

Versuch: P1-51

Transistorschaltungen

- Vorbereitung -

Inhaltsverzeichnis

1	Transistor-Kennlinien	2
1.1	Eingangskennlinie	3
1.2	Ausgangskennlinie	3
1.3	Steuerkennlinie	4
2	Überlagerungstheorem	4
3	Transistorschaltungen	5
3.1	Transistor als Schalter	5
3.2	Verstärker in Emitterschaltung	6
3.3	RC-Oszillator mit Transistorverstärker in Emitterschaltung	8

1 Transistor-Kennlinien

Die sogenannten *Transistorkennlinien* sind die Graphen von jeweils zwei zu messenden Größen eines Transistors, die charakteristisch für eben jenen sind.

Die in diesem Versuch verwendeten *npn*-Transistoren bestehen aus drei Halbleiterschichten. Diese sind so angeordnet, dass eine dünne *p*-dotierte-Halbleiterschicht zu beiden Seiten an *n*-dotierte-Halbleiterschichten angrenzt (woher auch die Bezeichnung *npn*-Transistor stammt). Dabei werden die einzelnen Schichten folgendermaßen bezeichnet:

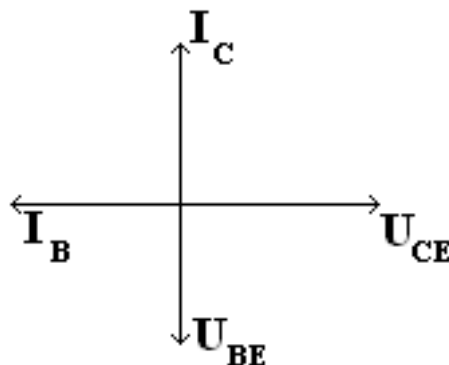
1. Erste *n*-dotierte Schicht: Emitter
2. *p*-dotierte Schicht: Basis
3. Zweite *n*-dotierte Schicht: Kollektor

Zwischen diesen Halbleiterschichten bildet sich nun die gewöhnliche Verarmungsschicht aus, wie sie bei Dioden üblich ist. Transistoren werden nun in der Regel so verwendet, dass man zwischen Emitter und Kollektor eine Spannung anlegt, und zwar so, dass der Übergang von Emitter zu Basis leitend ist, der von Basis zu Kollektor jedoch sperrt (Emitter negativ, Kollektor positiv). Auf diese Weise kann noch kein Strom fließen. Legt man jedoch an der Basis eine Spannung an, so wird die Grenzschicht zwischen Basis und Kollektor durch den hier fließenden Strom leitend. Doch es fließt nicht nur der relativ schwache Strom von Basis zu Emitter, sondern zusätzlich noch der sehr viel stärkere Strom zwischen Kollektor und Emitter.

Es seien ab jetzt folgende Bezeichnungen verwendet:

- Basis-Emitter-Spannung: U_{BE}
- Basis-Kollektor-Spannung: U_{BC}
- Kollektor-Emitter-Spannung: U_{CE}
- Basisstrom: I_B
- Kollektorstrom: I_C
- Emitterstrom: I_E

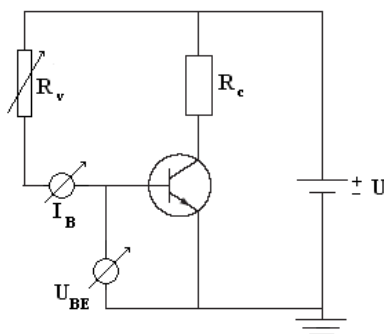
Es ist üblich, diese Größen in einem Diagramm aufzutragen, d.h. die verschiedenen Achsen mit diesen Größen zu belegen um so für den Transistor charakteristische Graphen zu erhalten. Dafür werden die Achsen folgendermaßen eingeteilt:



Hierbei wird der vierte Quadrant nicht verwendet (Zählung ab U_{CE}/I_C gegen Uhrzeigersinn). Die anderen drei Quadranten werden wie im Folgenden beschrieben, gefüllt.

1.1 Eingangskennlinie

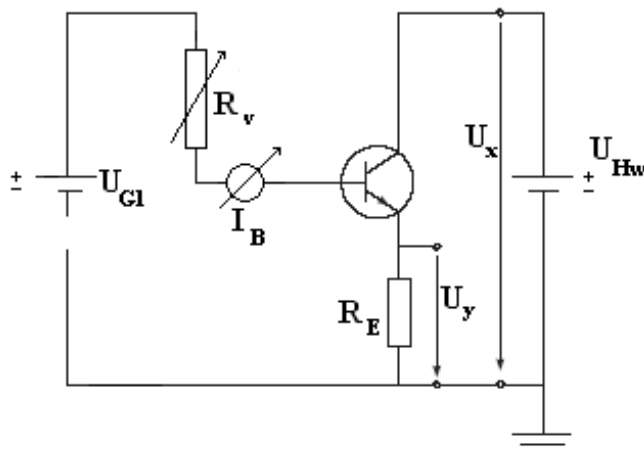
Zur Bestimmung der Eingangskennlinie wird die folgende Schaltung aufgebaut, welche gegenüber der in der Vorbereitungshilfe leicht modifiziert wird:



Der eingebaute Vorwiderstand $R_C = 1k\Omega$ dient dem Schutz des Transistors. Durch ihn wird die Spannung U_{CE} zwar minimal geändert, der Effekt ist aber ab $U_{CE} > 0,2V$ vernachlässigbar. Mit Hilfe eines regelbaren Widerstands wird die Stromstärke auf den gewünschten Wert eingestellt, der Widerstand ist beim Einschalten auf Maximum zu drehen, damit eventuelle Beschädigungen am Transistor vermieden werden. Wir messen nun den Strom mittels Amperemeter in $10\mu A$ -Schritten, von 10 bis $100\mu A$. Parallel wird der Wert der Spannung U_{BE} notiert. Eingetragen in den 3. Quadranten ergibt das die Eingangskennlinie.

1.2 Ausgangskennlinie

Mit Hilfe des Oszilloskops sollen nun die Ausgangskennlinien bestimmt werden. Dafür wird folgende Schaltung verwendet:



Da wir mit dem Oszilloskop nicht direkt I_C messen können, greifen wir über dem Widerstand R_E die Spannung U_y ab, und kommen, mittels Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

somit auf das gesuchte I_C . Zuerst werden 100% des Stromes I_B eingestellt, was bei richtiger Einstellung einem Strom von $I_C = 50mA$ entspräche. Die Kollektorspannung ist eine 12V Halbwellenspannung, die Basisspannung ist 12V Gleichspannung. Durch den Einbau des Widerstand ergibt sich aber das Problem, dass wir jetzt zwei Spannungen haben, nämlich U_{R_E} und U_{CE} gemeinsam addiert auf der X-Achse liegen. Es ist also vorher (mittels Messung) festzuhalten, ob die Abweichung, welche durch diese Messmethode entsteht, überhaupt tragbar ist.

Hat man für die 100% von I_B die Messung durchgeführt, dann sollen noch für 80%, 60%, 40% und 20% Werte folgen.

1.3 Steuerkennlinie

Für diesen Aufgabenteil ist keine zusätzliche Messung erforderlich - um den 2. Quadranten zu füllen, brauchen wir die Werte des Kollektorstromes I_C für verschiedene Werte von I_B . Diese sind uns ja aber aus den vorangegangenen Versuchsteilen in Erinnerung und somit brauchen wir lediglich die bereits bekannten Werte in das Diagramm einzutragen.

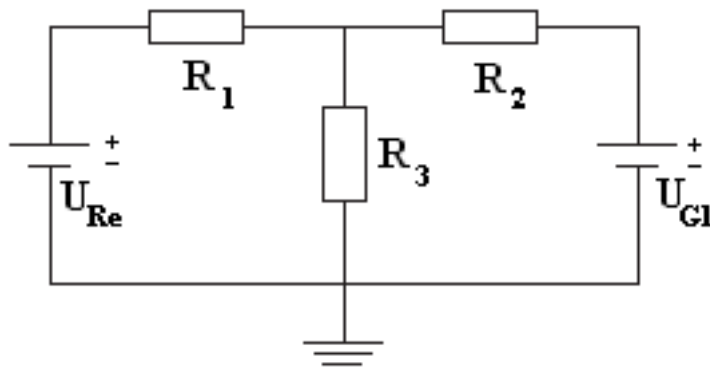
2 Überlagerungstheorem

Es soll das folgende Theorem experimentell verifiziert werden:

In einer Schaltung mit linearen Bauelementer und mit mehreren Spannungsquellen ist die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten gleich derjenigen Spannung, die sich zwischen diesen beiden Punkten einstellen würde, wenn nur eine der Quellen aktiv wäre. Entsprechendes gilt auch für Strom in beliebigen Zweigen der Schaltung.

Natürlich kann man sich die Spannungsquelle nicht einfach wegdenken - ihr Innenwiderstand muss weiterhin berücksichtigt werden.

Wir wollen nun mit folgender Schaltung arbeiten:



Es stehen 2 verschiedene Spannungsquellen zur Verfügung:

- Eine Gleichspannung $U_{Gl} = 12V$, $R_i \approx 0V$
- Eine Rechteckspannung $U_{Re} = \pm 8V$, $R_i = 50\Omega$

desweiteren:

- $R_1 = 1k\Omega$
- $R_2 = 1,5k\Omega$
- $R_3 = 330\Omega$

Es können nun drei Fälle unterschieden werden: nur Gleichspannung, nur Rechteckspannung und beide zusammen, in denen wir jeweils experimentell und theoretisch die Spannung, die an R_3 abfällt, ermitteln, wobei die Relationen lediglich (sei hier erspart) aus Maschenregel, Ohmschen Gesetz und den Regeln zur Addition von parallelen und seriellen Widerständen hergeleitet sind:

1. Nur Gleichspannung

Hierbei wird also U_{Re} durch den Innenwiderstand der Rechteckspannungsquelle ersetzt:

$$R_{ges} = R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1+R_i}} = 1751,1\Omega \quad (2)$$

$$I_{R_2} = \frac{U_{Gl}}{R_{ges}} = 6,85mA \quad (3)$$

$$U_{R_2} = I_{R_2} \cdot R_2 = 10,28V \quad (4)$$

$$U_{R_3} = U_{R_1} + U_{R_i} = U_{Gl} - U_{R_2} = 1,72V \quad (5)$$

2. Nur Rechteckspannung

Hierbei wird also U_{Gl} durch den Innenwiderstand der Gleichspannungsquelle ersetzt:

$$R_{ges} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2+R_i}} = 1270,5\Omega \quad (6)$$

$$I_{R_1} = \frac{U_{Re}}{R_{ges}} = \pm 6,30mA \quad (7)$$

$$U_{R_1} = I_{R_1} \cdot R_1 = \pm 6,30V \quad (8)$$

$$U_{R_3} = U_{Re} - U_{R_1} = \pm 1,70V \quad (9)$$

3. Beide Spannungsquellen zusammen:

Sollte das Überlagerungstheorem stimmen, so müsste sich die resultierende Spannung als Summe der beiden zuvor errechneten Spannungen schreiben lassen, was hieße, dass:

$$U_{R_3} = 1,72V \pm 1,70V = 3,42V, \text{ bzw. } 0,02V \quad (10)$$

da es darauf ankommt, wie die Polung der Rechteckspannung ist!

3 Transistorschaltungen

3.1 Transistor als Schalter

Da ein Transistor benutzt werden kann, um mit kleinen Spannungen an der Basis große Ströme zu steuern, kann ein Transistor auch als Schalter verwendet werden, indem der Basisstrom ganz abgeschaltet wird. Die Arbeitsgerade des Transistors wird durch die Betriebsspannung U und den Verbraucherwiderstand R_C gegeben:

$$U_{CE} = U - R_C \cdot I_C \quad (11)$$

was mit den angegebenen Werten von $U = 12V$ und $R_C = 25\Omega$ ergibt:

$$I_C = -\frac{U_{CE}}{25\Omega} + 480mA \quad (12)$$

Die Angabe einer maximalen Verlustleistung bestimmt die Belastbarkeit des Transistors. Eine höhere Leistung könnte zur Beschädigung des Transistors führen. Die Leistung kann durch eine Hyperbel angenähert werden:

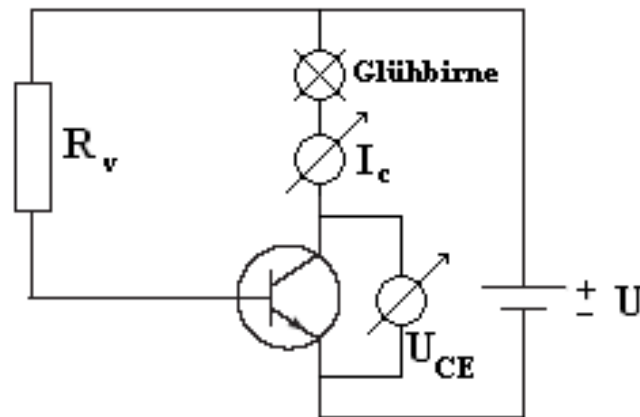
$$P = U_{CE} \cdot I_C \quad (13)$$

Mit der angegebenen Verlustleistung folgt als Formel für die Hyperbel:

$$I_C = 0,8W \cdot \frac{1}{U_{CE}} \quad (14)$$

Dies ist zulässig weil der Basis-Emitter-Strom sehr klein gegenüber dem Emitter-Kollektor-Strom ist. Um den Transistor nicht zu gefährden, muss die Arbeitsgerade bei Dauerbetrieb immer unter der Leistungshyperbel liegen. Beim Betrieb als Schalter ist es jedoch zulässig, dass die Hyperbel von der Gerade geschnitten wird, da der Transistor beim Umschalten nur extrem kurze Zeit im kritischen Bereich oberhalb der Gerade ist. Im Dauerbetrieb ist dann entweder I_C sehr klein, oder U_{CE} , sodass der entsprechende Arbeitspunkt unter der Leistungshyperbel liegt.

Nun soll das Beschriebene in der Praxis versucht werden - wir bauen folgende Schaltung auf:

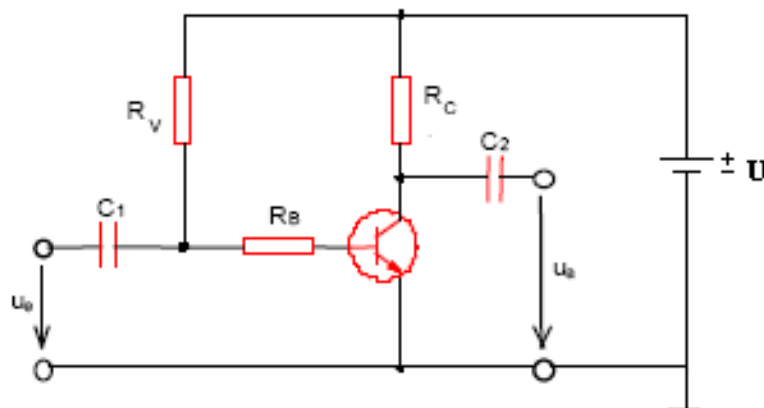


Der Widerstand R_v soll 3 verschiedene Größen haben: man tauscht unter $1k\Omega$, $10k\Omega$ und $220k\Omega$. Dann wird die Spannung U_{CE} und der Strom I_C gemessen, die Helligkeit des Lämpchen notiert und die Verlustleistung gemäß (13) berechnet.

3.2 Verstärker in Emitterschaltung

a) Einstellung des Arbeitspunktes

Es sollte die Emitterschaltung aufgebaut werden:



Mittels eines $1M\Omega$ -Potentiometers soll der Arbeitspunkt eingestellt werden, d.h. dass man als U_{CE} die Hälfte der Ausgangsgleichspannung von $12V$ einstellt, so dass $U_{CE} = 6V$. Dann misst man den Wert von I_C .

b) Berechnung der dynamischen Transistorkenngrößen

Man kann nun nach dem in vorangegangenen Aufgaben erstellen Vier-Quadranten-Diagramm verschiedenen Transistorgrößen berechnen:

i) Basis-Emitterwiderstand r_B

Man legt an die Eingangslinie eine Tangente und liest die Steigung (z.B. mittels Steigungsdreieck) ab, diese ist r_B , also:

$$R_B = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (15)$$

ii) Kollektor-Emitterwiderstand r_c

An das Stück zwischen Knick- und Endpunkt der Ausgangskennlinien werde eine Tangente gelegt und wieder die Steigung abgelesen:

$$r_c = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \quad (16)$$

iii) Stromverstärkungsfaktor β

Der Stromverstärkungsfaktor ist die Steigung der Tangente an die Steuerkennlinie, d.h.:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (17)$$

c) Berechnung der dynamischen Schaltungskenngrößen

Mittels der eben bestimmten Größen, lassen sich die dynamischen Transistorkenngrößen errechnen (für $R_B = 0\Omega$, $R_B = 680\Omega$ mit $R_C = 1k\Omega$):

$$\text{Eingangsimpedanz } Z_e = r_B + R_B \quad (18)$$

$$\text{Ausgangsimpedanz } Z_a = \left(\frac{1}{r_c} + \frac{1}{R_C} \right)^{-1} = \frac{r_c \cdot 1k\Omega}{r_c + 1k\Omega} \quad (19)$$

$$\text{Spannungsverstärkung } v = \frac{U_a}{U_e} = \beta \cdot \frac{Z_a}{Z_e} \quad (20)$$

In der Auswertung sollten die praktisch gefundenen Werte mit den auf dem Aufgabenblatt angegebenen verglichen werden.

d) Experimentelle Bestimmung der dynamischen Schaltungsgrößen

Hier wird die Emitterschaltung an einen Oszilloskopen angeschlossen, mit dem U_a und U_e gemessen werden, wobei man den Verstärkungsfaktor β nach (17) direkt ablesen kann.

Zur Bestimmung der Eingangsimpedanz wird ein Potentiometer zwischen Eingang und Spannungsquelle so eingestellt, dass am Verstärker nur noch die halbe Quellenspannung anliegt, weshalb dann gilt, dass die Eingangsimpedanz genau der eingestellte Widerstand vom Potentiometer ist.

Die Ausgangsimpedanzbestimmung erfolgt analog - man schaltet das Poti an den Ausgang und hat bei der Hälfte der Spannung genau wieder die Ausgangsimpedanz gefunden.

e) Eingangskoppelkondensator

Es wird ein Koppelkondensator verwendet, um ungewollte Spannungsspitzen zu glätten. Jedoch verzerrt ein Kondensator das Rechtecksignal. Hier soll der Spannungsabfall der Rechteckspannung ($f = 1\text{kHz}$ nicht größer als 2% sein. Es gilt mit für den Basisstrom:

$$\tau = r_B \cdot C_1 \quad (21)$$

$$I_B = I_{B_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (22)$$

$$U_a \ I_B \quad (23)$$

Mit $I_B(T) > 0,98 \cdot I_0$ folgt für die Kondensatorgröße:

$$C_1 > 0,0248s \frac{1}{r_B}$$

3.3 RC-Oszillator mit Transistorverstärker in Emitterschaltung

Wir bauen einen RC-Oszillator nach Bild 12 der Vorbereitungshilfe auf:

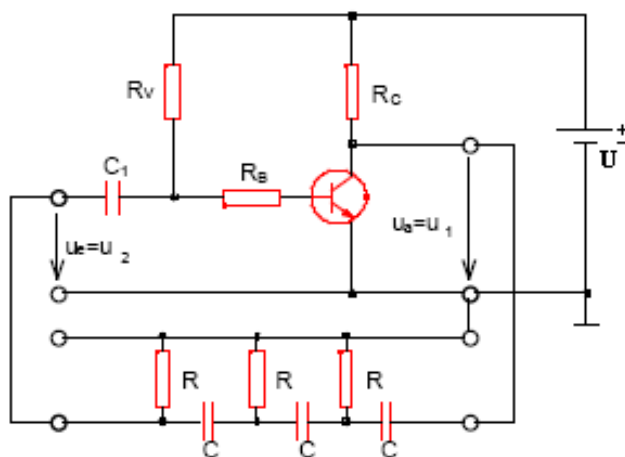


Bild 12 der Vorbereitungshilfe

Die Emitterschaltung sei mit folgenden Elementen gebaut: $R = 1k\Omega$, $C = 68nF$, $R_V = 220k\Omega$, $R_C = 1k\Omega$ und $R_B = 680\Omega$. Prinzipiell ist die Funktionsweise der Schaltung folgende:

Der Verstärker verstärkt das Eingangssignal und verschiebt dessen Phase um π . Nun wird das Signal an die Kette von drei RC Gliedern geliefert, die das Signal für eine bestimmte Frequenz wieder um π dreht. Das Signal aus der RC-Kette wird dem Verstärker wieder als Eingangssignal zugeführt. Die Schaltung oszilliert genau dann, wenn die Phasenverschiebung der RC-Kette π beträgt, da die Verstärkerschaltung invertierend ist. In diesem Fall wirkt die Verstärkerschaltung mitkoppelnd auf den Verstärkereingang. Der Abschwächungsfaktor muss somit negativ und reell sein. Für die Oszillatorfrequenz gilt laut Vorbereitungshilfe:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6} \cdot R \cdot C} \quad (24)$$

womit (aus der Vorbereitungshilfe) folgt:

$$f=950\text{Hz}$$