

Der bipolare Transistor
 Statisches Verhalten und Kleinsignalverstärkung

Studiengang: KMT

Datum: 25.11.2010

Set: 3.08 Platz: 4

Teilnehmer: Michael Goldbuch, Jürgen Döffinger

2 Vell

Zielstellung *Berechnung $r_{a\beta}$, $r_{CE\beta}$*

- Aufnahme von Ausgangs- und Eingangskennlinienfeldern in Emitterschaltung
- Graphische Konstruktion von Stromsteuerungs- und Rückwirkungskennlinienfeldern
- Bestimmung der h-Parameter anhand der Kennlinienfelder in einem vorgegebenen Arbeitspunkt
- Dimensionierung einer NF-Verstärkerstufe in Emitterschaltung
- Ermittlung des Leitungstypes und der Anschlüsse eines unbekanntem Transistors

1. Begriffe und Formelzeichen

Eingangswiderstand r_{BE} , Ausgangswiderstand r_{CE} , statischer Stromverstärkungsfaktor B , differentieller Stromverstärkungsfaktor β , Rückwirkungskfaktor D , Verlustleistung P , Arbeitspunkt I_C und U_{CE} , Spannungssteuerung, Stromsteuerung, Spannungsquelle, Stromquelle

2. Versuchsvorbereitung

- 2.1. Wiederholen Sie den Vorlesungsabschnitt "Bipolare Transistoren". Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen und Formelzeichen vertraut.
- 2.2. Stellen Sie in einer Vierquadrantendarstellung den qualitativen Verlauf der Kennlinien eines Transistors dar. Benennen Sie die Kennlinien und stellen Sie dar, wie sich daraus die h-Parameter bestimmen lassen. Verdeutlichen Sie auch den Einfluß des jeweiligen Parameters im entsprechenden Kennlinienfeld.
- 2.3. Bestimmen Sie die passiven Bauelemente der Verstärkerschaltung aus Bild 1. Legen Sie für die Widerstände den Nennwert (Baureihe E 24) und die Verlustleistungsklasse und für die Kondensatoren den Nennwert (Baureihe E 12) und die Nennspannung fest. Wählen Sie geeignete Bauelemente-Typen aus.

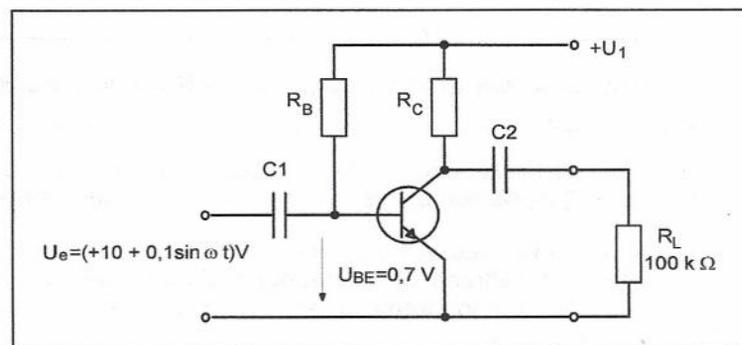


Bild 1: Kleinsignalverstärker in Emitterschaltung

Gegeben sind die folgenden Kennwerte (wählen Sie einen Satz der Kennwerte A ... H):

	A	B	C	D	E	F	G	H
U_1 [V]	6	18	9	9	12	15	18	20
I_C [mA]	0,5	5	2	4	1	2	3	5
B	80	200	150	120	120	80	160	180
f_{min} [Hz]	100	20	50	100	50	40	80	100

Der Arbeitspunkt des Transistors ist mit dem angegebenen Wert für I_C und $U_{CE} = 0,5 \times U_1$ bestimmt. Stellen Sie die berechneten Werte für die Bauelemente in der folgenden Tabelle zusammen:

Bauelement	berechneter Wert	Nennwert	Nennverlustleistung bzw. Nennspannung	Bauelemente-Typ
R_C	6 k Ω ✓	6,2 k Ω ✓	6,3 mW	SMD-Chipw.
R_B	1,356 M Ω ✓	1,4 M Ω ✓	6,3 mW	SMD-Chipw.
C_1	$C_1 \gg 1,023 \mu F$	47 μF ✓	16 V ✓	Elko-Alu-fest ✓
C_2	$C_2 \gg 3 \mu F$	1,8 μF ✓	63 V ✓	Kunststoff-Folie (K) ✓

} 0402
-Bauteile

- 2.4. Überlegen Sie, wie man mit Hilfe eines Multimeters mit Widerstandsmeßbereich den Leitungstyp und die Anschlüsse eines unbekanntens Transistors ermitteln kann.
- 2.5. Bereiten Sie auf Millimeterpapier ein Vierquadrantenfeld für die Darstellung der Transistorkennlinien vor. Es empfiehlt sich folgende Teilung der Achsen:

U_{CE} :	$0 V \leq U_{CE} \leq 8 V$	1 V/cm
I_C :	$0 mA \leq I_C \leq 20 mA$	2 mA/cm
I_B :	$0 mA \leq I_B \leq 150 \mu A$	20 $\mu A/cm$
U_{BE} :	$0,4 V \leq U_{BE} \leq 0,8 V$	50 mV/cm

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Aufnahme der Transistorkennlinien

Begrenzen Sie die Stromstärke der Spannungsquelle des Kollektorkreises auf ca. 30 mA.

Dimensionieren Sie den Basisvorwiderstand R_B für die Schaltung nach Bild 2 unter der Annahme $U_1 = 5 V$, $I_B = 100 \mu A$ und $U_{BE} = 0,7 V$. Wählen Sie den am nächsten liegenden vorhandenen Wert.

Berechnen Sie überschlägig anhand des vorgegebenen Koordinatensystems die maximal mögliche Verlustleistung für den Transistor während der Messungen. Entscheiden Sie, ob Maßnahmen zum Schutz des Transistors erforderlich sind, wenn dessen maximale Verlustleistung 300 mW beträgt. Bauen Sie die Schaltung nach Bild 2 auf.

$$R_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{I_B} = \frac{5V - 0,7V}{100 \mu A} = 43 k\Omega \quad \checkmark$$

$$P = I_{CE} \cdot U_{CE} + I_B \cdot U_{BE}$$

$$P = 20 mA \cdot 8V + 150 \mu A \cdot 0,8V$$

$$P = 160,12 mW < 300 mW \rightarrow \text{keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.} \quad \checkmark$$

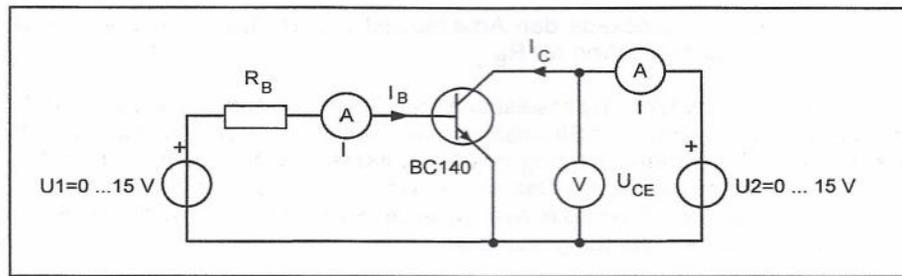


Bild 2: Schaltung zur Aufnahme der Kennlinien

Zur Aufnahme des Ausgangskennlinienfeldes $I_C=f(U_{CE})$ bei verschiedenen Werten von $I_B=const.$ ermitteln Sie 5 Kennlinien. Wählen Sie den Basisstrom jeweils so, daß sich die Kennlinien möglichst gleichmäßig über den vorgegebenen Bereich des Ausgangskennlinienfeldes aufteilen. Dabei sollte zweckmäßig auf einer Kennlinie der Arbeitspunkt ($U_{CE}=6\text{ V}$, $I_C=6\text{ mA}$) liegen, der für die weitere Versuchsdurchführung vorgegeben ist. Zeichnen Sie die ermittelten Kennlinien in das vorbereitete Vierquadrantenfeld ein.

Zur Aufnahme der Eingangskennlinie entfernen Sie das Meßgerät zur Messung von I_C und fügen ein Meßgerät zur Messung von U_{BE} in die Schaltung ein. Messen Sie die Funktion $I_B=f(U_{BE})$ bei $U_{CE}=1\text{ V}$ und $U_{CE}=8\text{ V}$ aus.

Konstruieren Sie aus den vorhandenen Eingangs- und Ausgangskennlinienfeldern die Stromsteuerungskennlinien $I_C=f(I_B)$ bei $U_{CE}=const.$ (1 V und 6 V) und eine Rückwirkungskennlinie $U_{BE}=f(U_{CE})$ bei $I_B=const.$. Bestimmen Sie aus den Kennlinienfeldern die h-Parameter für den Arbeitspunkt $U_{CE}=6\text{ V}$ und $I_C=6\text{ mA}$. Tragen Sie die Werte in die Vierquadrantendarstellung ein. Bestimmen Sie im selben Arbeitspunkt die Gleichstromverstärkung B und vergleichen Sie diese mit h_{21e} . Vergleichen Sie die durch Ihre Messung ermittelten Kennlinien mit den in Punkt 2.2. dargestellten Kennlinien. Interpretieren Sie eventuelle Abweichungen.

Lassen Sie sich als Grundlage für die Vorbereitung des nächsten Praktikumsversuches die ermittelten Kennlinien mit den Werten für die h-Parameter kopieren.

3.2. Dimensionierung und Aufbau einer NF-Verstärkerstufe in Emitterschaltung

Dimensionieren Sie die Schaltung nach Bild 3. Berechnen Sie für den Arbeitspunkt des Transistors bei $U_{CE}=6\text{ V}$ und $I_C=6\text{ mA}$ unter Verwendung der ermittelten Kennlinien die Widerstände R_K und $R_B=R_V+R_2$. Der Vorwiderstand soll $R_1 > 100 \times r_{BE}$ sein, der Eingangswiderstand des Oszilloskops beträgt $1\text{ M}\Omega$.

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 3 auf. Verwenden Sie für R_2 eine Widerstandsdekade und für die übrigen Bauelemente solche Werte, die im Grundsoriment des Praktikumsplatzes vorhanden sind.

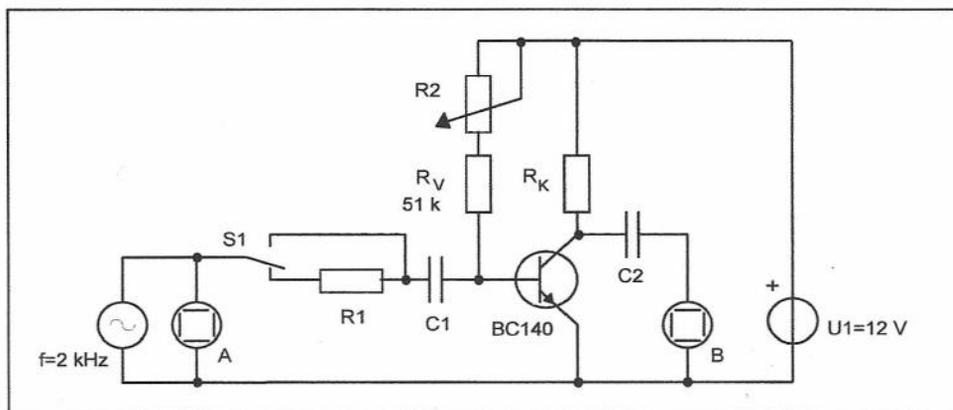


Bild 3: Verstärker in Emitterschaltung

Stellen Sie mit der Widerstandsdekade den Arbeitspunkt des Transistors ein und vergleichen Sie den eingestellten mit dem errechneten Wert für R_B .

Verstärken Sie eine sinusförmige Wechselfspannung. Betreiben Sie dazu den Verstärker einmal mit Spannungssteuerung und einmal mit Stromsteuerung. Stellen Sie den Signalpegel der Eingangsspannung jeweils so ein, daß sich am Ausgang des Verstärkers eine Spannung von $10 V_{SS}$ ergibt. Stellen Sie Eingangs- und Ausgangssignal am Oszilloskop dar und plotten Sie die Darstellung. Interpretieren Sie anhand der Transistorkennlinien die resultierende Kurvenform. Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung der Schaltung bei Spannungssteuerung.

3.3. Bestimmung des Leitungstypes und der Anschlüsse eines unbekanntens Transistors

Bestimmen Sie mit Hilfe eines Multimeters und unter Beachtung der folgenden Hinweise Sperr- und Durchlaßverhalten zwischen den Anschlüssen des Transistors. Notieren Sie die Zuordnung der Transistoranschlüsse für den ausgewählten Transistor. Ermitteln Sie durch Messung der Flußspannung das Halbleitermaterial.

Hinweise zur Bestimmung des unbekanntens Transistors

Mit einer Widerstandsmessung zwischen den Anschlüssen läßt sich eindeutig feststellen, um welchen Leitungstyp es sich handelt und welcher Anschluß der Basis entspricht. Eine sichere Unterscheidung von Kollektor und Emitter ist mit Hilfe einer einfachen Verstärkerschaltung nach Bild 4 möglich.

Zur richtigen Polung der Spannungsquelle ist vorher eine eindeutige Bestimmung des Leitungstypes des Transistors erforderlich. Bei richtigem Anschluß von Kollektor und Emitter muß ein deutlich höherer Stromfluß zu messen sein.

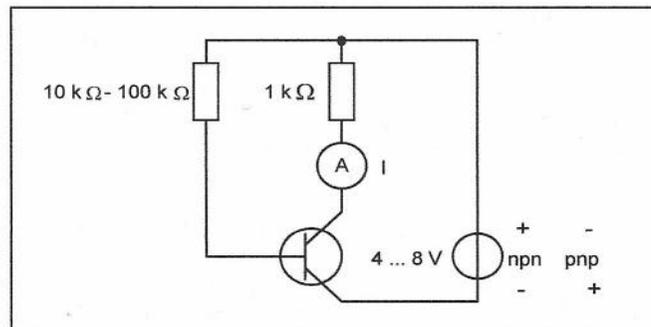
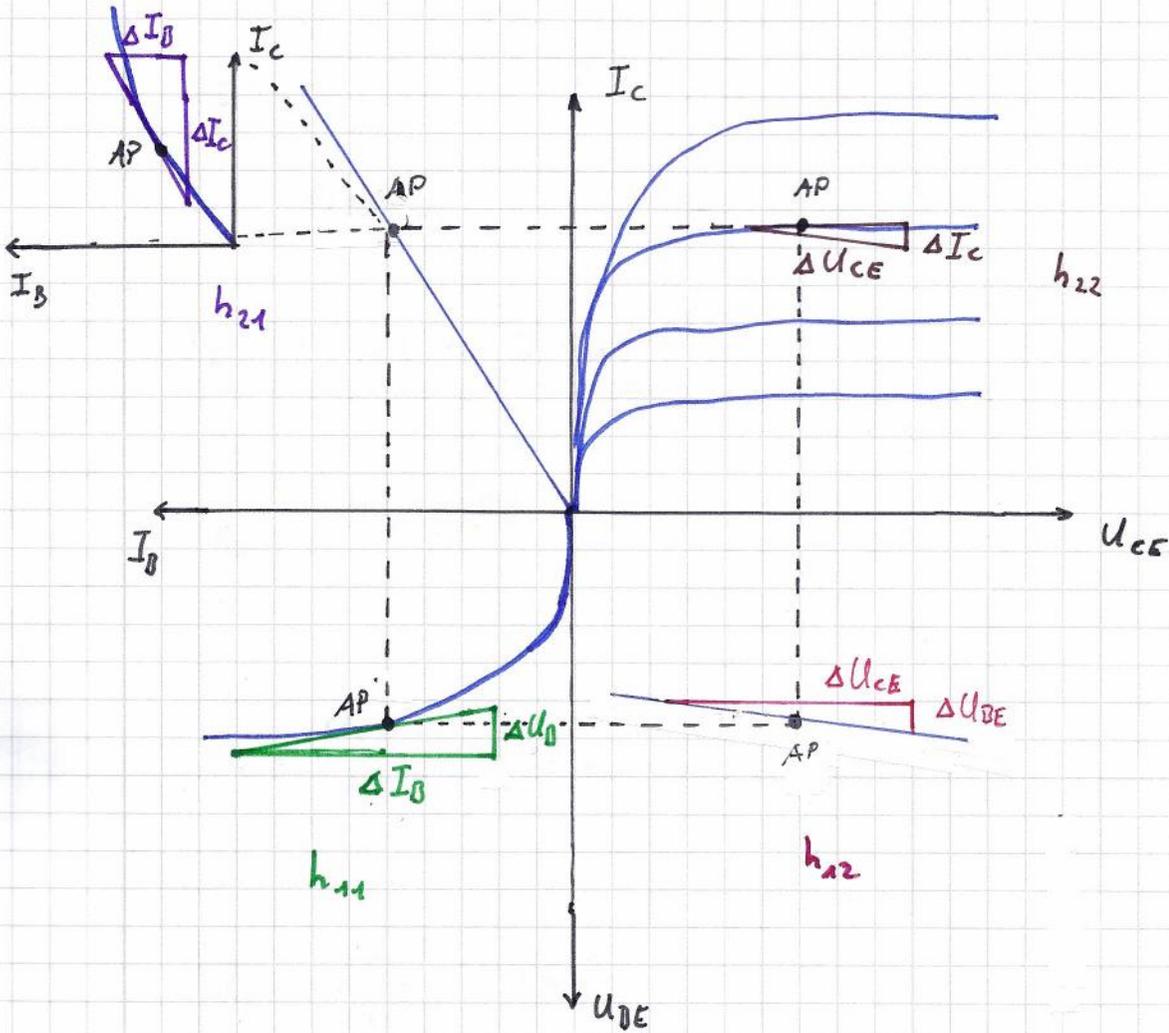


Bild 4: Verstärker zur Bestimmung der Anschlüsse des Transistors

Versuchsverarbeitung

2.2.



$$h_{11} = r_{BE} = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}} \rightarrow \text{differenzielle Eingangswiderstand}$$

$$h_{22} = \frac{1}{r_{CE}} \quad r_{CE} = \left. \frac{dU_{CE}}{dI_C} \right|_{I_{BE} = \text{const}} \rightarrow \text{differenzieller Ausgangswiderstand}$$

$$h_{21} = \beta = \left. \frac{dI_C}{dI_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}} \rightarrow \text{differenzieller Stromverstärkungsfaktor}$$

$$h_{12} = D = \left. \frac{dU_{BE}}{dU_{CE}} \right|_{I_B = \text{const}} \rightarrow \text{differenzieller Rückwirkungsfaktor}$$

2.3.

ausgewählte Parameter: E

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad | \quad \beta \approx \beta$$

$$I_B = \frac{0,001 \text{ A}}{120}$$

$$\underline{I_B = 8,33 \mu\text{A} \approx 8,34 \mu\text{A}} \quad \checkmark$$

$$\underline{R_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{I_B} = 1,355 \text{ M}\Omega} \quad \checkmark$$

$$R_C = \frac{U_{CE}}{I_C} \quad \left| \quad U_{CE} = 0,5 \cdot U_1 = 6 \text{ V} \right.$$

$$\underline{R_C = \frac{6 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 6 \text{ k}\Omega} \quad \checkmark$$

$$C_1 \gg \frac{1}{2\pi f_{\text{min}} (r_q + r_e)}$$

$$r_{OE} = \frac{U_{TH}}{I_C} \cdot \beta \quad U_{TH}(300\text{K}) = 26 \text{ mV}$$

$$\underline{r_{BE} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} \cdot 120 = 3,12 \text{ k}\Omega} \quad \checkmark$$

$$\underline{r_e = r_{OE} \parallel R_D = 3,113 \text{ k}\Omega}$$

$$r_q \ll r_e \quad \leadsto \quad r_q + r_e \approx r_e$$

$$C_1 \gg \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 3,113 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{C_1 \gg 1,023 \mu\text{F}} \quad | \cdot 10 \dots 100$$

$$\underline{10,23 \mu F < C_1 < 102,3 \mu F}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{min} \cdot (r_e + r_a)}$$

$$r_a = V_{CE} // R_C$$

$$V_{CE} = \frac{U_{CE}}{I_C}$$

$$V_{CE} = 6 \text{ kV}$$

$$r_a = 6 \text{ k}\Omega // 6 \text{ k}\Omega$$

$$\underline{r_a = 3 \text{ k}\Omega}$$

$$r_{CE} = \frac{dU_{CE}}{dI_C}$$

$$I_B = 4 \text{ mA}$$

$$\underline{r_e = R_E = 100 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{r_a + r_e = 103 \text{ k}\Omega}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 103 \text{ k}\Omega}$$

$$C_2 = 30,9 \text{ nF} \approx 31 \text{ nF}$$

$$\underline{310 \text{ nF} < C_2 < 3,1 \mu\text{F}} \quad \checkmark$$

R_C nach E24:

$$\underline{R_C = 6,2 \text{ k}\Omega} \quad \checkmark$$

$$I_C = \frac{U_{CE}}{R_C} = \frac{6V}{6,2 \text{ k}\Omega}$$

$$I_C = 0,97 \mu\text{A} \approx 1 \mu\text{A}$$

$$P_D = U_{CE} \cdot I_C = 6V \cdot 1 \mu\text{A}$$

$$\underline{P_D = 6 \mu\text{W}}$$

$$\underline{P_{R_D} > 6 \mu\text{W}} \quad \checkmark$$

→ Chipwiderstand 040210,063W \checkmark

R_B nach E24:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,97 \mu\text{A}}{120} = 8,08\bar{3} \mu\text{A}$$

$$R_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{I_B} = \frac{12V - 0,7V}{8,08\bar{3} \mu\text{A}}$$

$$\underline{R_B = 1397,94 \text{ k}\Omega \approx 1398 \text{ k}\Omega}$$

→ nach E24: $R_B = 1,4 \text{ M}\Omega$ $1,3 \text{ M}$
↳ gibt es nicht in E24!

$$P_B = (U_1 - U_{BE}) \cdot I_B = (12V - 0,7V) \cdot 8,08\bar{3} \mu\text{A}$$

$$\underline{P_B \approx 92 \mu\text{W}}$$

→ SMD-Chipwiderstand 1040210,063W \checkmark

C_1 nach E12:

$$I_{C_{E12}} \approx I_C \rightarrow C_{1E12} = C_1 = 47 \mu F$$

E12 $\approx 10\%$ \rightarrow Aluminiumwicklung

↙
nass

- begrenzte Lebensdauer

↘
fest

lange Lebensdauer

$$U_N = 16 V$$

C_2 nach E12:

$$r_{CE} \parallel R_C = r_a = \frac{6,2 k\Omega \cdot 6 k\Omega}{6,2 k\Omega + 6 k\Omega} = 3,05 k\Omega$$

$$r_a + r_2 = 103,5 k\Omega \approx 103 k\Omega \rightarrow C_{2E12} = C_2$$

$$C_2 = 1,8 \mu F$$

\rightarrow Kunststoff-Folien-Kondensator (KC)

$$U_N = 63 V$$

2.4.

Zur Ermittlung von Kollektor, Emittor und Basis sowie dem Leitungstyp eines Transistors kann in 2 Schritten vorgegangen werden.

Im ersten Schritt wird die Basis und der Leitungstyp ermittelt. Dazu werden die Verbindungen mittels der Widerstandsmessung am Multimeter wie folgt ausgemessen und entsprechend ausgewertet:

1. Festlegen der Kontaktbezeichnungen 1, 2 und 3 für die Kontakte am Transistor.
2. Messung mit Widerstandsmessung des Multimeters von Kontakt zu Kontakt in alle Richtungen und Kombinationen
3. Auswertung mit Hilfe folgender Tabelle:

1→2	2→1	1→3	3→1	2→3	3→2	Basis	Typ
S	D	S	D	S	S	1	PNP
D	S	S	S	S	D	2	PNP
S	S	D	S	D	S	3	PNP
D	S	D	S	S	S	1	NPN
S	D	S	S	D	S	2	NPN
S	S	S	D	S	D	3	NPN

S → gesperrt D → Durchgang

Der zweite Schritt, ist die Ermittlung von Emittier und Kollektor. Dazu kann das Verfahren aus der Versuchsanleitung 3.3. mit der entsprechenden Schaltung (siehe Bild 4 der Versuchsanleitung) verwendet werden.

U _{CE} [V]	I _B [mA]	I _C [mA]	U _{CE} [V]	I _B [mA]	I _C [mA]	U _{CE} [V]	I _B [mA]	I _C [mA]
10	0,1	0,1	10	0,1	0,1	10	0,1	0,1
10	0,2	0,2	10	0,2	0,2	10	0,2	0,2
10	0,3	0,3	10	0,3	0,3	10	0,3	0,3
10	0,4	0,4	10	0,4	0,4	10	0,4	0,4
10	0,5	0,5	10	0,5	0,5	10	0,5	0,5

$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$

3.1. Bestimmung der h-Parameter

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{40 \text{ mV}}{84 \mu\text{A}} = \underline{\underline{476,2 \Omega}} \quad \checkmark$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{10 \text{ mV}}{6 \text{ V}} = \underline{1,67 \cdot 10^{-3}}$$

nicht sinnvoll angesichts der

$$\beta = h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{5 \text{ mA}}{38 \mu\text{A}} \approx \underline{132} \quad \checkmark$$

Kennlinien Verschiebung durch Selbstwärmerung

$$r_{CE} = \frac{1}{h_{22}} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{7 \text{ V} - 5 \text{ V}}{6,09 \text{ mA} - 5,98 \text{ mA}} = \underline{18,2 \Omega^{-1}} \quad \checkmark$$

$$h_{22} = \frac{1}{r_{CE}} = 55 \text{ m}\Omega^{-1} \quad \checkmark$$

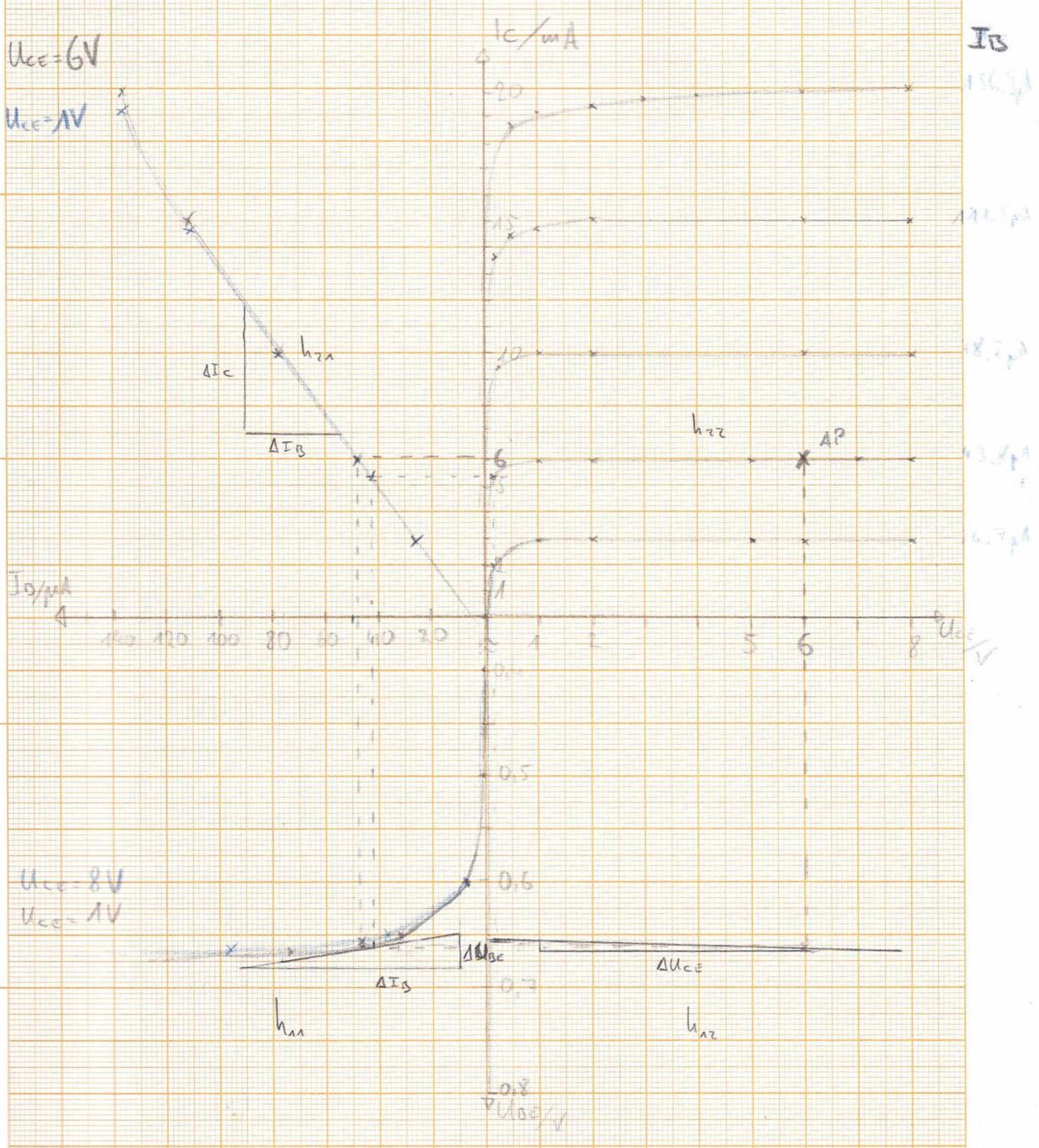
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{6 \text{ mA}}{43,8 \mu\text{A}} \approx 120$$

$$\beta = 132 \approx \beta = 120 \quad \checkmark$$

Die Kennlinien selber sind ähnlich.

Die Abweichungen sind durch Temperaturabweichungen sowie Ungenauigkeiten bei der graphischen Darstellung zu erklären.

3.1.



3.2.

$$R_K = \frac{U_{CE}}{I_C} = \frac{6V}{6\mu A} = 1k\Omega \quad \checkmark$$

$$R_D = \frac{U_1 - U_{BE}}{I_B} = \frac{12V - 0,67V}{49,8\mu A} = 227,51k\Omega \quad \checkmark$$

$$R_2 = R_B - R_V = 227,51k\Omega - 51k\Omega \approx 177k\Omega \quad \checkmark$$

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{40\mu V}{84\mu A} = 476,2\Omega \quad \checkmark$$

$$R_1 > 100 \cdot r_B$$

$$R_1 > 48k\Omega \quad \checkmark$$

$$R_{B \text{ eingest.}} = 173k\Omega$$

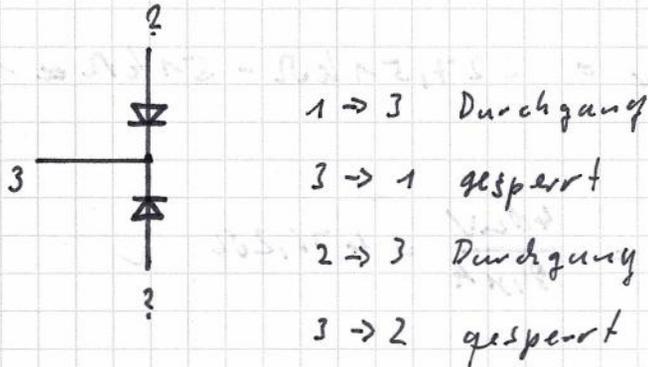
$$R_{B \text{ eing.}} \approx R_2$$

$$173k\Omega \approx 177k\Omega \quad \checkmark$$

3.3.

Messobjekt Nr. 10

Kontakte	1 → 2	2 → 1	1 → 3	3 → 1	2 → 3	3 → 2
R/Ω	1,2	4,7	1	-	0,3	-
	S	S	D	S	D	S



Mit den ermittelten Werten und der Tabelle aus der Versuchsvorbereitung lässt sich ermitteln, dass es sich um einen $p-n-p$ Transistor mit der Basis am Kontakt 3 handelt. ✓

$$2+ \text{ und } 1- \rightarrow I_{c1} = 0,5 \text{ mA}$$

$$1+ \text{ und } 2- \rightarrow I_{c2} = 5,9 \text{ mA}$$

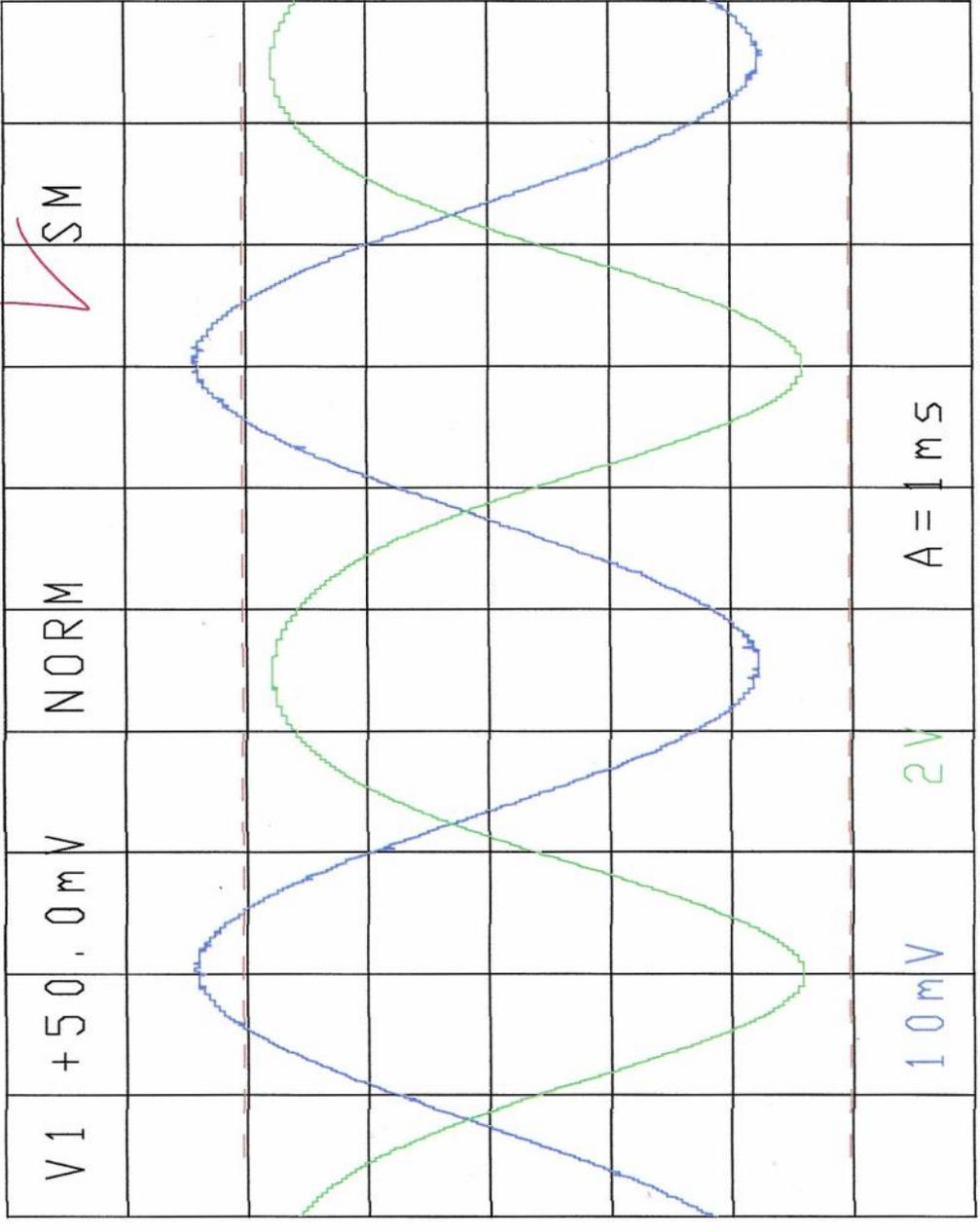
$I_{c2} > I_{c1} \rightarrow$ Emittor liegt am Kontakt 1 und Kollektor am Kontakt 2. ✓

Gemäß gemessener Durchflussspannung lässt sich auf Germanium schließen.

3.2.

Spannungsteilung - Stromkreislauf - Messung

Spannungsteilung



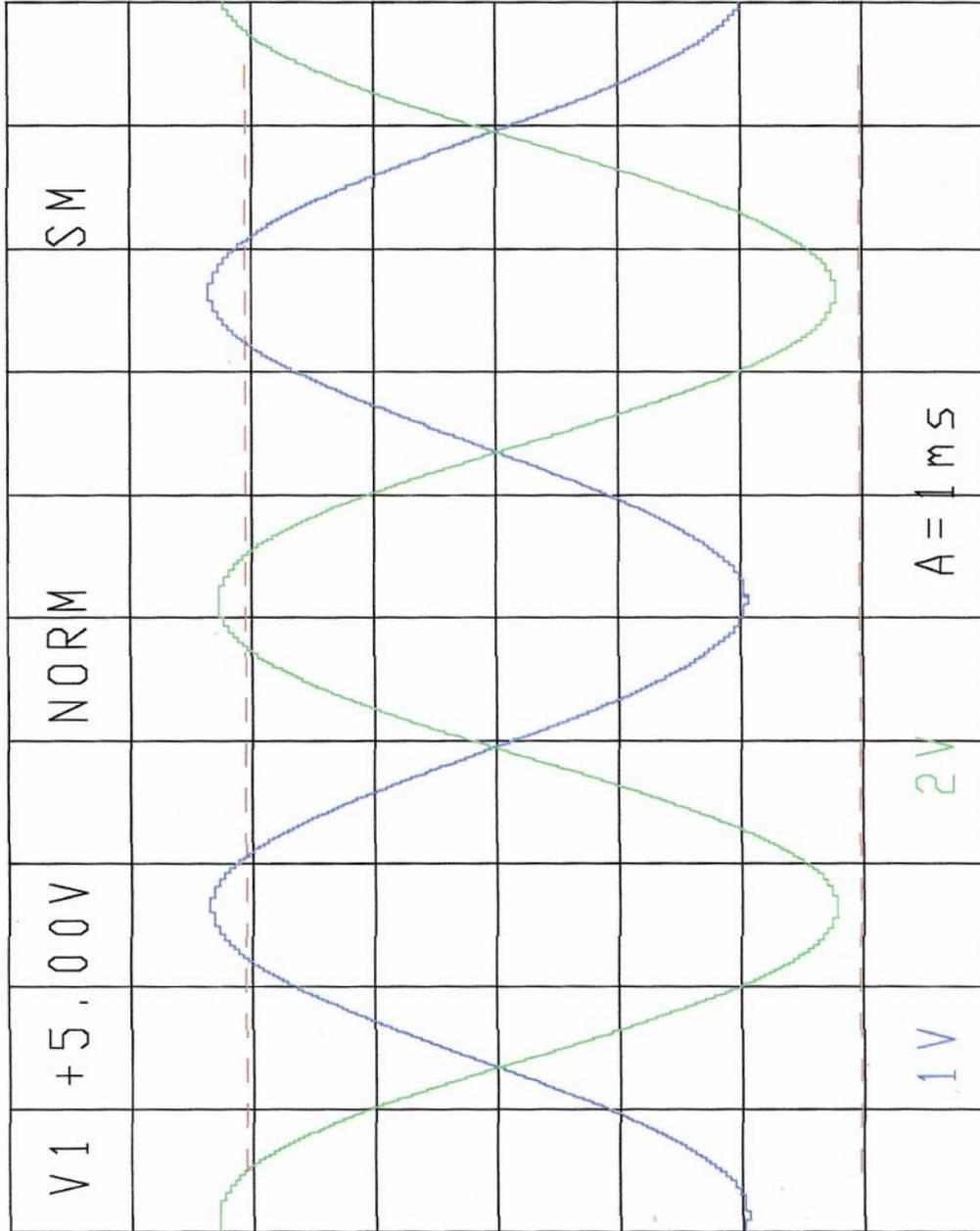
$$U_{\text{eff}} = 45,6 \text{ mV}$$

$$U_{\text{ass}} = 8,8 \text{ V}$$

$$\frac{U_{\text{ass}}}{U_{\text{eff}}} = \frac{8,8 \text{ V}}{45,6 \text{ mV}} \approx 193$$

3.2. Spannungsteuerung - Spannungs- Messung

Spannungsteuerung



$$U_{e_{ss}} = 4,4V$$

$$U_{u_{ss}} = 10,08V$$

