und R_V selbst fehlerbehaftete Größen sind. Aus beiden Gleichungen folgt, dass für Widerstände $R > (R_A R_V)^{1/2}$ die stromrichtige und anderenfalls die spannungsrichtige Messschaltung besser geeignet ist.

5 Fragen zur Vorbereitung

- In welchen Materialien sind die zur Verfügung stehenden Ladungsträger keine Elektronen?
- Erklären Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen einem Halbleiter und einem Isolator
- Was besagt das Pauliprinzip? Was bedeutet das Pauliprinzip in einem Festkörper mit sehr vielen Elektronen?
- Wie hoch ist die thermische Energie von Elektronen bei verschiedenen Temperaturen ? Warum kann ein bestimmter Teil der Elektronen die Energielücke überspringen und ein anderer nicht ?
- Wie groß ist die Bandlücke von ausgewählten Halbleitern, wie Silizium, Germanium oder GaAs? Wie groß ist die Bandlücke in typischen Isolatoren? Setzen Sie diese Werte in Verhältnis zu den Energien von Photonen (Wärmestrahlung, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung)!
- Warum befinden sich die Donator- bzw. Akzeptorniveaus knapp unterhalb bzw. oberhalb des Leitungs- bzw. Valenzbandes?
- Warum darf die durch Messstrom und -spannung in dem jeweiligen Widerstand umgesetzte Leistung maximal 1/100 der Heizleistung des Thermostaten betragen?
- Worin besteht der Unterschied zwischen den üblichen Messfehlern für Strom und Spannung und den durch strom- bzw. spannungsrichtiges Messen verursachten Spannungs- bzw. Stromfehlern?
- Wie sieht die Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie von Halbleiterbauelementen aus?
Wieso bewirkt der notwendige Vorwiderstand eine Strombegrenzung?

6 Literatur

Bergmann - Schäfer,	Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.II, Elektrizität und Magnetismus
Demtröder,	Experimentalphysik 2, Elektronik und Optik, Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle und Festkörper
Eichler, Kronfeld, Sahn,	Das Neue Physikalische Grundpraktikum
Becker / Jodl,	Physikalisches Praktikum für Naturwissenschaftler und Ingenieure
Rudden / Wilson,	Elementare Festkörperphysik und Halbleiterelektronik