

Versuch C 11: Kennlinien von HL-Diode und Transistor

1. Literatur: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd.II
 W. Walcher, Praktikum der Physik
 W. Westphal, Physikalisches Praktikum
 Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
 Kohlrausch, Praktische Physik, Bd. 2
 Unger/Schultz, Elektronische Bauelemente und Netzwerke, Bd. 1

Stichworte: Halbleiter, Eigen- u. Störstellenleitung, p- und n-Dotierung, pn-Übergang, Diffusion, Raumladung, Rekombination, pnp- und npn-Transistor, Emitter- und Basis-Schaltung, Kennlinien

2. Grundlagen

2.1 Elektrische Leitung in Halbleitern

2.1.1 Eigenleitung

Halbleiter lassen sich - wie ihr Name bereits andeutet - bezüglich ihrer elektr. Leitfähigkeit zwischen Isolatoren und Metallen einordnen. Zur Veranschaulichung der Leitungsmechanismen betrachten wir ihren Kristallbau. Technisch wichtige Halbleiter wie Silizium (Si), Germanium (Ge) oder Galliumarsenid (GaAs) kristallisieren im Diamant- bzw. Zinksulfidgitter, in dem jedes Atom von vier Nachbarn umgeben ist. Die Bindung zwischen zwei benachbarten Atomen erfolgt durch jeweils ein Elektronenpaar. Abb. 1a zeigt die Elementarzelle eines Diamantgitters, Abb. 1b ein ebenes Modell der Bindungen. Alle vier Valenzelektronen (d.h. Elektronen auf der äußeren Schale) eines Si-Atoms werden zur Bindung benötigt. Bei der absoluten Temperatur $T = 0$ ist der Kristall ein Isolator, weil keine frei beweglichen Ladungen vorhanden sind.

Mit steigender Temperatur können einzelne Elektronen aufgrund ihrer thermischen Energie die Bindungen verlassen und durch den Kristall wandern. Sie liefern einen Beitrag zur Leitfähigkeit und werden deshalb Leitungselektronen genannt. Bei Anlegen eines äußeren elektr. Feldes E werden sie sich vorzugsweise entgegen der Feldrichtung bewegen (Ladung $-e$) und damit einen Strom tragen. Zum anderen bleibt an jeder Stelle, an der ein Elektron eine Bindung verlassen hat, eine Lücke, in die ein benachbartes gebundenes Elektron ohne wesentlichen

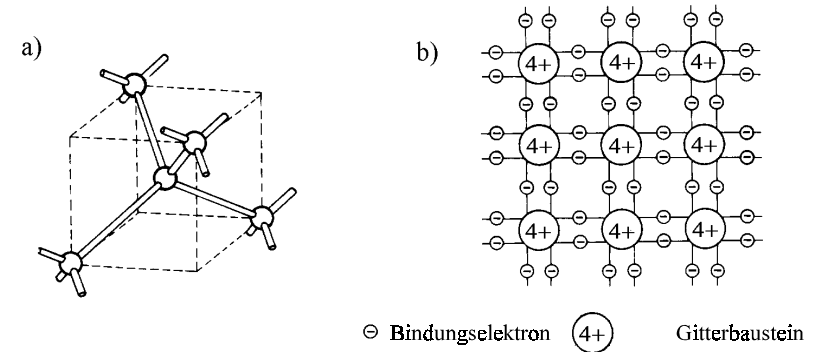


Abb.1: a) Gitterstruktur, b) ebenes Bindungsmodell eines Si- oder Ge-Kristalls bei $T = 0$

Energieaufwand springen kann, da dies den Übergang in einen energetisch gleichwertigen Bindungszustand darstellt. Das Elektron hinterlässt damit eine Bindungslücke an anderer Stelle. Bei Anlegen eines Feldes werden sich die Lücken vorzugsweise in Feldrichtung (wie Teilchen mit Ladung $+e$) bewegen und ebenfalls zur Leitfähigkeit beitragen. Man nennt die Bindungslücken *Defektelektronen* oder *Löcher*. Abb. 2 veranschaulicht den Mechanismus dieser *Eigenleitung* oder *intrinsischen* Leitung eines Halbleiters.

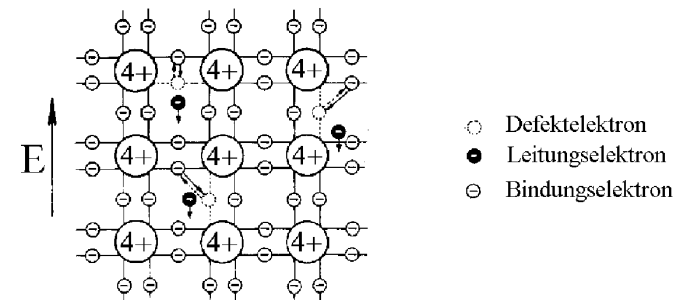


Abb.2: Anschauliches Modell der Eigenleitung

Leitungselektronen und Defektelektronen haben durch ihren Entstehungsmechanismus im reinen Halbleiter die gleiche Anzahldichte n_i , welche im wesentlichen exponentiell von der Temperatur T abhängt:

$$n_i \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

Die Exponentialfunktion (der sog. Boltzmannfaktor) ist hierbei ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Valenzelektron in einem Halbleiter der Temperatur T genügend thermische Energie besitzt um den Bindungszustand der Energie ΔW aufzubrechen.

Bei Raumtemperatur (300 K) beträgt z.B. für reines Ge: $n_i \approx 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Mit steigender Temperatur erhöht sich diese Anzahl dichte beträchtlich (ca. 10^{14} cm^{-3} bei 320 K) und damit auch die Leitfähigkeit des Ge aufgrund der Eigenleitung. Es erhöht sich aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron durch thermische Stöße im Kristall soviel Energie verliert, dass es von einem Loch eingefangen wird. Man nennt diesen Vorgang die *Rekombination* eines Elektron-Loch-Paares. Im thermodynamischen Gleichgewicht wird jedoch die gleiche Anzahl von Elektron-Loch-Paaren erzeugt (generiert) wie durch Rekombination verschwindet.

2.1.2 Störstellenleitung

Werden in einen Halbleiter wie Si oder Ge geringe Mengen drei- oder fünfwertiger Fremdatome wie z.B. Bor oder Antimon eingebaut - man nennt dies Dotierung-, so sind diese Fremdatome auf einzelne Gitterplätze verteilt. Aufgrund ihrer fehlenden oder überschüssigen Valenz zu den Si- bzw. Ge-Nachbaratomen befindet sich an der Stelle eines Fremdatoms je ein Defekt- oder ein Valenzelektron, das im Vergleich zu den Valenzelektronen des reinen Halbleiters nur wenig an das Fremdatom gebunden ist. Bei schon relativ tiefer Temperatur können deshalb diese Löcher oder Elektronen die Fremdatome verlassen und einen wesentlichen Beitrag zur Leitfähigkeit liefern. Man nennt dies *Störstellenleitung* oder *extrinsische* Leitung. Abb. 3 veranschaulicht diesen Leitungsmechanismus. Die drei- oder fünfwertigen Fremdatome, die leicht ein Elektron aufnehmen bzw. abgeben können, werden Akzeptoren bzw. Donatoren genannt. Da diese zwar leicht ionisierbar aber selbst nicht beweglich sind, tragen je nach Dotierung im wesentlichen nur die von den Fremdatomen abgelösten Ladungsträger zum Strom bei. Bei einer Dotierung mit überwiegend Akzeptoren liegt p-Leitung, bei einer mit überwiegend Donatoren n-Leitung vor. Diese positiven oder negativen beweglichen Ladungsträger werden Majoritätsträger, die jeweils andere Ladungsorte Minoritätsträger genannt. Das Produkt der Konzentrationen beider Ladungsträgersorten $n \cdot p$ ist jedoch unabhängig von der Dotierung und nur von den intrinsischen Eigenschaften des Halbleiters abhängig:

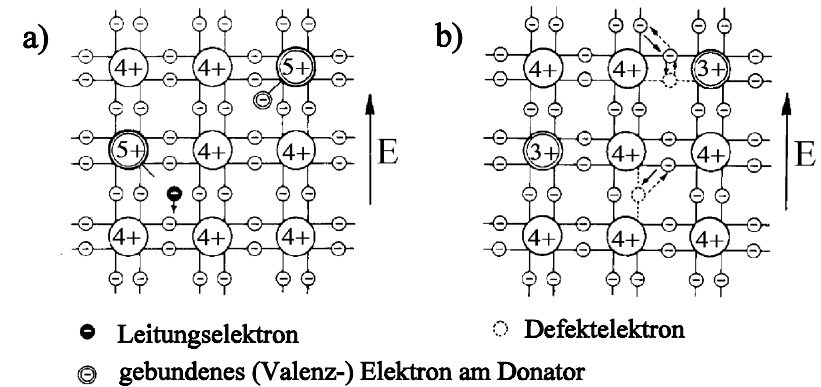


Abb.3: Modell der Störstellenleitung: a) Elektronenleitung (n-Leitung), b) Löcherleitung (p-Leitung)

$$np = n_i^2 \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{k_B T}\right) \quad (2)$$

Bei einer üblichen Dotierung von z.B. Ge mit einem Sb-Atom auf ca. 10^6 Ge-Atome sind bei Raumtemperatur praktisch alle Sb-Donatoren ionisiert. Die Konzentration der Leitungselektronen als Majoritätsträger ist $n = n_{Sb} \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, also beträchtlich größer als die Konzentration n_i der Elektron-Lochpaare im reinen Ge-Kristall (s.o.). Die Konzentration der Löcher als Minoritätsträger ist mit Gleichung (2) $p \approx 4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

2.2 pn-Übergang

Ein pn-Übergang eines Halbleiters entsteht, wenn in seinem Inneren zwei homogen dotierte Bereiche, ein p-leitender und ein n-leitender aneinandergrenzen. Untersucht man den elektr. Stromfluss durch solch einen Übergang, so stellt man fest, dass für nicht zu große Spannungen ein wesentlicher Strom nur in einer Richtung fließen kann (s. Abb. 4). Der pn-Übergang wirkt als Gleichrichter. Das elektronische Bauelement mit einem pn-Übergang wird - in Analogie zur Gleichrichterwirkung einer Vakuum-Diode - *Halbleiter-Diode* oder kurz *Diode* genannt.

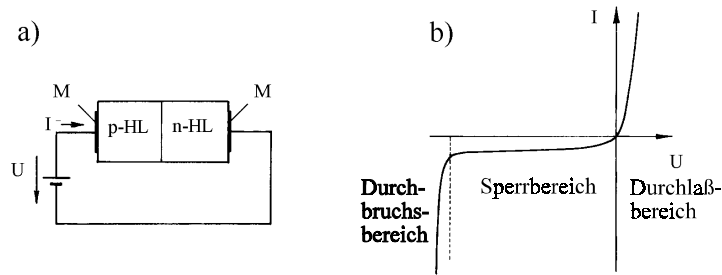


Abb.4: a) Halbleiter-Diode schematisch (M: Metallkontakte)
b) Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Übergangs

Zur Erläuterung der Gleichrichterwirkung eines pn-Übergangs wird das Gleichgewicht verschiedener elektr. Ströme zwischen p- und n-leitendem Gebiet betrachtet (s. Abb. 5).

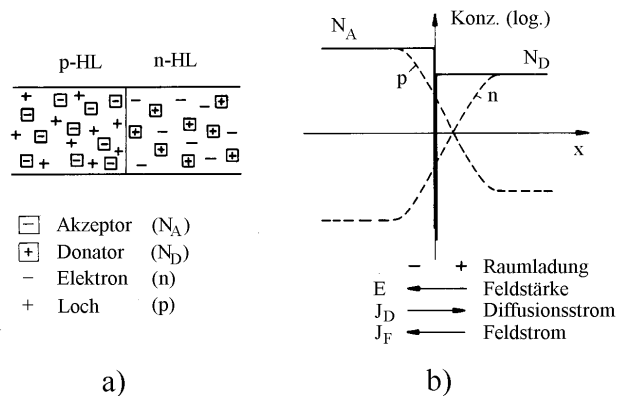


Abb.5: Zur Sperrschichtausbildung am pn-Übergang:
a) anschauliches Modell, b) Konzentrationsverlauf

Ein abruptes Konzentrationsgefälle der beweglichen Löcher und Elektronen an der Grenzschicht zwischen p- und n-Halbleiter ist thermodynamisch instabil: Löcher diffundieren bei ihrer thermischen Bewegung vorzugsweise vom p- in das n-Gebiet, um das Konzentrationsgefälle abzubauen; Elektronen diffundieren entsprechend umgekehrt vom n- in das p-Gebiet. Mit dieser Diffusion ist ein

elektr. Strom j_D verknüpft. Die in der Umgebung der Dotierungsgrenze ortsfesten Ladungen der Akzeptoren und Donatoren können dadurch nicht mehr kompensiert werden. Sie bilden eine Raumladung, die ein elektr. Feld E erzeugt. Es resultiert ein Feldstrom j_F der beweglichen Ladungsträger, welcher im Gleichgewicht des pn-Übergangs (ohne angelegte äußere Spannung) gerade den mit der Diffusion verknüpften Strom j_D kompensiert.

Bei diesem Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom müssen zwei Teilströme betrachtet werden, die für den Kennlinienverlauf einer Diode wesentlich sind: Eine geringe Anzahl der Löcher, die aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet diffundieren, rekombiniert dort mit Elektronen. Umgekehrt rekombinieren einige Elektronen, die aus dem n- in das p-Gebiet diffundieren, dort mit Löchern. Dieser Teil des Diffusionsstroms, der sog. *Rekombinationsstrom* j_R muss durch einen Teil des Feldstroms, den sog. *Generationsstrom* j_G thermisch erzeugter Elektron-Lochpaare ausgeglichen werden. Anderenfalls würden sich Ladungen an einer Seite des pn-Übergangs anhäufen.

Betrachtet man die Größe dieser Ströme in Abhängigkeit von den für sie notwendigen thermischen Energien der Ladungsträger, so stellt man fest, dass die Löcher bzw. Elektronen des Rekombinationsstromes bei der Diffusion durch die Grenzschicht ein elektr. Feld E und eine damit verbundene Potentialschwelle U_D überwinden müssen. Die Ladungsträger des Generationsstroms werden hingegen durch das Feld E beschleunigt, können also über die Potentialschwelle U_D abfließen. Sie benötigen andererseits aber zu ihrer Erzeugung die Energie ΔW , also:

$$j_R \sim \exp\left(-\frac{eU_D}{k_B T}\right), \quad j_G \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right) \quad (3)$$

Legt man an den Halbleiter mit pn-Übergang eine äußere positive Spannung U (+ an die p-, - an die n-Seite), so wird die Potentialschwelle U_D um U erniedrigt, bei Anlegen einer negativen Spannung entsprechend erhöht. Der Rekombinationsstrom wird um den Faktor $\exp(eU/kT)$ geändert, der Generationsstrom bleibt unverändert (siehe Abb. 6). Der Gesamtstrom durch den pn-Übergang ist damit:

$$j(U) = j_R(U) + j_G = j_R(U) - j_R(0) \quad \text{bzw.} \quad (4)$$

$$j(U) = j_R(0) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

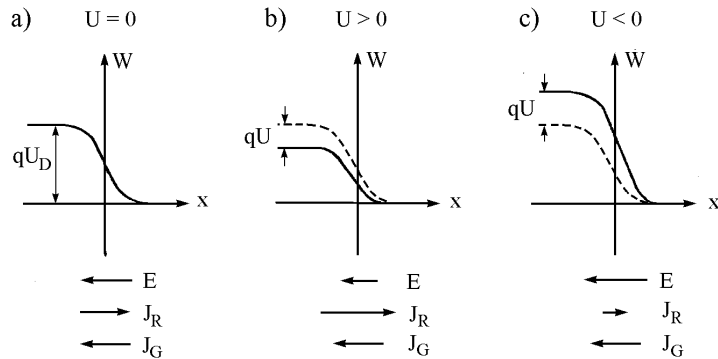


Abb.6: Schema des Energieverlaufs der bewegl. Ladungsträger in der Grenzschicht eines pn-Übergangs: a) ohne äußere Spannung, b) mit Spannung U in Flussrichtung, c) mit Spannung U in Sperrichtung; U_D : Potentialschwelle für $U = 0$, E : elektr. Feld, $j_{R,G}$: Rekombinations- bzw. Generationsstrom

Gleichung (4) beschreibt die ideale Kennlinie eines pn-Übergangs. Mögliche Abweichungen einer Diodenkennlinie von diesem Verlauf sind auf eine Reihe von Annahmen bei der Ableitung von Gl. (4) zurückzuführen, die für eine Diode nicht alle gelten müssen. So können z.B. Elektronen und Löcher auch in der Grenzschicht zwischen p- und n-Gebiet rekombinieren. Dies äußert sich in einem schwächeren Anstieg der Kennlinie in Flussrichtung, der sich häufig durch einen Exponenten $eU/2kT$ in Gl. (4) beschreiben lässt. Davon unabhängig tritt bei großen Spannungen in Sperrichtung ein neuer Mechanismus auf: Bei einer vom HL und seiner Dotierung abhängigen Spannung steigt der Strom in Sperrichtung stark an (s. Abb. 4b). Dies ist auf das Eintreten von Stoßionisation der Ladungsträger an der Grenzschicht (Lawineneffekt) sowie weiterer Effekte zurückzuführen (Zener-Effekt u.a.).

2.3 Transistor

Aus der Halbleiterdiode lässt sich durch Hinzufügen eines weiteren p- oder n-Halbleiters ein neues elektronisches Bauelement herstellen, dessen Wirkungsweise der einer Röhrentriode ähnelt und das als Transistor bezeichnet wird. Je nachdem, ob ein p- oder n-Halbleiter zugefügt wird entsteht ein pnp- oder npn-Transistor. Diese beiden Transistortypen sind in ihrem Verhalten zueinander komplementär.

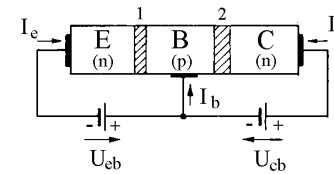


Abb.7: Schema eines npn-Transistors

In Abb. 7 ist ein npn-Transistor schematisch dargestellt. Denkt man sich zunächst nur die Grenzschicht 2 in Sperrichtung angeschlossen ($U_{cb} > 0$), so fließt durch sie nur der kleine von den Minoritäten getragene Feld- bzw. Generationstrom. Wird zusätzlich die Grenzschicht 1 in Flussrichtung angeschlossen ($U_{eb} < 0$), so können durch sie jeweils sehr viele Majoritätsträger in das jeweils andere Gebiet hindiffundieren, Löcher in das n-, Elektronen in das p-Gebiet. Da das p-Gebiet eines npn-Transistors sehr klein ist, gelangen die meisten Elektronen bis in die in Sperrichtung gepolte Grenzschicht 2. Hier sind sie aber Minoritätsträger und werden vom elektrischen Feld in das rechte n-Gebiet getrieben. Die Grenzschicht 1 emittiert Elektronen, die von der Grenzschicht 2 aufgesammelt werden. Daher rühren auch die Bezeichnungen *Emitter* **E** für die in Flussrichtung gepolte pn-Schicht, *Kollektor* **C** für die in Sperrichtung gepolte pn-Schicht und *Basis* **B** für das zwischen beiden liegende Halbleiterstück.

Der vom Emitter ausgehende Elektronenstrom $-I_e$ gelangt fast vollständig in den Kollektorstromkreis und fließt dort als Kollektorstrom I_c weiter. Nur ein geringer Bruchteil (ca. 0,5 - 10 %) des Emitterstroms fließt über den Basisanschluss als Basisstrom I_b ab. Der Kollektorstrom I_c hängt also von I_e ab, I_c wird von I_e gesteuert. Es gilt:

$$I_c = -\alpha I_e, \quad 0,90 < \alpha < 0,995 \quad (5)$$

α ist die Kurzschluss-Stromverstärkung eines Transistors in Basisschaltung. Gl. (5) gilt exakt, wenn der Widerstand des äußeren Kollektorstromkreises klein im Vergleich zu dem der Kollektorstrecke ist. (Für einen pnp-Transistor gelten analoge Überlegungen. Hierbei ist nur die Rolle der Elektronen und Löcher vertauscht und die Polarität der Anschlüsse umgekehrt.)

Abb. 8 zeigt das Schaltzeichen und das Kennlinienfeld $I_c(U_{cb})$ eines npn-Transistors in Basisschaltung. Der Kollektorstrom ist nicht ganz unabhängig von der Kollektorspannung U_{cb} . Wenn diese ansteigt, dringt die Raumladung weiter in die Basiszone ein und ein größerer Teil des Emitterstroms gelangt zum Kollektor.

Die Kennlinien steigen also mit wachsender Spannung U_{cb} leicht an.

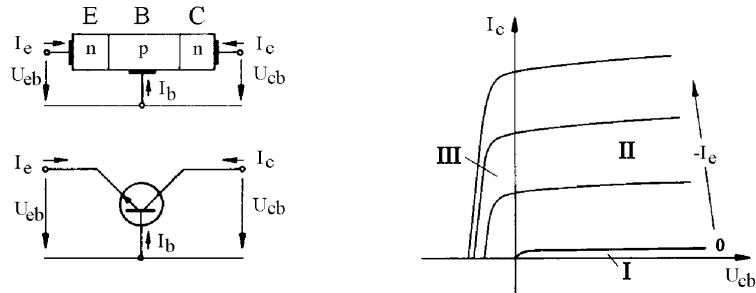


Abb.8: a) Schaltschema, Schaltsymbol und b) Kennlinienfeld $I_c(U_{cb})$ eines npn-Transistors in Basisschaltung: I: Sperrbereich ($I_e > 0$), II: Aktiver Bereich, III: Sättigungsbereich ($U_{cb} < 0$)

einer Röhrentriode, die den Zusammenhang zwischen Anodenstrom I_a , Anodenspannung U_a und Gitterspannung U_g wiedergeben. Beim Transistor erfolgt die Steuerung durch den Basisstrom, bei der Röhre durch die Gitterspannung.

Bei der Emitterschaltung eines Transistors fließt im Eingangskreis nur die Differenz zwischen Emittterstrom und Kollektorstrom, also der sehr kleine Basisstrom I_b ($I_b = -I_c - I_e$), d.h. die Emitterschaltung erlaubt die Steuerung des großen Stroms I_c durch den kleinen Strom I_b . Der Transistor wirkt als Stromverstärker. Für die Stromverstärkung β in Emitterschaltung gilt:

$$\beta = \left| \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right| = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (6)$$

Den angegebenen Werten $0,9 < \alpha < 0,995$ entsprechen Werte $10 < \beta < 200$. Aus der $I_c(I_b)$ -Kennlinie lässt sich der Verstärkungsfaktor β als Steigungsmaß der Kurve entnehmen. Wegen der Krümmung dieser Kurve ist der Verstärkungsfaktor β nicht konstant sondern von der Basisstromstärke abhängig.

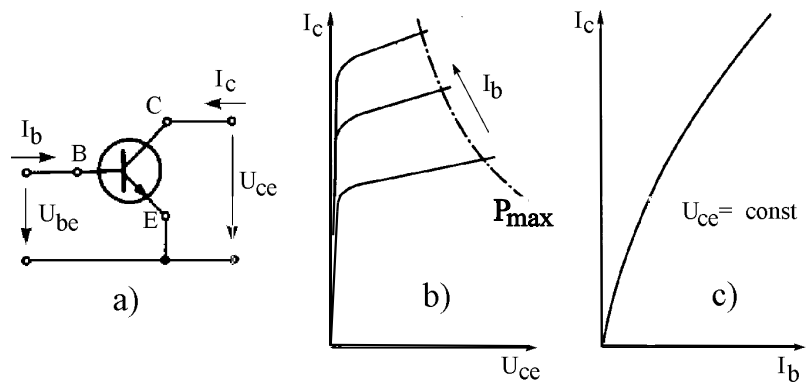


Abb.9: npn-Transistor in Emitterschaltung: a) Schaltschema b) Kennlinienfeld $I_c(U_{ce})$, c) Kenlinie $I_c(I_b)$

Da der Kollektorstrom sich nicht sehr vom Emittterstrom unterscheidet, liegt es nahe, nicht mit dem Emittter sondern mit der Basis zu steuern. Abb. 9a zeigt einen npn-Transistor in Emitterschaltung, Abb. 9b u. c das Kennlinienfeld $I_c(U_{ce})$ und $I_c(I_b)$. Diese Kennlinien entsprechen den $I_a(U_a)$ - bzw. den $I_a(U_g)$ - Kennlinien

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie Kennlinie einer HI-Diode in Sperr- und Flussrichtung.
- 2. Aufgabe:** Tragen Sie das Messergebnis für die Flussrichtung halblogarithmisch auf Millimeterpapier auf und vergleichen Sie den Verlauf $\ln I(U)$ mit dem einer idealen Gleichrichter-kennlinie, Gl. (4).
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Kennlinien des Transistors 2N3055: $I_c(U_{ce})$, $I_c(I_b)$ und $I_b(U_{be})$.
- 4. Aufgabe:** Tragen Sie die Messergebnisse für I_c auf Millimeterpapier auf und bestimmen Sie die maximale Stromverstärkung β . Vergleichen Sie den Verlauf $\ln I_b(U_{be})$ mit dem einer idealen Diodenkennlinie.

4. Versuchsdurchführung und Auswertung

Aufgabe 1 u. 2, HI-Diode:

Stellen Sie zur Bestimmung der Diodenkennlinie $I(U)$ die Schaltungen gem. Abb.

10 her. Beachten Sie, dass der Strommesser für die Sperr- und Flussrichtung sich an verschiedenen Stellen der Schaltung befindet (Warum?).

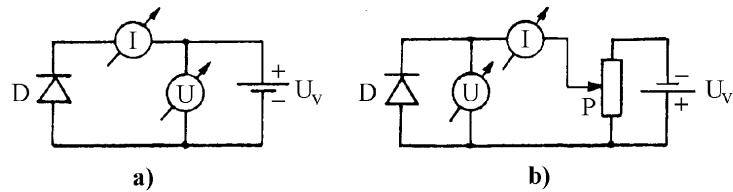


Abb.10: Schaltung zur Bestimmung der Kennlinie einer HL-Diode:
a) Sperrrichtung, b) Flussrichtung; D Diode, U Spannungs-,
I Strommesser, P Potentiometer, U_V Versorgungsspannung

Bestimmen Sie zunächst den maximalen (geringen) Strom in Sperrrichtung für Spannungen $0 < U = U_V < 50 \text{ V}$. Stellen Sie für die folgenden Messungen $I(U)$ in Flussrichtung die Versorgungsspannung U_V auf ca. 1 V ein und bestimmen Sie den Strom durch die Diode für Spannungen U von 0 bis 0,8 V in 0,05 V - Schritten mit Hilfe des Potentiometers P (10 Ohm). Prüfen Sie für kleine Ströme I , welcher Anteil davon durch den Spannungsmesser fließt, indem Sie diesen nach Einstellen der Spannung vom Stromkreis abtrennen.

Tragen Sie das Messergebnis $I(U)$ für die Flussrichtung halblogarithmisch auf ($\ln I(U)$) und prüfen Sie ob der Strom im wesentlichen exponentiell mit der Spannung ansteigt. Vergleichen Sie die Steigung der Ausgleichsgeraden mit dem Vorfaktor im Exponenten einer idealen Kennlinie, Gl. (4), für Raumtemperatur. Bestimmen Sie näherungsweise durch Extrapolation der Ausgleichsgeraden auf $U = 0$ den Rekombinationsstrom $I_R (U = 0)$ und vergleichen Sie diesen Wert mit dem gemessenen maximalen Strom durch die Diode in Sperrrichtung.

Aufgabe 3 u. 4, Transistor:

Stellen Sie zur Bestimmung der Kennlinien des Transistors 2N3055 auf einem Experimentier-Stecksystem die Emitterschaltung gem. Abb. 11 her. Für die Messungen sind jeweils nur 3 der Spannungs- bzw. Strommessgeräte notwendig.

Bestimmen Sie folgende Kennlinien:

- a) $I_c (U_{ce})$ für $U_{ce} = 2; 5; 10; 15; \dots 45; 50 \text{ V}$
und jeweils $I_b = 0,25; 0,5; 0,75$ und 1 mA

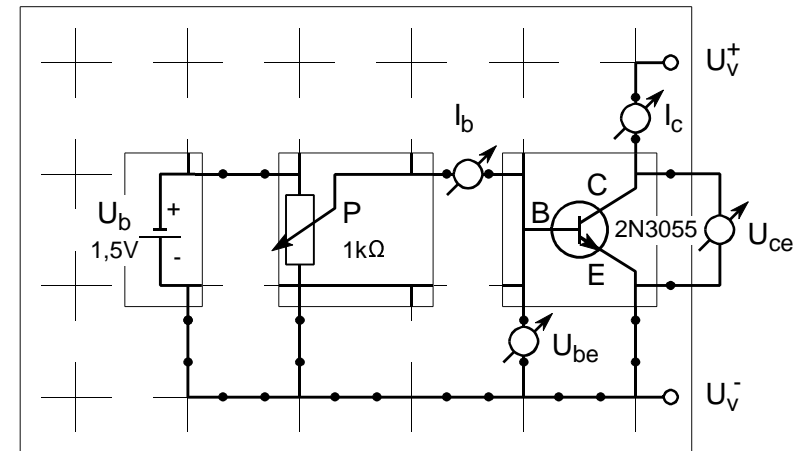


Abb.11: Ermittlerschaltung auf dem Experimentierstecksystem zur Bestimmung von Kennlinien des Transistors 2N3055

- b) $I_c (I_b)$ für $I_b = 0$ bis 2 mA in $0,25 \text{ mA}$ - Schritten
und $U_{ce} = 5 \text{ V}$
- c) $I_b (U_{be})$ für $U_{be} = 50$ bis 750 mV in 50 mV - Schritten
und $U_{ce} = 5 \text{ V}$

Beachten Sie, dass die (hier durch die Kühlung bedingte) maximale Verlustleistung des Transistors $P_{\max} = U_{ce} \cdot I_c = 5 \text{ W}$ **nicht** überschritten werden sollte. Zeichnen Sie für die Messung a) in ein vorbereitetes Diagramm $I_c (U_{ce})$ (mit $I_{c \max} = 200 \text{ mA}$) auf Millimeterpapier die Hyperbel P_{\max} ein und tragen Sie die Messwerte direkt nach der Messung zur Kontrolle ein. Stellen die Spannung U_{ce} über die Versorgungsspannung U_V und den Strom I_b mit dem Potentiometer P ein.

Prüfen Sie bei der Messung c) für kleine Ströme I_b den Messfehler infolge des Messstromes durch den Spannungsmesser U_{be} , indem Sie diesen nach Einstellen der Spannung von der Schaltung abtrennen.

Tragen Sie die Messergebnisse für b) linear, für c) halblogarithmisch (wie für die

HL-Diode) auf Millimeterpapier auf. Bestimmen Sie aus der Auftragung für b) die maximale Stromverstärkung β . Vergleichen Sie das Messergebnis c) wie in der 2. Aufgabe mit einer idealen Gleichrichtercharakteristik.

5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie unterscheidet sich das Verhalten der elektr. Leitfähigkeit eines Halbleiters von dem eines Metalls? Beschreiben Sie die verschiedenen *Leitungsmechanismen* eines Halbleiters.
- 2) Welches charakteristische Verhalten der elektr. Leitung zeigt ein Halbleiter im (räumlichen) Übergangsbereich zwischen (homogener) p- und n-Dotierung?
- 3) Beschreiben Sie den Konzentrationsverlauf der ortsfesten und beweglichen elektr. Ladungen in der Nähe des *pn-Übergangs*.
- 4) Welche elektr. Teilströme fließen im thermischen Gleichgewicht durch einen pn-Übergang, welche von diesen werden durch eine äußere Spannung beeinflusst?
- 5) Beschreiben Sie die I(U)-Kennlinie eines pn-Übergangs!
- 6) Aus welchen Dotierungsbereichen besteht ein *Transistor*?
- 7) Erklären Sie die Wirkungsweise eines *Transistors*.
- 8) Welchen Verlauf zeigen die Kennlinien $I_c(U_{ce})$ und $I_c(I_b)$ eines npn-Transistors in Emitter-Schaltung? Wie ist der *Verstärkungsfaktor* β definiert?