

# Protokoll zum Versuch „Transistorschaltungen“

Kirstin Hübner      Armin Burgmeier      Gruppe 15

10. Dezember 2007

## 1 Transistor-Kennlinien

### 1.1 Eingangskennlinie

Nachdem wir die Schaltung wie in Bild 13 aufgebaut hatten, haben wir die Basis-Emitter-Spannung bei verschiedenen Basisströmen gemessen und in den dritten Quadranten des Kennlinienfelds (im Anhang) eingetragen.

Auf dem Schaubild bestätigt sich unsere Erwartung, dass die Kennlinie die einer Diode gleicht. Für noch kleinere Basisströme sollte die Spannung sehr schnell abnehmen, allerdings konnten wir in diesem Bereich keine Messwerte mehr aufnehmen, da die Grenze des regelbaren Widerstands erreicht war.

### 1.2 Ausgangskennlinien

Wie in den Vorbereitungen beschrieben haben wir den Basisstrom so eingestellt, dass der Kollektorstrom  $I_C$  die gewünschten Werte angenommen hat. Für jede solche Einstellung haben wir mittels des Oszilloskops zwei Punkte im linearen Bereich der Kennlinie aufgenommen um diese nun in das Kennlinienfeld eintragen zu können. Den ersten Punkt haben wir kurz nach dem Sprung gewählt, den zweiten am Ende des angezeigten Bereichs. Da wir im Messprotokoll nur „Kästchenangaben“ mit zugehörigen Einstellungen des Oszilloskops angegeben haben hier nun eine umgerechnete Tabelle:

$I_C$ [mA]	$I_B$ [mA]	Punkt 1	Punkt 2
10	0,0767	(0,4V; 19,0mV)	(15,4V; 20,5mV)
20	0,1423	(0,4V; 38,5mV)	(15,2V; 42,0mV)
30	0,2059	(0,6V; 60,0mV)	(15,2V; 66,0mV)
40	0,2647	(0,8V; 78,0mV)	(14,0V; 86,0mV)
50	0,3307	(0,8V; 100,0mV)	(14,0V; 115,0mV)

Zwischen den beiden gemessenen Werten besteht, wie auf dem Oszilloskop zu erkennen war, ein deutlicher linearer Zusammenhang. Diese Daten haben wir nun in den ersten Quadranten eingetragen.

Die Kollektor-Emitter-Spannungen ab denen  $I_C$  nahezu linear ist verschiebt sich bei größer werdenden Basisströmen weiter nach rechts. Bei unserer Messung ist auffällig, dass für große Basisströme die Kennlinie eine immer größere Steigung aufweist. In diesen Bereichen hatten wir das Problem, dass das Oszilloskop bei großen Spannungen keine klare Linie sondern eine trichterartige Form darstellte. Daher haben wir den zweiten Punkt vor Auftreten dieser Erscheinung gewählt.

### 1.3 Steuerkennlinie

Wir tragen die bereits in 1.2 aufgenommenen Ströme  $I_B$  und  $I_C$  in den zweiten Quadranten des Kennlinienfeldes ein. Unsere Messwerte liegen mit nur geringen Abweichungen auf der gewünschten Ursprungsgeraden, wie durch die eingezeichnete Ausgleichsgerade zu sehen ist. Die Steigung dieser Geraden gibt die Stromverstärkung des Transistors an.

## 2 Überlagerungstheorem

In dieser Aufgabe sollten wir das Überlagerungstheorem experimentell bestätigen. Dazu haben wir zunächst in Schaltung 15 beide Spannungsquellen angeschlossen und die Spannung am Widerstand  $R_3$  am Oszilloskop dargestellt. Als beide Spannungsquellen wirksam waren erhielten wir

$$U_{min}^b = 0,14V \quad U_{max}^b = 3,55V$$

Beide Werte liegen über den von uns errechneten von  $U_{min}^b = 0,02V$  und  $U_{max}^b = 3,42V$ . Bei genauerem Hinsehen erkennt man, dass bei beiden Wertepaaren eine Abweichung von etwa  $0,12V$  vorliegt, was eine Ungenauigkeit bei der Justierung der  $0V$ -Linie nahelegt.

Ist nur die Rechteckspannung wirksam, so haben sich

$$U_{min}^{Re} = -1,65V \quad U_{max}^{Re} = 1,85V$$

ergeben. Diese Werte stimmen mit den berechneten  $U^{Re} = \pm 1,70V$  gut überein. Auch hier vermuten wir den  $0V$ -Linien-Fehler, da die Amplitude in beide Richtungen ohne Gleichspannungsanteil gleich groß sein müsste.

Bei aktiver Gleichspannungsquelle haben wir

$$U^{Gl} = 1,75V$$

gemessen. Dies stimmt mit der berechneten Spannung von  $U^{Gl} = 1,72V$  sehr gut überein.

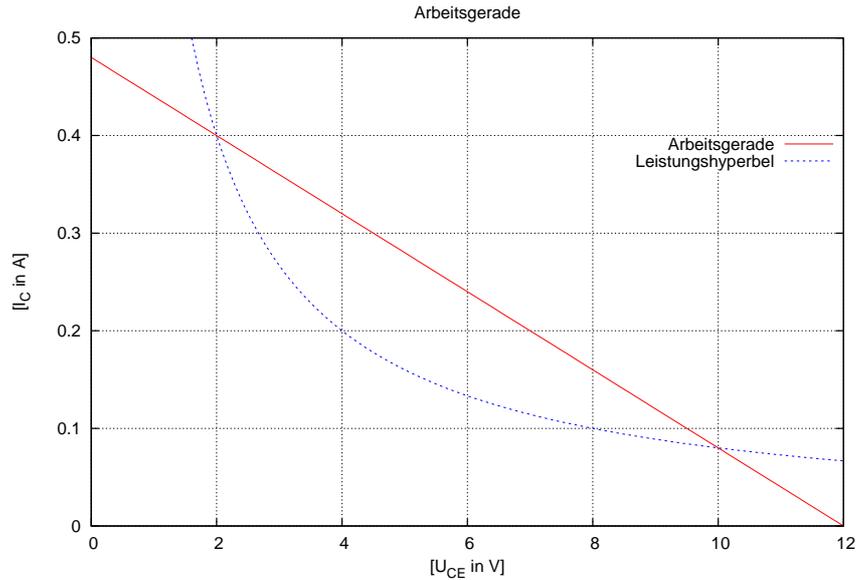
Insgesamt können wir das Überlagerungstheorem verifizieren, da gilt:

$$U^{Gl} + U_{min}^{Re} = 0,10V \approx 0,14V \quad U^{Gl} + U_{max}^{Re} = 3,60V \approx 3,55V$$

### 3 Transistorschaltungen

#### 3.1 Transistor als Schalter

- a) Wie bereits in den Vorbereitungen diskutiert darf der Arbeitspunkt bei Dauerbetrieb nicht oberhalb der Leistungshyperbel liegen, in unserem Fall liegen die verwendeten Arbeitspunkte jedoch unterhalb der Hyperbel obwohl die Arbeitsgerade sie schneidet:



Daher besteht in diesem Versuch keine Gefahr für den Transistor.

- b) Die Schalteneigenschaft des Transistors haben wir uns an einem Glühlämpchen veranschaulicht. Dazu haben wir in der Emitterschaltung den Kollektorzustand durch eine Glühbirne ersetzt und den Widerstand  $R_V$  variiert:

$R_V$	$1\text{k}\Omega$	$10\text{k}\Omega$	$220\text{k}\Omega$
I	203,7mA	165,8mA	7,6mA
U	0,267V	3,66V	11,80V
P	0,055W	0,607W	0,090W

Während des Versuchs konnten wir beobachten, dass die Glühbirne nur bei  $R_V = 1\text{k}\Omega$  wirklich hell leuchtete. Bei dem größten Widerstand blieb sie dunkel, da bei kleinem Basisstrom auch nur ein geringer Kollektorstrom fließen kann. Zudem kann man an den Messwerten sehr schön erkennen, dass in diesem Fall die meiste Spannung am Transistor statt an der Glühbirne abfällt. Bei  $R_V = 10\text{k}\Omega$  leuchtet die Glühbirne noch schwach.

Die Verlustleistung ist bei den Widerständen  $R_V = 1\text{k}\Omega$  und  $R_V = 220\text{k}\Omega$  wesentlich kleiner als bei  $R_V = 10\text{k}\Omega$ .

### 3.2 Verstärker in Emitterschaltung

- a) Wir stellen den Arbeitspunkt in der Schaltung aus Bild 2 in der Vorbereitungshilfe bei konstantem Kollektorwiderstand  $R_C = 1\text{k}\Omega$  so ein, dass die Hälfte der Spannung am Transistor und die andere am Widerstand abfällt, da wir später eine Wechselspannung anlegen. Somit können wir das Signal in beide Richtungen gleich verstärken.
- b) Nachdem wir die Arbeitsgerade über zwei Punkte ( $U_{CE} = 0\text{V}$  und  $I_C = 0\text{mA}$ ) eingetragen haben lässt sich der Arbeitspunkt  $A$  ebenfalls bei  $U_{CE} = 6\text{V}$  einzeichnen.

Um den dynamischen Kollektor-Emitter-Widerstand  $r_C$  zu bestimmen benötigen wir eigentlich die zugehörige Ausgangskennlinie. Da unser Arbeitspunkt nicht auf einer der zuvor eingezeichneten Kennlinien liegt ( $I_C = 6\text{mA}$ ) verwendeten wir diejenige, die am nächsten liegt ( $I_C = 10\text{mA}$ ). Daraus ergibt sich

$$r_C = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = 20,0\text{k}\Omega$$

Da die Steigungen der Kennlinien mit zunehmendem Kollektorstrom größer werden vermuten wir allerdings einen echten Wert der deutlich unterhalb unserem errechneten Wert liegt. Dies bestätigt der gegebene Wert von  $r_C = 7,5\text{k}\Omega$ .

Der Stromverstärkungsfaktor ergibt sich aus der Steigung der Steuerkennlinie im zweiten Quadranten am Arbeitspunkt. Da diese an jeder Stelle gleich ist können wir einfach die Steigung dieser Geraden ausrechnen:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = 148,8$$

Dabei haben wir die Steigung mit gnuplot durch lineare Regression bestimmt. Dieser Wert liegt dem gegebenen  $\beta = 133$  nahe.

Der dynamische Basis-Emitter-Widerstand  $r_B$  ergibt sich aus der Steigung der Eingangskennlinie an der zum Arbeitspunkt gehörigen Stelle. Um diese zu bestimmen haben wir die Steigung einer Geraden durch die beiden benachbarten Messpunkte berechnet. Eine genauere Methode wäre es die Tangente an eine analytische Funktion in diesem Punkt zu ermitteln, jedoch wussten wir nicht durch welche Funktion die Kennlinie repräsentiert wird. Wir erhalten:

$$r_B = 735,3\Omega$$

Dies weicht vom gegebenen Wert von  $500\Omega$  zwar ab, jedoch sind die gegebenen Werte in der Vorbereitungshilfe auch nur Näherungen.

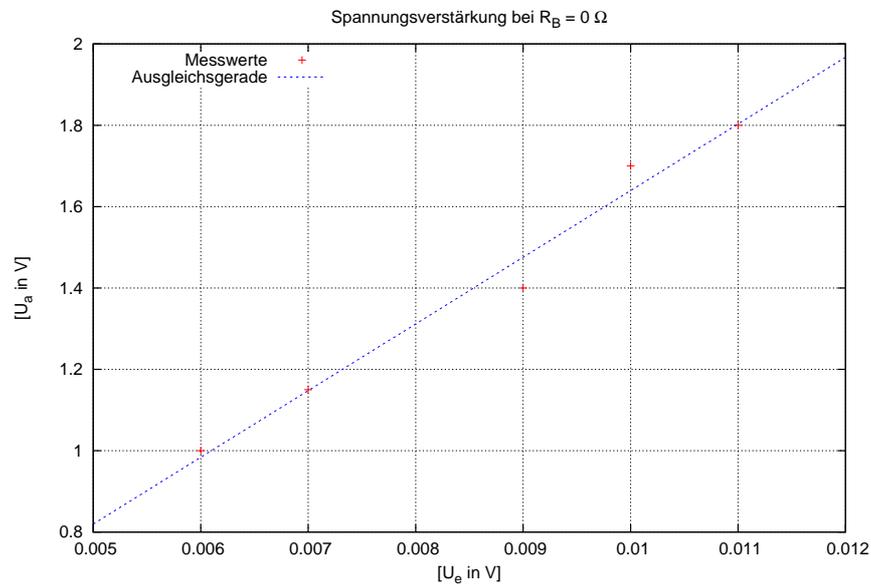
- c) In den Vorbereitungen haben wir die folgenden Schaltkenngrößen sowohl bei  $R_B = 0\Omega$  und bei  $R_B = 680\Omega$  errechnet:

Kenngröße	$R_B = 0\Omega$	$R_B = 680\Omega$
Eingangsimpedanz $Z_e$	$500\Omega$	$1180\Omega$
Ausgangsimpedanz $Z_a$	$882\Omega$	$882\Omega$
Spannungsverstärkung $v$	$234,7\Omega$	$99,5\Omega$

- d) Um die Spannungsverstärkung bestimmen zu können haben wir Messreihen von Eingangs- und Ausgangsspannung über das Oszilloskop aufgenommen. Für  $R_B = 0\Omega$  haben wir folgende Werte gemessen:

$U_e$ [mV]	$U_a$ [V]
6	1,0
7	1,15
9	1,4
10	1,7
11	1,8

Dabei haben wir hier die zweite Messreihe verwendet, da die erste schon im nichtlinearen Bereich beginnt und somit keine Aussage möglich gewesen wäre. Die gesuchte Verstärkung ergibt sich aus der Steigung der Geraden:



Sie beträgt

$$v = 164,0$$

Damit weicht sie erheblich vom errechneten Wert ab.

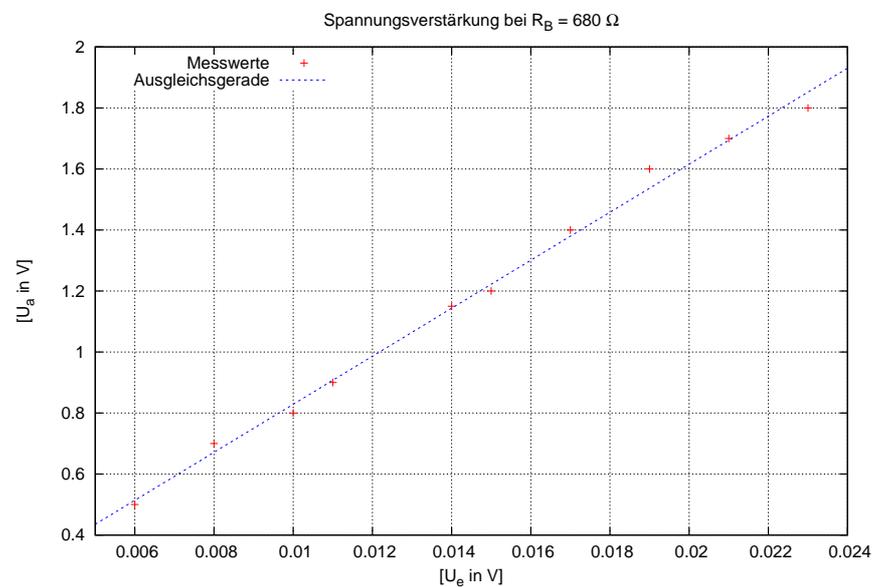
Auch für  $R_B = 680\Omega$  haben wir eine Messreihe aufgenommen:

$U_e$ [mV]	$U_a$ [V]
6	0,5
8	0,7
10	0,8
11	0,9
14	1,15
15	1,2
17	1,4
19	1,6
21	1,7
23	1,8

Tragen wir diese wie oben in ein Schaubild ein und führen eine lineare Regression durch, so erhalten wir

$$v = 78,7$$

Dieser Wert weicht vom errechneten weit weniger ab als derjenige für  $R_B = 0\Omega$ . Das könnte vor allem daran liegen, dass der lineare Bereich größer ist und wir somit mehr Messwerte aufnehmen konnten.



Um die Eingangsimpedanz  $Z_e$  zu messen haben wir vor den Verstärker einen bekannten Widerstand  $R = 1\text{k}\Omega$  geschaltet. Wir haben oszilloskopisch die Eingangsspannung  $U_e$  und die Spannung hinter dem Widerstand  $U_{Z_e}$  gemessen. Nach dem Ohmschen Gesetz gilt dann

$$\frac{U_e - U_{Z_e}}{R} = \frac{U_{Z_e}}{Z_e} \quad (1)$$

Somit ergibt sich für die gesuchte Größe  $Z_e$ :

$$Z_e = \frac{U_{Z_e} R}{U_e - U_{Z_e}} \quad (2)$$

Wir haben für  $R_B = 0\Omega$  folgende Wertepaare gemessen:

$U_e$ [mV]	$U_{Z_e}$ [mV]	$Z_e$ [ $\Omega$ ]
18	9	1000
24	11	846
30	14	875

Alle Messwerte weichen stark vom errechneten Wert von  $Z_e = 500\Omega$  ab. Setzen wir in die Gleichung

$$Z_e = R_B + r_B \quad (3)$$

den gemessenen Wert von  $r_B = 735,3\Omega$  ein, so erhalten wir zwar eine geringere Abweichung, die jedoch nicht vernachlässigbar ist.

Für  $R_B = 680\Omega$  wenden wir das gleiche Verfahren an und erhalten:

$U_e$ [mV]	$U_{Z_e}$ [mV]	$Z_e$ [ $\Omega$ ]
23	14	1556
24	14	1400
30	19	1727

Wieder ergibt sich eine erhebliche Abweichung zum theoretischen Wert von  $Z_e = 1180\Omega$ . Berechnen wir die Eingangsimpedanz mit Gleichung 3, so erhalten wir  $Z_e = 1415,3\Omega$ . Dies wiederum kommt unseren Messwerten deutlich näher.

Für die Ausgangsimpedanz haben wir den bekannten Widerstand hinter den Verstärker geschaltet und die Ausgangsspannung  $U_a$  sowie den Spannungsabfall vor dem Widerstand  $U_B$  gemessen. Wieder nach dem ohmschen Gesetz ergibt sich

$$Z_a = \frac{U_B R}{U_a - U_B} \quad (4)$$

Erneut haben wir zu beiden  $R_B$ -Werten mehrere Messungen aufgenommen. Für  $R_B = 0\Omega$  ergibt sich:

$U_a$ [V]	$U_B$ [V]	$Z_a$ [ $\Omega$ ]
4,4	2,2	1000
2,2	1,0	833
3,4	1,8	1125

Auch diese weichen vom errechneten Wert  $Z_a = 882\Omega$  ab, allerdings nicht so stark wie in den vorhergehenden Messungen. Auch hier können wir mittels

$$Z_a = \frac{R_C r_C}{R_C + r_C} \quad (5)$$

einen Wert angeben, in den unsere bisherigen Messungen eingehen:

$$Z_a = 952\Omega$$

Dieser Wert kommt dem Mittelwert unserer Messungen ( $986\Omega$ ) sehr nahe. Zudem haben wir auch für  $R_B = 680\Omega$  drei Wertepaare aufgenommen um zeigen zu können, dass  $Z_a$  nicht von  $R_B$  abhängt:

$U_a$ [V]	$U_B$ [V]	$Z_a$ [ $\Omega$ ]
2,0	1,0	1000
2,8	1,4	1000
3,8	2,0	1111

Die Werte liegen im gleichen Bereich wie die für  $R_B = 0\Omega$ , womit die Unabhängigkeit bestätigt werden kann.

- e) Wir haben für die vorherige Aufgabe einen Kondensator  $C_1 = 120\mu\text{F}$  verwendet, da dies der einzige war, bei dem der Dachabfall nach unseren weniger als 2% beträgt. Um unseren Grenzwert von  $C = 49,49\mu\text{F}$  zu testen haben wir einen Kondensator mit geringerer Kapazität in die Schaltung eingebaut und konnten auf dem Oszilloskop einen signifikanten Abfall feststellen.

### 3.3 RC-Oszillator

Wir haben die RC-Kette an die Emitterschaltung wie in Bild 12 gekennzeichnet angeschlossen. Mithilfe der Darstellung auf dem Oszilloskop haben wir die Periodendauer zu  $T = 1,2\text{ms}$  bestimmt. Über die Gleichung

$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

erhalten wir somit die gesuchte Frequenz zu

$$f = 833,3\text{Hz}$$

In der Vorbereitung haben wir einen Wert von  $f = 955,5\text{Hz}$  ausgerechnet. Damit liegt unsere Frequenz unter der berechneten, jedoch ist das Ablesen der benötigten Nulldurchgänge am Oszilloskop eine mögliche Fehlerquelle.