

Abbildung 1: verschiedene Transistortypen

VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

Kennlinie HL-Diode und Transistor

10. Dezember 2025

Raum MD163

Inhaltsverzeichnis

1	Informationen	3
1.1	Literatur	3
1.2	Stichworte	3
2	Grundlagen	4
2.1	Elektrische Leitung in Halbleitern	4
2.1.1	Eigenleitung	4
2.1.2	Störstellenleitung	5
2.2	pn-Übergang	6
2.3	Transistor	10
3	Aufgabenstellung	13
4	Versuchsdurchführung und Auswertung	14
4.1	Diodenkennlinie	14
4.2	Transistor	15
5	Fragen zur Selbstkontrolle	17

Abbildungsverzeichnis

1	verschiedene Transistortypen	1
2	a) Gitterstruktur b) ebenes Bindungsmodell	4
3	Modell der Eigenleitung	5
4	Modell der Störstellenleitung: a) Elektronenleitung b) Löcherleitung	6
5	a) Halbleiter-Diode schematisch mit Metallkontakte b) Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Übergangs	7
6	Zur Sperrsichttausbildung am pn-Übergang: a) anschauliches Modell b) Konzentrationsverlauf	8
7	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 Sperrrichtung	9
8	Schema eines npn-Transistors	10
9	a) Schaltplan, Schaltsymbol b) Kennlinienfeld $I_C(U_{cb})$ eines npn-Transistors in Basisschaltung (I: Sperrbeiche II: Aktiver Bereich III: Sättigungsbereich	11
10	npn-Transistor in Emitterschaltung: a) Schaltschema b) Kennlinienfeld $I_C(U_{ce})$ c) Kennline $I_C(I_B)$	12
11	Schaltung zur Bestimmung der Kennlinie einer Diode	14
12	Kennlinienfeld eines Transistors (allgemein)	15
13	Schaltung 1	15

14	Schaltung 2	16
15	Schaltung 3	16
16	Schaltung 4	17

1 Informationen

1.1 Literatur

1. Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II
2. W.Walcher, Praktikum der Physik
3. Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
4. Kohlrausch, Praktische Physik Bd.2
5. Unger/Schultz, Elektronische Bauelemente udn Netzwerke Bd.1

1.2 Stichworte

- Halbleiter
- Eigen- u. Störstellenleitung
- p- und n-Dotierung
- pn-Übergang
- Diffusion
- Raumladung
- Rekombination
- pnp- und npn-Transistor
- Emitter- und Basisschaltung
- 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. 2a) zeigt die Elementarzelle eines Diamantgitters, Abb. 2b) 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 $T=0$ K ist der Kristall ein Isolator, weil keine frei beweglichen Ladungen vorhanden sind.

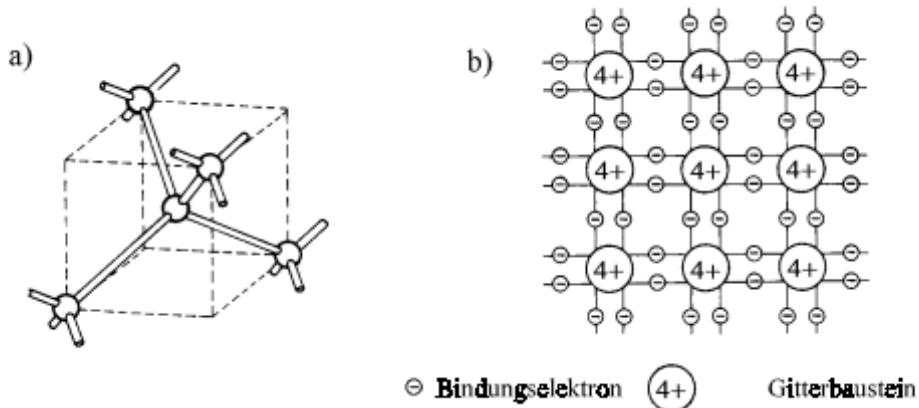


Abbildung 2: a) Gitterstruktur b) ebenes Bindungsmodell

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 \vec{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 Energieaufwand springen kann, da dies den Übergang in einen energetisch gleichwertigen Bindungszustand darstellt. Das Elektron hinterlässt eine Bindungslücke an einer anderen Stelle. Bei Anlegen eines Feldes werden sich die Lücken vorzugsweise in Feldrichtung (wie Teilchen mit der Ladung $+e$) bewegen und ebenfalls

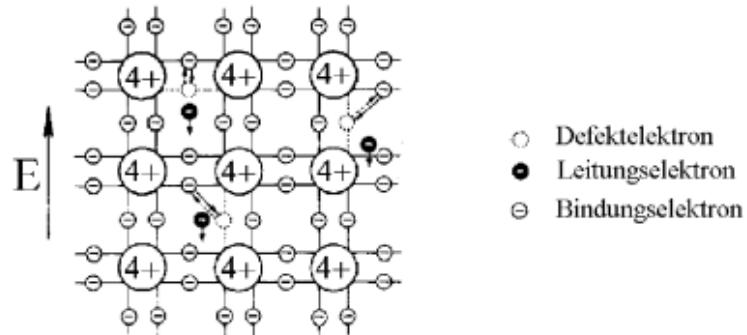


Abbildung 3: Modell der Eigenleitung

zur Leitfähigkeit beitragen. Man nennt die Bindungslücken *Defektelektronen* oder *Löcher*. Abb. 3 veranschaulicht den Mechanismus dieser *Eigenleitung* oder *intrinsische Leitung* eines Halbleiters.

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

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

Die Exponentialfunktion (der sog. Boltzmannfaktor) ist hierbei 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: $n_i \approx 2 \cdot 10^{13} \frac{1}{cm^3}$. Mit steigender Temperatur erhöht sich diese Anzahldichte beträchtlich (ca. $10^{14} \frac{1}{cm^3}$ 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 *Rekombination* eines Elektron-Loch-Paars. 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 geringere 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. 4 veranschaulicht diesen Leistungsmechanismus. 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 Ladungssorte 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:

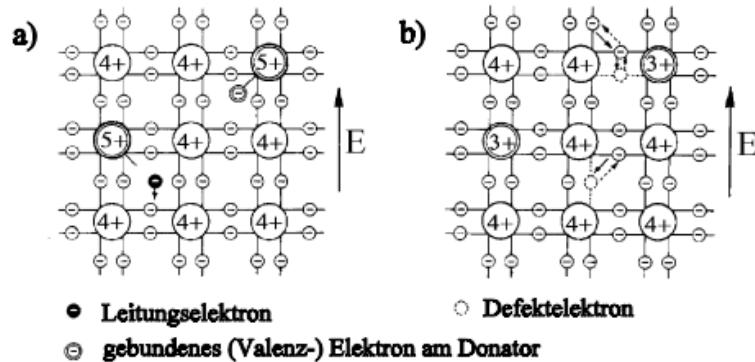


Abbildung 4: Modell der Störstellenleitung: a) Elektronenleitung b) Löcherleitung

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

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 $n = n_{Sb} \approx 10^{16} \frac{1}{cm^3}$, also beträchtlich größer als die Konzentration n_i der Elektronen-Lochpaare im reinen Ge-Kristall (s.o.). Die Konzentration der Löcher als Minoritätsträger ist mit Gleichung 2 $p \approx 4 \cdot 10^{10} \frac{1}{cm^3}$.

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 eine Richtung fließen kann (s. Abb.5).

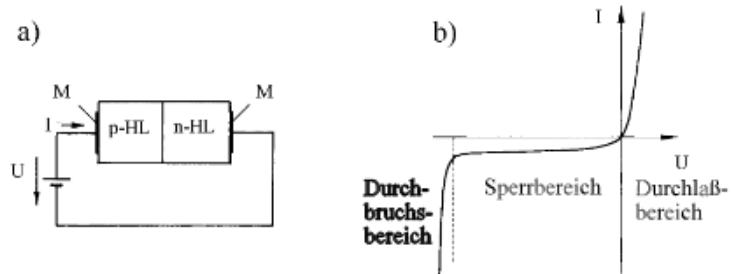


Abbildung 5: a) Halbleiter-Diode schematisch mit Metallkontakten b) Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Übergangs

Der pn-Übergang wirkt als Gleichrichter. Das elektronische Bauelement mit einem pn-Übergang wird - in Analogie zur Gleichrichterwirkung einer Vakuum-Diode - *Halbleiter-Diode* oder *kurze Diode* genannt.

Zur Erläuterung der Gleichrichterwirkung eines pn-Übergangs wird das Gleichgewicht verschiedener elektr. Ströme zwischen p- und n-leitendem Gebiet betrachtet (s. Abb.6).

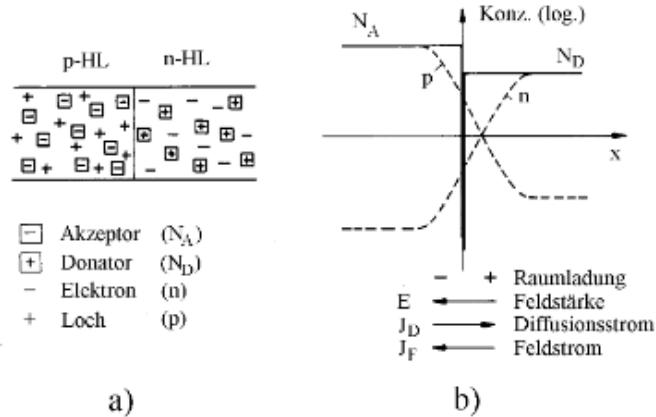


Abbildung 6: Zur Sperrsichttausbildung am pn-Übergang: a) anschauliches Modell
b) Konzentrationsverlauf

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. Die 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 \vec{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 Diffusionsstromes, der sog. *Rekombinationsstrom* j_R muss durch einen Teil des Feldstroms, den sog. *Generationsstrom* j_G thermisch erzeugter Elektronen-Lochpaare ausgeglichen werden. Andernfalls 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 Ladungs-

träger 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:

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

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 $e^{\frac{eU}{kT}}$ geändert, der Generationsstrom bleibt unverändert (siehe Abb.7). Der Gesamtstrom durch den pn-Übergang ist damit:

$$\begin{aligned} j(U) &= j_R(U) + j_G = j_R(U) - j_R(0) \\ j(U) &= j_R(0) \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

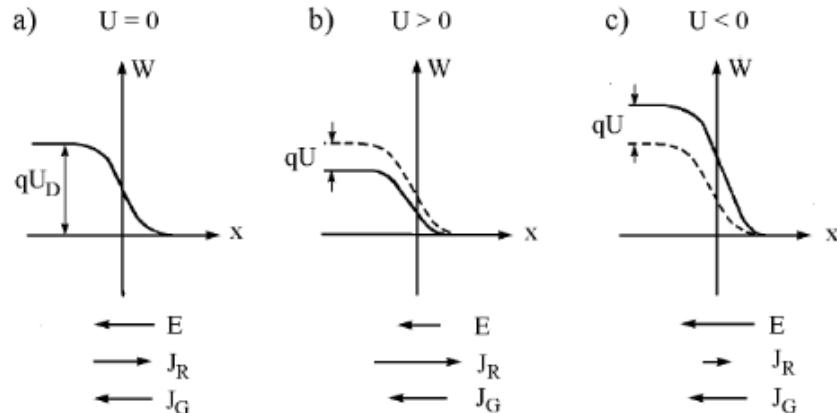


Abbildung 7: Schema des Energieverlaufs der bewegl. Ladungsträger in der Grenzschicht eines pn-Übergangs:

- a) ohne äußere Spannung
- b) mit Spannung U in Flussrichtung
- c) mit Spannung U in Sperrrichtung

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 $\frac{eU}{2kT}$ in Gl.(4) beschreiben lässt. Davon unabhängig tritt bei großen Spannungen in Sperrrichtung ein neuer Mechanismus auf: Bei einer vom HL und seiner Dotierung anhängigen Spannung steigt der Strom in Sperrrichtung stark an (s. Abb. 5b)). Dies ist auf das Eintreten von Stoßionisation der Ladungsträger an der Grenzschicht (Lawineneffekt), sowie weitere 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 einem Schalter ähnelt und als Bipolartransistor bezeichnet wird. Je nachdem, ob ein p- oder n-Halbleiter zugefügt wird, entsteht ein npn- oder pnp-Transistor. Diese beiden Transistortypen sind in ihrem Verhalten zueinander komplementär.

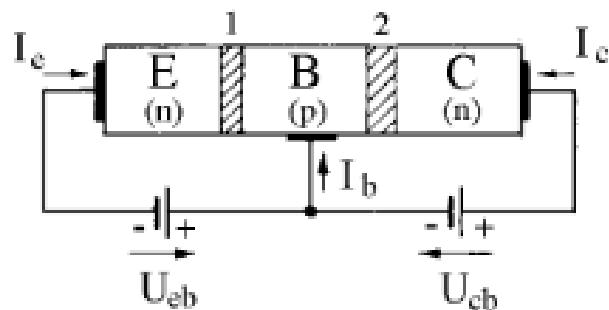


Abbildung 8: Schema eines npn-Transistors

In Abb.8 ist ein npn-Transistor schematisch dargestellt. Denkt man sich zunächst nur die Grenzschicht 2 in Sperrrichtung angeschlossen ($U_{cb} > 0$), so fließt durch sie nur der kleine von den Minoritäten getragene Feld- bzw. Generationsstrom. Wird zusätzlich die Grenzschicht 1 in Flussrichtung angeschlossen ($U_{eb} < 0$), so können durch sie jeweils sehr viele Majoritätsträger in das jeweils andere Gebiet hineindiffundieren, 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 Sperrrichtung 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 röhren auch die Bezeichnungen *Emitter* E für die in Flussrichtung gepolte pn-Schicht, *Kollektor* C für die in Sperrrichtung 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 %) des Emitterstroms fließt über den Basisanschluss als Basistrom 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 (in manchen Datenblättern auch als B oder β bezeichnet) ist die Kurzschluss-Stromverstärkung eines Transistors in Basisschaltung. Gl.(5) gilt exakt, wenn der Widerstand des äußeren Kollektorstromkreises klein im Vergleich zu dem der Kollektrostrecke 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.9 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.

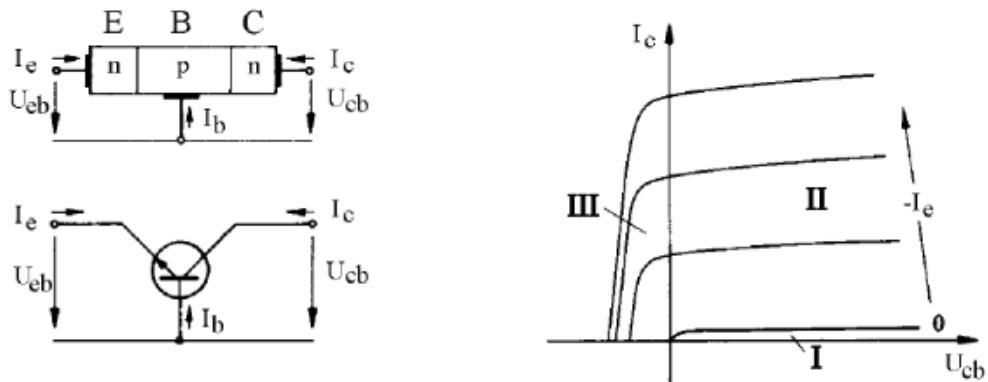


Abbildung 9:

- Schaltplan, Schaltsymbol
- Kennlinienfeld $I_C(U_{cb})$ eines npn-Transistors in Basisschaltung (I: Sperrbereich II: Aktiver Bereich III: Sättigungsbereich)

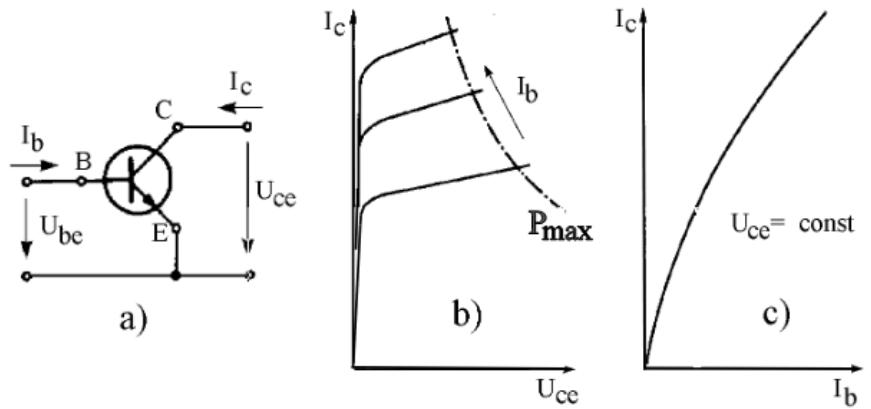


Abbildung 10: npn-Transistor in Emitterschaltung:

- a) Schaltschema
 - b) Kennlinienfeld $I_C(U_{ce})$
 - c) Kennline $I_C(I_B)$

Da der Kollektorstrom sich nicht sehr vom Emittersstrom unterscheidet, liegt es nahe nicht mit dem Emitter, sondern mit der Basis zu steuern. Abb. 10 a) zeigt einen npn-Transistor in Emitterschaltung, Abb. 10 b) und 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 einer Röhrentiode, die den Zusammenhang zwischen Anodenstrom I_a , Anodenspannung U_a und der 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 Elektronenstrom und Kollektorstrom, also der sehr kleine Basisstrom I_B ($I_B = -I_E - I_C$), 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 dieser Verstärkungsfaktor nicht konstant, sondern von der Basisstromstärke abhängig.

3 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Kennlinie einer HL-Diode in Sperr- und Flussrichtung mit Hilfe eines Oszilloskops.
2. Bestimmen Sie die verschiedenen Kennlinien des Transistors
3. Erstellen Sie ein Diagramm der Messergebnisse

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Diodenkennlinie

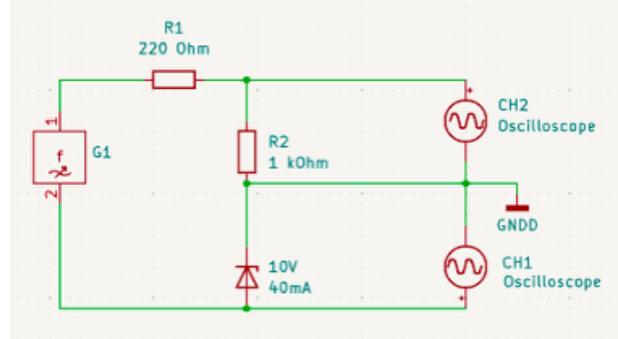


Abbildung 11: Schaltung zur Bestimmung der Kennlinie einer Diode

1. Bauen Sie die Schaltung nach dem Schaltplan auf.
2. Stellen Sie folgende Spannung am Frequenzgenerator ein:
 - sinusförmiger Verlauf
 - 50 Hz
 - $U_{eff} \approx 24V$
3. Schauen Sie sich die Kennlinie auf dem Oszilloskop an, diskutieren Sie das Ergebnis mit Ihrem Betreuer bzw. Ihrer Betreuerin und übertragen Sie die Kennlinie in Ihre Unterlagen.

4.2 Transistor

Hier eine Übersicht über die verschiedenen Kennlinienfelder:

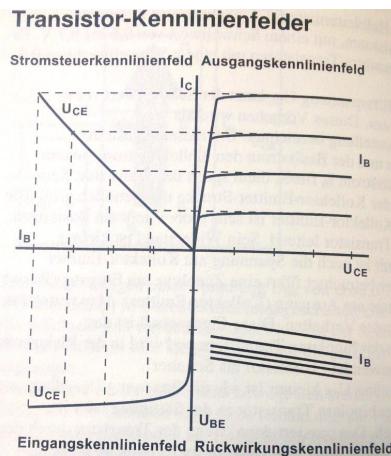


Abbildung 12: Kennlinienfeld eines Transistors (allgemein)

Aufbau des zweiten Versuchsteils:

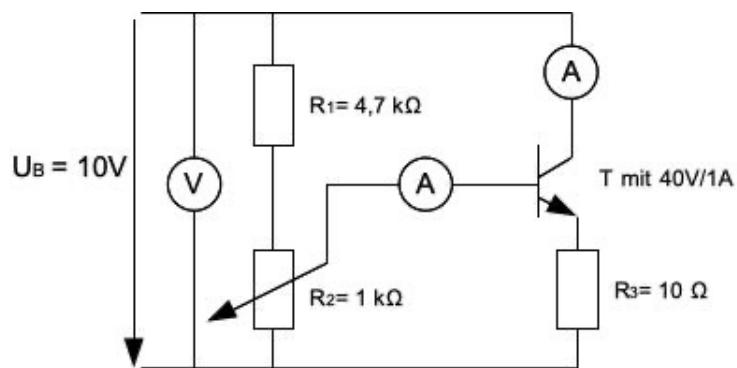


Abbildung 13: Schaltung 1

Durchführung des zweiten Versuchsteils:

- Stellen Sie die Basisstromstärke I_B über das Potentiometer auf 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 und 160 μA ein.
- Messen Sie I_C bei den verschiedenen Basisströmen

Bauen Sie nun folgende Schaltung auf:

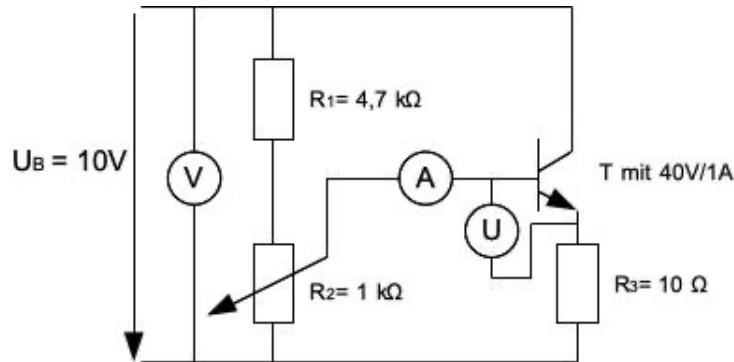


Abbildung 14: Schaltung 2

- Stellen sie die Basis-Emitter-Spannung nun auf 0,5 / 0,6 / 0,7 / 0,71 / 0,72 / 0,73 V etc. ein und messen Sie die zugehörigen Basisströme.

Tipp: Je nach Transistor liegt U_D evtl. schon bei 0,6V oder weniger

Bauen Sie nun folgende Schaltung auf:

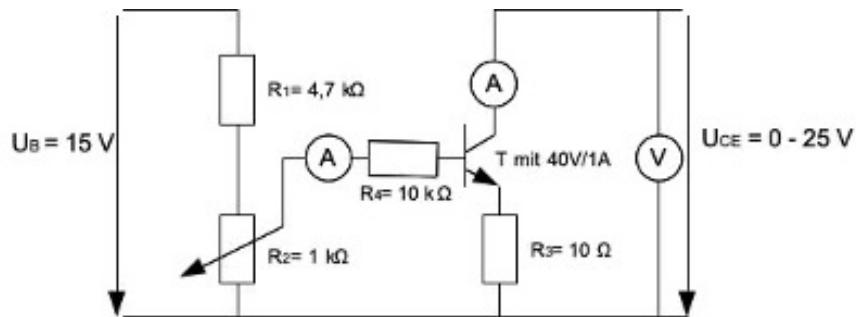


Abbildung 15: Schaltung 3

- Stellen Sie folgende Werte für U_{CE} jeweils bei den Basisströmen $I_B = 40, 60, 80$ und $100 \mu A$ und messen Sie I_C : $U_{CE} = 0,2 / 0,5 / 2 / 4 / 6 / 8 / 10 \text{ V}$

Tipp: Achten Sie auf den genauen Punkt, an dem sich I_C stark ändert. Evtl. bieten sich noch andere U_{CE} an

Nun bauen Sie die letzte Schaltung auf:

- Stellen Sie folgende Werte für U_{CE} jeweils bei den Basisströmen $I_B = 20, 40, 60 \mu A$ und messen Sie U_{BE} : $U_{CE} = 2 / 4 / 6 / 8 / 10 / 12 / 14 \text{ V}$

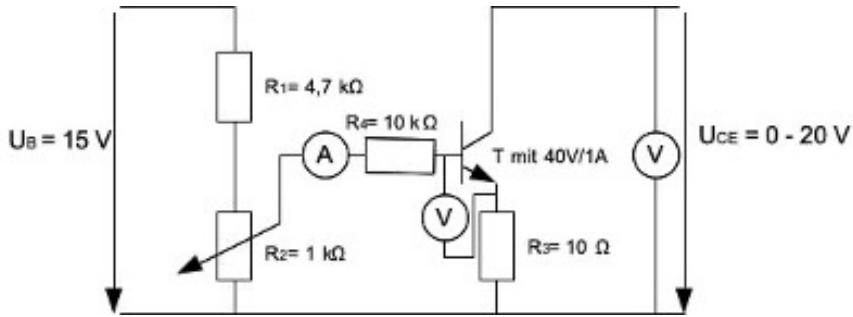


Abbildung 16: Schaltung 4

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- un 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?