

Versuch: P1-51

Transistorschaltungen

- Vorbereitung -

Vorbemerkung

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und Verstärken von elektrischen Strömen und Spannungen verwendet werden kann. In diesem Versuch werden ausschließlich bipolare Transistoren betrachtet. Diese haben drei Anschlüsse: Basis, Emitter und Kollektor. Die Steuerung erfolgt über den Stromfluss: ein kleiner Strom zwischen Basis und Emitter steuert einen großen Strom, der auf der Kollektor-Emitter-Strecke fließen kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Transistor-Kennlinien	2
1.1	Eingangskennlinie	2
1.2	Ausgangskennlinie	3
1.3	Steuerkennlinie	3
2	Überlagerungstheorem	4
2.1	Nur Gleichspannung (U_{Re} ersetzt)	4
2.2	Nur Rechteckspannung (U_{Gl} ersetzt)	4
2.3	Beide Spannungsquellen	4
3	Transistorschaltungen	5
3.1	Transistor als Schalter	5
3.1.1	Theorie	5
3.1.2	Praxis	5
3.2	Transistor als Verstärker	6
3.2.1	Einstellung des Arbeitspunkts	6
3.2.2	Berechnung der dynamischen Transistorkenngrößen	6
3.2.3	Berechnung der dynamischen Schaltungskenngrößen	6
3.2.4	Experimentelle Bestimmung der dynamischen Schaltungskenngrößen	7
3.2.5	Berechnung des benötigten Eingangskoppelkondensators	7
3.3	RC-Oszillator mit Verstärker in Emitterschaltung	8

1 Transistor-Kennlinien

Setzt man Spannungen und Ströme am Transistor zueinander in Beziehung, erhält man mehrere Kennlinien, die die Arbeitsweise des Transistors charakterisieren. Zunächst seien folgende Bezeichnungen eingeführt:

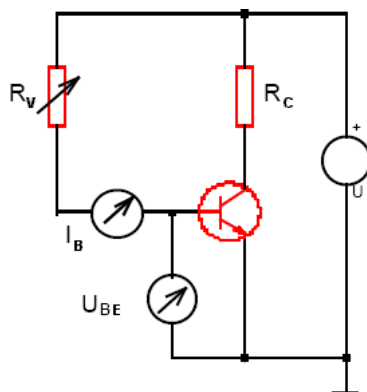
- Kollektorstrom: I_C
- Basisstrom: I_B
- Emitterstrom: I_E
- Kollektor-Emitter-Spannung: U_{CE}
- Basis-Emitter-Spannung: U_{BE}
- Basis-Kollektor-Spannung: U_{BC}

Um nun alle Kennlinien „auf einen Blick“ zu sehen, trägt man in einem Koordinatensystem in jedem Quadranten zwei Größen gegeneinander auf, vgl. Bild 1 der Versuchsmappe. Die einzelnen Quadranten belegt man dabei folgendermaßen:

- **1. Quadrant:** Hier wird die Ausgangskennlinie $I_C(U_{CE})$ aufgetragen. Hierbei teilen wir zwei Bereiche ein: Für kleine Kollektor-Emitter-Spannungen U_{CE} („Sättigungsbereich“) verlaufen die Kurven sehr steil und praktisch deckungsgleich, wobei sie abhängig vom Basisstrom I_B (als Parameter) sind. Für größere U_{CE} („Arbeitsbereich“) ist der Kollektorstrom I_C praktisch konstant, wobei sein Betrag sehr stark vom angelegten Basisstrom I_B abhängt.
- **2. Quadrant:** Da I_C kaum von U_{CE} abhängt, genügt die Aufzeichnung einer einzigen Steuerkennlinie $I_C(I_B)$, was im zweiten Quadranten erfolgen soll. Normalerweise müsste es sich dabei um eine Ursprungsgerade handeln, deren Steigung der Stromverstärkungsfaktor β ist.
- **3. Quadrant:** Hier wird I_B gegen U_{BE} aufgetragen, womit sich die Eingangskennlinie ergibt. Da diese Werte nur gering von U_{CE} abhängen, genügt eine einzige Messreihe.
- **4. Quadrant:** wird nicht verwendet

1.1 Eingangskennlinie

Um die Eingangskennlinie zu messen, muss folgende Schaltung aufgebaut werden (Quelle: Vorbereitungshilfe, leicht modifiziert):



Der Widerstand $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ begrenzt hierbei die Transistor-Verlustleistung und verhindert damit eine starke Erwärmung des Transistors, die zu einer Verfälschung der Messergebnisse oder gar zur Zerstörung des Bauteils führen könnte. Zwar verursacht R_C eine stetige Veränderung von U_{CE} , die aber für Kollektor-Emitter-Spannungen größer als $0,2 \text{ V}$ vernachlässigt werden kann.

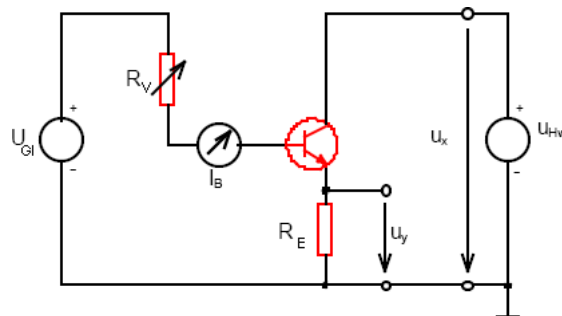
Der Widerstand $R_V \leq 1\text{ M}\Omega$ ist regelbar und dient zur Einstellung des Basisstroms I_B (der aber $100\ \mu\text{A}$ nicht übersteigen sollte). Den Basisstrom misst man mit Hilfe des μA -Meters, während parallel U_{BE} per Voltmeter aufgezeichnet wird. Ein hoher Innenwiderstand R_i dieses Geräts ist unerlässlich, da sich nur so die Beeinflussung des Stroms zwischen Basis und Emitter in Grenzen hält. Dies folgt aus der Formel für die Parallelschaltung von Widerständen:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_i} \quad (1)$$

Die Eingangskennlinie wird anschließend im 3. Quadranten des Vierquadranten-Schaubilds eingezeichnet.

1.2 Ausgangskennlinie

Die $I_C(U_{CE})$ -Kennlinie soll für verschieden Basisströme I_B mit Hilfe eines Oszilloskops (im X-Y-Betrieb) aufgenommen werden. Hierfür ist folgender Versuchsaufbau nötig:



Erläuterungen:

- Kollektor-Spannung ist eine Halbwellenspannung $U_{Hw} = +12\text{V}$
- Basisspannung ist eine Gleichspannung $U_{Gl} = +12\text{V}$
- Zwischen Emitter und Masse fügt man einen Widerstand $R_E = 2\ \Omega$ ein. Dieser ermöglicht es, den Strom am Emitter auf dem Oszilloskop darzustellen, das bekanntlich nur Spannungen anzeigen kann: die über R_E abgegriffene Spannung wird auf die y-Achse des Oszilloskops gelegt. Die Umrechnung erfolgt mit dem Ohm'schen Gesetz:

$$I_E = \frac{U_y}{R_E} \quad (2)$$

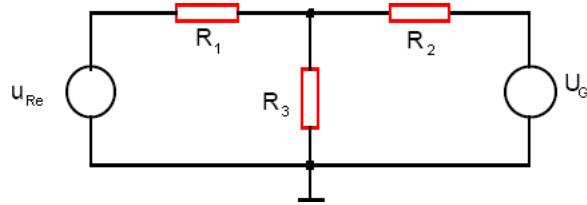
- Der Einbau von R_E hat aber den Nachteil, dass nur die Addition der Spannungen $U_{CE} + U_{RE}$ auf die x-Achse gelegt werden kann. Deshalb ist es wichtig, vorher zu überprüfen ob die dadurch verursachte Abweichung akzeptabel ist.
- I_B soll so eingepegelt werden, dass im Plateaubereich $I_C = 50\text{ mA}$ erreicht werden. Die Messung der Kennlinien von 20%, 40%, 60% und 80% dieses I_B -Wertes soll anschließend vorgenommen werden.

1.3 Steuerkennlinie

Für den zweiten Quadranten des Vierquadranten-Schaubilds ist die Steuerkennlinie reserviert. Eine weitere Messung ist nicht notwendig, da in 1.2 der Kollektorstrom I_C bereits für verschiedene Basisströme I_B gemessen wurde und somit das Ergebnis nur noch im Vierquadranten-Schaubild eingetragen werden muss.

2 Überlagerungstheorem

Nach dem Überlagerungstheorem gilt in einer Schaltung aus linearen Bauelementen mit mehreren Strom- bzw. Spannungsquellen: Die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten ist die Summe aus den Spannungen, die sich für jeweils nur eine aktive Spannungsquelle ergeben würde. Hierbei müssen jeweils die als inaktiv betrachteten Spannungsquellen durch ihre Innenwiderstände R_i ersetzt werden. Analoges gilt für die Ströme. Um dieses Theorem zu bestätigen, wird folgender Versuchsaufbau verwendet:



Daten:

- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 330 \Omega$
- Rechteckspannung: $U_{Re} = \pm 8 \text{ V}$, $R_i = 50 \Omega$
- Gleichspannung: $U_{Gl} = 12 \text{ V}$, $R_i = 0 \Omega$

Nun soll theoretisch und experimentell die Spannung U_{R_3} ermittelt werden, die über R_3 abfällt - wir unterscheiden drei Fälle:

2.1 Nur Gleichspannung (U_{Re} ersetzt)

U_{R_3} berechnet sich in diesem Fall folgendermaßen:

$$R_{ges} = R_2 + R_{||} = R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1 + R_i}} = 1751,1 \Omega \quad (3)$$

$$I_{R_2} = \frac{U_{Gl}}{R_{ges}} = 6,85 \text{ mA} \quad (4)$$

$$U_{R_2} = I_{R_2} \cdot R_2 = 10,28 \text{ V} \quad (5)$$

$$U_{R_3} = U_{R_1} + U_{R_i} = U_{Gl} - U_{R_2} = 1,72 \text{ V} \quad (6)$$

2.2 Nur Rechteckspannung (U_{Gl} ersetzt)

Diesmal gilt für U_{R_3} :

$$R_{ges} = R_1 + R_{||} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2 + R_i}} = 1270,5 \Omega \quad (7)$$

$$I_{R_1} = \frac{U_{Re}}{R_{ges}} = \pm 6,30 \text{ mA} \quad (8)$$

$$U_{R_1} = I_{R_1} \cdot R_1 = \pm 6,30 \text{ V} \quad (9)$$

$$U_{R_3} = U_{Re} - U_{R_1} = \pm 1,7 \text{ V} \quad (10)$$

2.3 Beide Spannungsquellen

Nach dem Überlagerungstheorem ergibt sich die Spannung aus der Summe der beiden vorherigen Spannungen:

$$U_{R_3} = 1,72 \text{ V} \pm 1,70 \text{ V} = 3,42 \text{ V} \text{ oder } 0,02 \text{ V} \quad (11)$$

(je nach Polarität der Rechteckspannung)

3 Transistorschaltungen

3.1 Transistor als Schalter

3.1.1 Theorie

Wie bereits in der Vorbemerkung erwähnt, ist der Einsatz als Schalter ein Anwendungsgebiet von Transistoren. Diese Funktion lässt sich anhand der Arbeitsgeraden des Transistors erklären. Die Arbeitsgerade beschreibt den Zusammenhang zwischen U_{CE} und dem Strom I_C durch R_C , wobei U_{CE} gerade die Spannung ist, die nach dem Abfall am Widerstand R_C von der Betriebsspannung U übrig bleibt.

$$U_{CE} = U - I_C \cdot R_C \quad (12)$$

Die Größenrelation U_{CE} über I_C befindet sich im 1. Quadranten des Vierquadranten-Schaubilds, weshalb die Arbeitsgerade ebenfalls dort eingetragen wird. Die Arbeitspunkte des Transistors sind dann genau die Schnittpunkte zwischen Arbeitsgerade und Ausgangskennlinien.

- Wird der Basisstrom I_B so eingestellt, dass der Arbeitsstrom am Kollektor $I_C = 0$ mA beträgt, sperrt der Transistor, wird also zum „offenen Schalter“
- Ein Basisstrom I_B , der zu einem Arbeitspunkt mit $U_{CE} \approx 0$ V gehört macht den Transistor zu einem „geschlossenen Schalter“, es fließt ein großer Emitter-Kollektor-Strom.

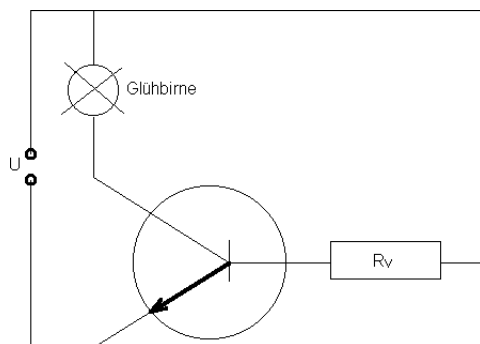
Die Belastung darf allerdings nicht zu groß werden, da sonst der Kondensator zerstört wird. Die maximale Belastung wird durch die Verlustleistung beschrieben, deren Schaubild eine Hyperbel ist und die sich nach folgender Formel berechnet:

$$P = U_{CE} \cdot I_C = (U - I_C \cdot R_C) \cdot I_C = U \cdot I_C - I_C^2 \cdot R_C \quad (13)$$

Um den Transistor vor Überhitzung zu schützen, sollte der Arbeitspunkt unterhalb dieser Hyperbel liegen, Arbeitsgerade und Hyperbel sollten also keine Schnittpunkte haben. Wird der Transistor allerdings als Schalter eingesetzt, muss dies nicht allzu sehr berücksichtigt werden, da die Umschaltvorgänge, in denen der kritische Bereich erreicht wird, nur sehr kurz andauern.

3.1.2 Praxis

Um die Schalteneigenschaft des Transistors in der Praxis zu testen, soll mit seiner Hilfe eine Glühlampe gesteuert werden. Wir verwenden im Gegensatz zur Aufgabenstellung folgenden Versuchsaufbau:



Den Widerstand R_V tauschen wir aus, so dass wir drei Werte bekommen (für $R_V = 1$ k Ω , $R_V = 10$ k Ω , $R_V = 220$ k Ω). Am Kondensator messen wir I_C und U_{CE} und berechnen die Verlustleistung mit:

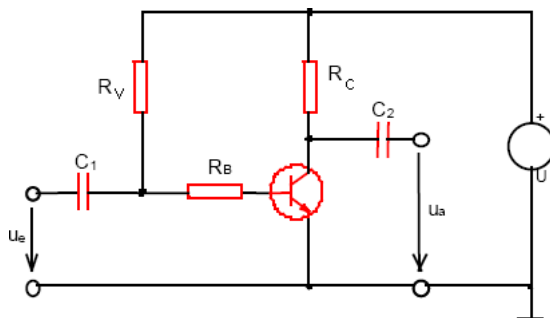
$$P = U_{CE} \cdot I_C \quad (14)$$

(vgl. Formel (13))

3.2 Transistor als Verstärker

3.2.1 Einstellung des Arbeitspunkts

Mit Hilfe der Schaltskizze aus der Vorbereitung wird die Emitterschaltung aufgebaut:



Mit dem regelbaren Vorwiderstand $R_V \leq 1 \text{ M}\Omega$ wird der Arbeitspunkt so eingestellt, dass bei angelegter Spannung $U_0 = 12 \text{ V}$ jeweils die Hälfte (sprich 6 V) am Transistor und am Kollektorwiderstand $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ abfällt.

3.2.2 Berechnung der dynamischen Transistorkenngrößen

Das Kennlinienfeld soll nun um den Arbeitspunkt und die Arbeitsgerade ergänzt werden. Die dynamischen Transistorkenngrößen Basis-Emitter-Widerstand r_B , Kollektor-Emitter-Widerstand r_C und Stromverstärkungsfaktor β lassen sich aus dem Schaubild ablesen bzw. errechnen:

- Der Basis-Emitter-Widerstand r_B kann im 3. Quadranten abgelesen werden:

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

- Für den Kollektor-Emitter-Widerstand r_C betrachtet man den 1. Quadranten des Vierquadranten-Schaubilds:

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

- Der Stromverstärkungsfaktor β wird im 2. Quadranten abgelesen:

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

3.2.3 Berechnung der dynamischen Schaltungskenngrößen

Mit den dynamischen Transistorkenngrößen aus 3.2.2 können die Schaltungskenngrößen berechnet werden, wobei dies für die beiden Vorwiderstände $R_B = 0 \Omega$ und $R_B = 680 \Omega$ durchgeführt werden soll.

- Eingangsimpedanz: $Z_e = r_B + R_B$
- Ausgangsimpedanz: $Z_a = \frac{1}{\frac{1}{r_C} + \frac{1}{R_C}}$
- Spannungsverstärkung: $v = \beta \cdot \frac{Z_a}{Z_2}$

Mit den Werten aus der Vorbereitung ($\beta = 133$, $r_B = 500 \Omega$, $r_C = 7,5 \text{ k}\Omega$) ergibt sich für die beiden Fälle:

1. $R_B = 0 \Omega$; $Z_e = 500 \Omega$; $Z_a = 882 \Omega$; $v = 234,7$
2. $R_B = 680 \Omega$; $Z_e = 1180 \Omega$; $Z_a = 882 \Omega$; $v = 99,6$

Mit diesen Werten soll der Aussteuerbereich bestimmt werden. Dies ist der Bereich der Eingangsspannungen, in dem die Eingangsverstärkung v nur um einen bestimmten Prozentsatz variiert. Weil v in den obigen Formeln die einzige von der Eingangsspannung abhängige Größe ist, die R_B enthält, kann man den Aussteuerbereich mit Hilfe des Kennlinienfelds bestimmen. Um also v um einen frei wählbaren Prozentsatz zu verändern, muss man aus dem Kennlinienfeld die Eingangsspannungen entnehmen, die $\frac{1}{r_B + R_B}$ um den gleichen Prozentwert verändern.

3.2.4 Experimentelle Bestimmung der dynamischen Schaltungskenngrößen

Nun folgt die Messung der dynamischen Schaltungskenngrößen für beide Widerstände R_B und der Vergleich mit den in 3.2.3 theoretisch hergeleiteten Werten. Hierzu wird eine Rechteckspannung von 1 kHz verwendet, die bis zum Auftreten von Nicht-Linearitäten erhöht wird. Mit dem Oszilloskop messen wir die Eingangsspannung u_e und die Ausgangsspannung u_a , so dass leicht Vergleiche angestellt werden können. Der Verstärkungsfaktor v kann so direkt abgelesen werden!

Für die Ermittlung der Impedanzen schaltet man einen regelbaren Widerstand zum Ein- bzw. Ausgang in Reihe und regelt ihn dann so ein, dass dort die Hälfte der ursprünglichen Spannung abfällt. Dann gilt $R_i = Z_i$ und die gewünschte Impedanz Z_a bzw. Z_e ist gefunden.

3.2.5 Berechnung des benötigten Eingangskoppelkondensators

Der Kondensator ist dafür da, um die Gleichstromanteile aus dem Eingangssignal heraus zu filtern, wobei es zu einer Verzerrung des Wechselstromanteils kommt. Die Frage ist nun, bei welcher Kapazität der Dachabfall unter 2% bleibt. Hierfür betrachten wir zuerst den Strom beim Entladevorgang eines Kondensators:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (18)$$

In unserem Fall gilt $R = r_B$ und $C = C_1$ und für die Zeit, in der das Signal in der das Signal konstant ist: $t^* = \frac{1}{2 \cdot 1000} s$. Für einen Signalabfall unter 2% muss dann gelten:

$$e^{-\frac{t^*}{r_B \cdot C_1}} > 0,98 \Leftrightarrow C_1 > -\frac{t^*}{r_B \cdot \ln(0,98)} \quad (19)$$

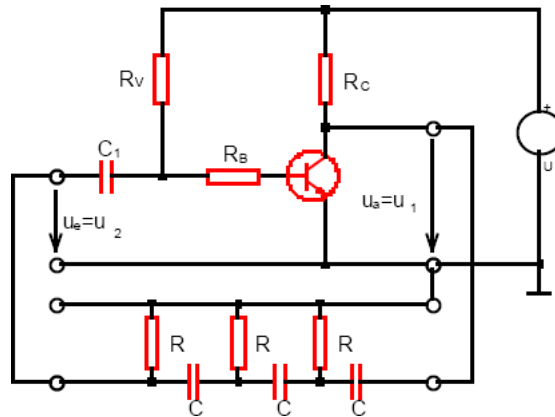
Mit dem angegebenen $r_B = 500 \Omega$ gilt also:

$$C_1 > 49,5 \mu F \quad (20)$$

Der Kondensator C_1 sollte also mindestens 50 μF Kapazität besitzen.

3.3 RC-Oszillator mit Verstärker in Emitterschaltung

Die Schaltskizze für diesen Versuchsteil ist wieder in der Vorbereitungsmappe gegeben:



Daten:

- Dreistufige RC-Kette: $R = 1000 \Omega$, $C = 68 \text{ nF}$
- Emitterschaltung: $R_V = 220 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1000 \Omega$, $R_B = 680 \Omega$

Aufgrund der Phasenverschiebung um π durch die Verstärkerschaltung muss die RC-Kette ebenfalls eine Phasenverschiebung um π erzeugen, damit es zu einer Oszillation kommt. Die benötigte Frequenz beträgt:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6} \cdot RC} \approx 955,5 \text{ Hz} \quad (21)$$

Dieser Wert soll experimentell überprüft werden. Außerdem lässt sich mit (21) der reziproke Abschwächungsfaktor berechnen:

$$\frac{u_1}{u_2} = 1 - \frac{5}{(\omega RC)^2} \approx -\frac{1}{29} \quad (22)$$