

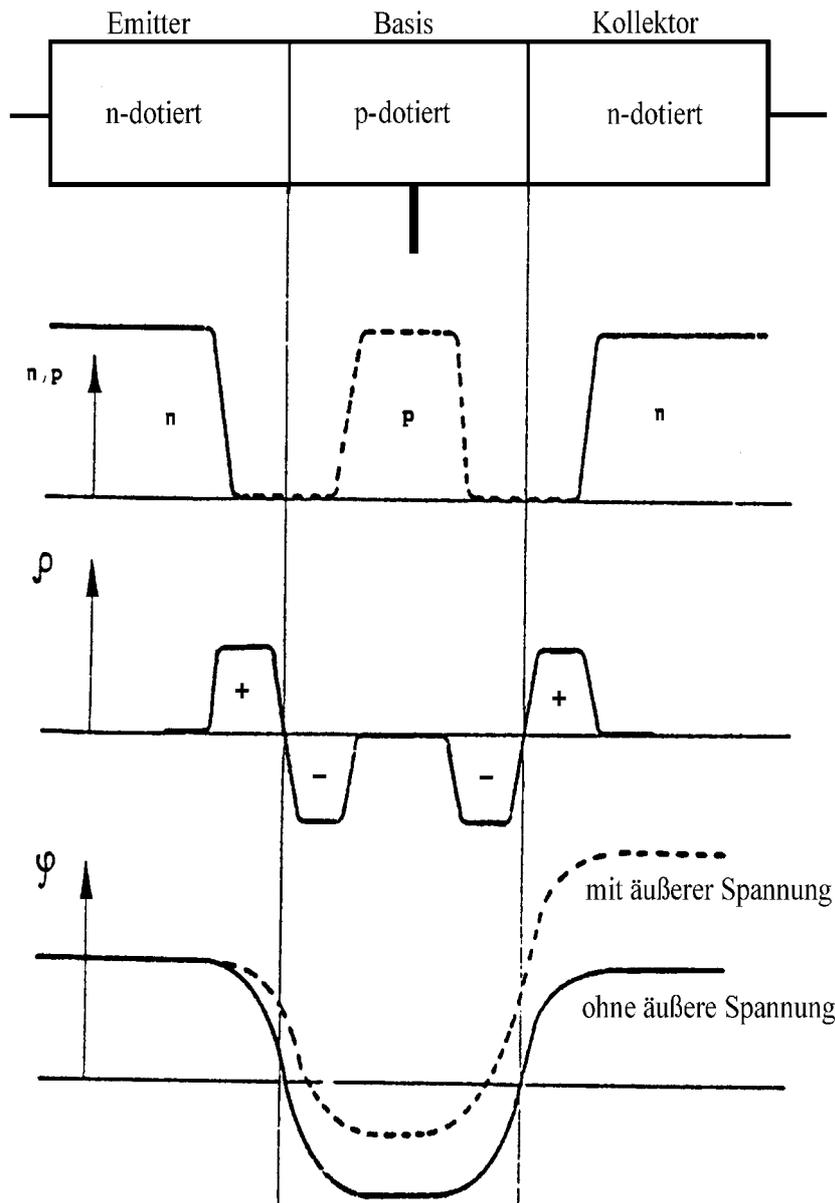
DER TRANSISTOR

Aufgaben:	Aufnahme der Kennlinien in Emitterschaltung; Aufbau einer einfachen Verstärkerstufe und Messung der Spannungsverstärkung
Begriffe:	Transistor, Kennlinien, Widerstandsgerade, Arbeitspunkt, h-Parameter, Verstärkungsfaktor
Meßverfahren:	Kennlinienaufnahme mit XY-Schreiber, Ansteuerung mit Frequenzgenerator, Spannungsmessung mit Zweikanal-Oszillograph
Theorie:	Wirkungsweise des Transistors, Beziehungen zwischen Kennlinien, Auswirkung eines Widerstandes im Kollektorkreis, Spannungsverstärkung.

1. Aufbau und Wirkungsweise des Flächentransistors

Der Transistor stellt die Erweiterung der Halbleiterdiode zur Halbleitertriode dar. Er besteht aus einem Germanium- oder Siliziumkristall, der drei aufeinanderfolgende, abwechselnd positiv und negativ dotierte Zonen enthält. Die beiden äußeren Zonen sind jeweils vom gleichen Typ. Es gibt zwei Möglichkeiten der Zonenfolge: pnp und npn. Die mittlere Zone heißt Basis (B), die äußeren Zonen werden als Emitter (E) und Kollektor (C) bezeichnet. Die Basis ist eine Schicht von nur geringer Dicke ($10 - 50 \mu\text{m}$). Der Emitter ist stark, der Kollektor schwächer und die Basis nur sehr schwach dotiert, Der Transistor besitzt damit zwei pn-Übergänge, den einen zwischen Emitter und Basis, den anderen zwischen Basis und Kollektor; er besteht also aus zwei Halbleiterdioden, der Emitterdiode und der Kollektordiode, die gegensinnig gepolt sind. Überträgt man die Ergebnisse der Betrachtung des einzelnen pn-Überganges auf den Transistor, so sieht man unmittelbar, dass sich durch Hintereinanderschaltung z.B. eines np- und eines pn-Überganges ein Potentialverlauf wie in Abb. 1 ergibt. In der Basisschicht entsteht ein Potentialminimum, das von den Elektronen in Emitter und Kollektor ohne Anlegen eines äußeren Feldes nicht überwunden werden kann. In der Abbildung ist dabei der Einfachheit halber angenommen, dass alle Zonen gleich stark dotiert und gleich breit sind.

Legt man an einen npn-Transistor Spannungen gemäß Abb. 2 an, so ist die Basis-Emitter-Diode in Durchlassrichtung gepolt, die Basis-Kollektor-Diode dagegen gesperrt. Vom Emitter fließen Elektronen in die Basis, wegen der schwachen Dotierung der Basis jedoch praktisch keine Löcher in umgekehrter Richtung. Nur ein geringer Anteil der vom Emitter in die Basis injizierten Elektronen verläßt diese durch den Basisanschluß; auch die Rekombination ist wegen der schwachen Dotierung der Basis sehr gering. Die meisten Elektronen diffundieren durch die dünne Basisschicht hindurch bis in die Nähe des Kollektors und geraten so in das Potentialgefälle der Basis-Kollektor-Diode, d.h. der Kollektor "saugt" die Elektronen aus der Basis an. Im npn-Transistor wird der Strom also im wesentlichen von den Elektronen getragen, im pnp-Transistor umgekehrt von den Löchern. Die Funktion des Transistors kann wegen der geringen Dicke und der schwachen Dotierung der Basis nicht einfach mit der von zwei getrennten gegensinnig gepolten Dioden gleichgesetzt werden. Der

**Abb. 1:***n*p*n*-Transistor

(schematisch, alle Zonen gleich stark dotiert, Basis im Verhältnis zu breit gezeichnet);

bis auf die bezeichnete Kurve ohne äußere Spannung.

n, p Elektronen- bzw. Löcherdichte,
 ρ Raumladungsdichte,
 φ Potential.

Die Kurve "mit äußerer Spannung" bezieht sich auf normale Betriebsspannungen (siehe Abb.2).

Strom, der vom Emitter ausgeht, verzweigt sich vielmehr: der kleinere Anteil fließt zum Basisanschluß, der Hauptstrom zum Kollektor. Die große Bedeutung des Transistors liegt - ähnlich wie bei der Vakuumtriode - darin, dass man mit Hilfe des Basis-Emitterkreises den Kollektorstrom steuern kann. Transistoren für geringe und große Leistung, für niedrige und hohe Frequenzen haben heute die Elektronenröhre in den meisten ihrer Anwendungen als Verstärker und Schalter verdrängt. Im Gegensatz zur Elektronenröhre ist beim Flächentransistor die Steuerung jedoch nicht leistungslos, da sie einen wenn auch kleinen Strom im Basis-Emitterkreis erfordert. Ein leistungslos zu steuerndes Halbleiterbauelement ist der Feldeffekttransistor.

2. Grundschaltungen

Man unterscheidet drei verschiedene Transistorgrundschaltungen nach den drei Möglichkeiten, einen der drei Anschlüsse als gemeinsamen Pol für die Spannungen zu wählen: Basis-, Emitter- und Kollektorschaltung (s. Abb. 2).

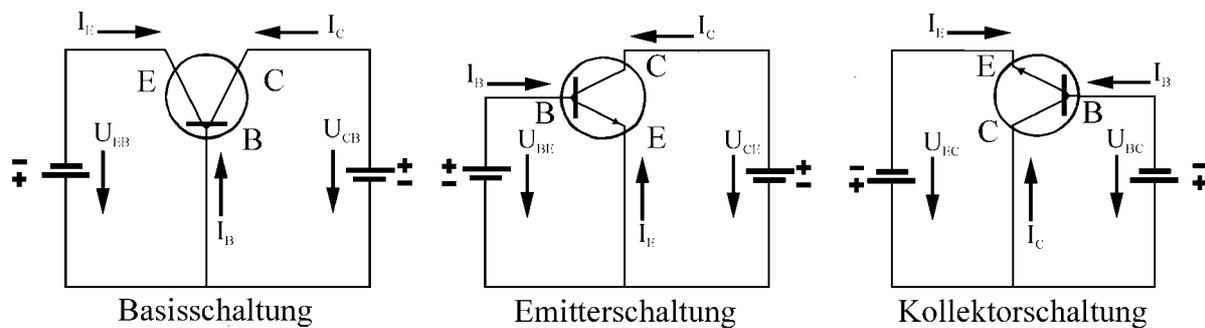


Abb. 2: Grundschaltungen des npn-Transistors (U_{EB} in der Größenordnung mV, U_{CB} in der Größenordnung V). Bei pnp-Transistoren sind alle Spannungen umzukehren.

Bezüglich der Vorzeichen gelten folgende Konventionen: Alle Ströme positiver Ladungsträger werden positiv gerechnet, wenn sie zum Transistor hinfließen, der Index gibt den betreffenden Anschluß an.

Damit gilt:

$$I_E + I_B + I_C = 0 \tag{1}$$

Die Spannungen werden mit Doppelindex versehen, der erste Buchstabe bezeichnet dabei den Anschluß, von dem der Zählpfeil ausgeht (U_{ik} ist positiv, wenn das Potential der Elektrode i positiv ist gegenüber dem der Elektrode k). Daraus folgt: $U_{ik} = -U_{ki}$. Zwischen den drei Spannungen am Transistor gilt also die Beziehung:

$$U_{CE} = U_{BE} + U_{CB} \tag{2}$$

Bezeichnet A den Bruchteil des Emitterstromes, der vom Kollektor aufgenommen wird (vergl. Abschn.1), so gilt:

$$I_C = -A I_E + I_{CBO} \quad , \quad I_B = -(1 - A) I_E - I_{CBO} \tag{3}$$

I_{CBO} ist der Kollektorreststrom, der Sperrstrom der Kollektor Basis-Diode, der bei offenem Emitteranschluß ($I_E = 0$) fließt (der Anteil des Kollektor-Basis-Sperrstromes, der zum Emitter diffundiert, kann hier vernachlässigt werden). Man nennt A die "Gleichstromverstärkung in Basisschaltung". Bei modernen Transistoren liegt A in der Gegend von 0.99; I_{CBO} ist extrem klein. Aus (3) folgt durch Elimination von I_E :

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{A}{1 - A} \cdot I_B + \frac{1}{1 - A} \cdot I_{CBO} \\ &= B \cdot I_B + (1 + B) I_{CBO} \end{aligned} \tag{4}$$

$B = A/(1 - A)$ bezeichnet man als "Gleichstromverstärkung in Emitterschaltung". Da A nur wenig kleiner als 1 ist, ist B eine große Zahl und nimmt bei modernen Transistoren Werte zwischen 100 und 500 an. Die Stromverstärkungsfaktoren A und B sind nicht im gesamten Arbeitsbereich des Transistors konstant; sie nehmen mit zunehmendem Kollektorstrom ab und werden mit wachsender Kollektor-Basisspannung größer.

3. Kennlinien

Bei der Röhrentriode gibt es im Prinzip vier Betriebsgrößen, die drei Spannungen zwischen den Elektroden und den Anodenstrom (Gitterstrom gleich Null angenommen). Auf Grund der Summenbeziehung zwischen den Spannungen ist der Zustand einer Triode jedoch bereits durch die Angabe der drei Größen U_g , U_a , I_a , eindeutig gekennzeichnet. Das Betriebsverhalten der Triode wird mathematisch also durch eine einzelne Funktion zweier unabhängiger Variablen wiedergegeben, die in einem einzigen Kennlinienfeld dargestellt werden kann, z.B. in der Form $I_a = f(U_a)$ mit U_g als Parameter; durch einfaches Umzeichnen erhält man hieraus das inhaltlich gleichwertige Diagramm $I_a = f(U)$ mit U_a als Parameter.

Beim Transistor gibt es im Prinzip sechs Größen, die drei Spannungen und die drei Ströme, Aufgrund der Summenbeziehungen (1) und (2) ist jedoch der Zustand eines Transistors bereits durch Angabe von vier Größen, zwei Spannungen und zwei Strömen, z.B. U_{BE} , U_{CE} , I_B , I_C festgelegt. Zur Beschreibung seines Betriebsverhaltens sind mathematisch hier zwei Funktionen der beiden gleichen unabhängigen Variablen erforderlich, zur graphischen Darstellung benötigt man entsprechend zwei inhaltlich verschiedene Kennlinienfelder. (Grundsätzlich ist es dabei gleichgültig, welche beiden der vier Größen als unabhängige Variable genommen werden und welche als abhängige Variable.)

In der Praxis fasst man den Transistor in seiner jeweiligen Schaltung, z.B. Emitterschaltung, als Vierpol mit zwei Eingangsgrößen (Eingangsstrom und -spannung) und zwei Ausgangsgrößen (Ausgangsstrom und -spannung) auf und benutzt für die Kennlinien Eingangsstrom und Ausgangsspannung als unabhängige Variable, Ausgangstrom und Eingangsspannung als abhängige Größen.

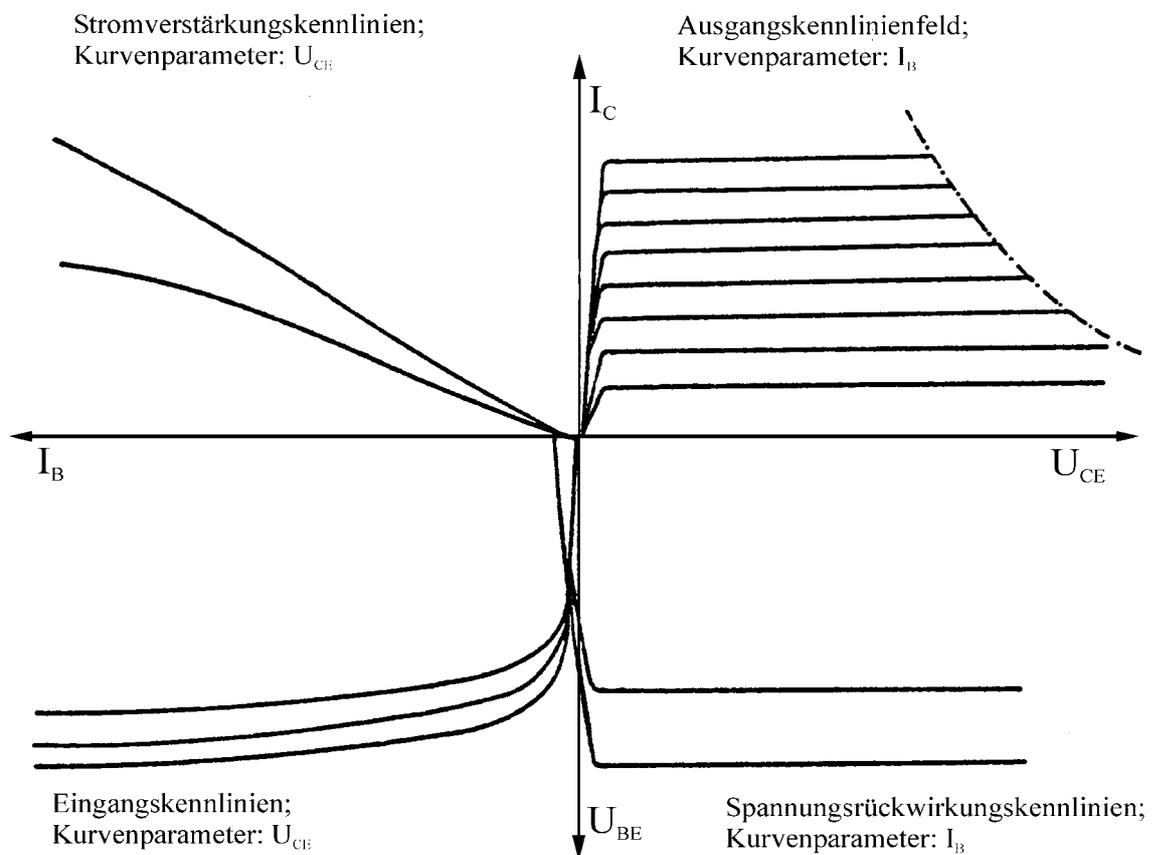


Abb. 3: Vierfachkennlinienfeld eines npn-Transistors in Emitterschaltung

Abb.3 zeigt schematisch ein solches vierfaches Kennlinienfeld für die Emitterschaltung. Damit stellt man die Kennlinien in vier Quadranten folgendermaßen dar:

1. Quadrant: Ausgangskennlinien mit Eingangstrom als Parameter;
2. Quadrant: Stromverstärkungskennlinien mit Ausgangsspannung als Parameter;
3. Quadrant: Eingangskennlinien mit Ausgangsspannung als Parameter;
4. Quadrant: Spannungsrückwirkungskennlinien mit Eingangstrom als Parameter;

Die Kennlinienfelder des 1. und 2. Quadranten können dabei durch Umzeichnen auseinander hergeleitet werden, sie sind inhaltlich gleichwertig; das gleiche gilt für den 3. und 4. Quadranten. Die Diagramme der oberen und unteren Halbebene jedoch sind inhaltlich verschieden, sie geben die beiden verschiedenen funktionalen Abhängigkeiten wieder, die zur Beschreibung des Transistorverhaltens erforderlich sind. Im 1. Quadranten ist noch die sogenannte Verlustleistungshyperbel $I_C = f(U_{CE})$ für konstante Kollektorverlustleistung $I_C U_{CE}$ eingezeichnet, die bei der Kennlinienaufnahme bzw. beim Betrieb des Transistors nicht überschritten werden darf, um den Transistor vor Überhitzung und damit vor der Zerstörung zu bewahren. - Ein analoges vierfaches Kennlinienfeld wird auch für die Basisschaltung verwendet.

4. Kleinsignalverhalten, h-Matrix

Nach dem Vorangegangenen lässt sich das Verhalten eines Transistors durch zwei Funktionen zweier unabhängiger Variablen beschreiben. In der Praxis wählt man meist die erwähnte Hybridform, bei der Eingangs- und Ausgangsgrößen gemischt auftreten:

$$U_1 = f_1(I_1, U_2) \quad , \quad I_2 = f_2(I_1, U_2) \quad (5)$$

Für kleine Bereiche des Kennlinienfeldes gilt dann:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial f_1}{\partial U_2} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial f_2}{\partial U_2} \Delta U_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Setzt man nun $\Delta U_1 = u_1$, $\Delta U_2 = u_2$, $\Delta I_1 = i_1$, $\Delta I_2 = i_2$, d.h. bezeichnet man die Abweichungen von dem eingestellten Arbeitspunkt, die eigentlichen Signale bei Wechselstromschaltungen, mit kleinen Buchstaben, so kann man die Gleichungen (6) in der Form schreiben:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \quad \text{bzw.} \quad \begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Die partiellen Ableitungen von f_1 und f_2 sind dabei der Reihe nach mit h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} abgekürzt. Bei kleiner Aussteuerung um den Arbeitspunkt kann das Verhalten des Transistors also durch ein System zweier linearer Gleichungen mit den beiden unabhängigen Variablen i und u und den konstanten Koeffizienten $h_{i k}$ beschrieben werden. Die Gleichungen (7) sind eine oft benutzte Form der Vierpolgleichungen des Transistors. Für Wechselströme mit nicht

zu hoher Frequenz sind im Sinn der komplexen Wechselstromrechnung bei gleichbleibenden reellen h_{ik} die komplexen Ströme und Spannungen einzusetzen, bei höheren Frequenzen werden die h_{ik} selbst komplex.

Die Koeffizienten h_{ik} , die sogenannten h-Parameter, sind für die Emitterschaltung aus dem Vierfach-Kennlinienfeld der Abb.3 als Differentialquotienten im jeweiligen Arbeitspunkt zu entnehmen:

$$h_{11} = \left(\frac{\delta U_{BE}}{\delta I_B} \right) / U_{CE} = const.$$

aus dem 3. Quadranten;
Eingangswiderstand.

$$h_{12} = \left(\frac{\delta U_{BE}}{\delta U_{CE}} \right) / I_B = const.$$

aus dem 4. Quadranten;
Spannungsrückwirkung.

$$h_{21} = \left(\frac{\delta I_C}{\delta I_B} \right) / U_{CE} = const.$$

aus dem 2. Quadranten;
Kleinsignal-Stromverstärkung.

$$h_{22} = \left(\frac{\delta I_C}{\delta U_{CE}} \right) / I_B = const.$$

aus dem 1. Quadranten;
Ausgangsleitwert.

Die genannten physikalischen Bedeutungen der h_{ik} sind sämtlich differentiell gemeint und haben nur einen Sinn für Konstanz der jeweiligen zweiten unabhängigen Variablen. Sie gelten nur für den Transistor selbst (sog. "innere" Größen), davon zu unterscheiden sind die Daten ganzer Schaltungsaufbauten wie Verstärkerstufen und dergleichen (Eingangswiderstand, Verstärkungsfaktor usw.).

Die oben angegebene explizite Darstellung der h-Parameter als Differentialquotienten nach I_B und U_{CE} bezieht sich auf die Emitterschaltung; für die anderen Grundschaltungen der Abb.2 sind die h-Parameter entsprechend mit Eingangsstrom und Ausgangsspannung definiert, haben aber natürlich andere Werte.

5. Aufgaben, Durchführung

- 1.) Aufbau der Emitterschaltung nach Abb. 4 mit XY-Schreiber zur Aufnahme der Kennlinien. Man benutze dabei die vorliegende Experimentierschaltung. Koordinatenkreuz durch Verstellen der Nullpunktregler des Schreibers zeichnen und mit Meßinstrumenten kalibrieren. Eintragen der bei dem Versuch angegebenen Grenzwerte für U_{CE} , I_C , I_B , U_{BE} und der Kollektorverlustleistungshyperbel in das Koordinatensystem. Aufnahme der Kennlinien im 1. und 3. Quadranten unterhalb der eingezeichneten Grenzwerte mit dem Schreiber, zweckmäßigerweise jeweils beginnend bei großen Werten.

Aufnahme der Kennlinien im 1. Quadranten: Schreiberanschlüsse X_1 , Y_1 ; Netzteil I als Konstantstromquelle, Netzteil II als variable Spannungsquelle. Aufnahme der Kennlinien im 3. Quadranten: Schreiberanschlüsse X_3 , Y_3 ; Netzteil I als variable Spannungsquelle, Netzteil II als Konstantspannungsquelle.

- 2.) Konstruktion zweier Stromverstärkungskennlinien für zwei Parameter U_{CE} im 2. Quadranten aus dem Kennlinienfeld des 1. Quadranten; entsprechend Konstruktion zweier Spannungsrückwirkungskennlinien für zwei Parameter I_B im 4. Quadranten aus dem Kennlinienfeld des 3. Quadranten.
- 3.) Einzeichnen der Widerstandsgeraden für die beiliegend angegebenen Werte von Arbeitswiderstand und Batteriespannung.

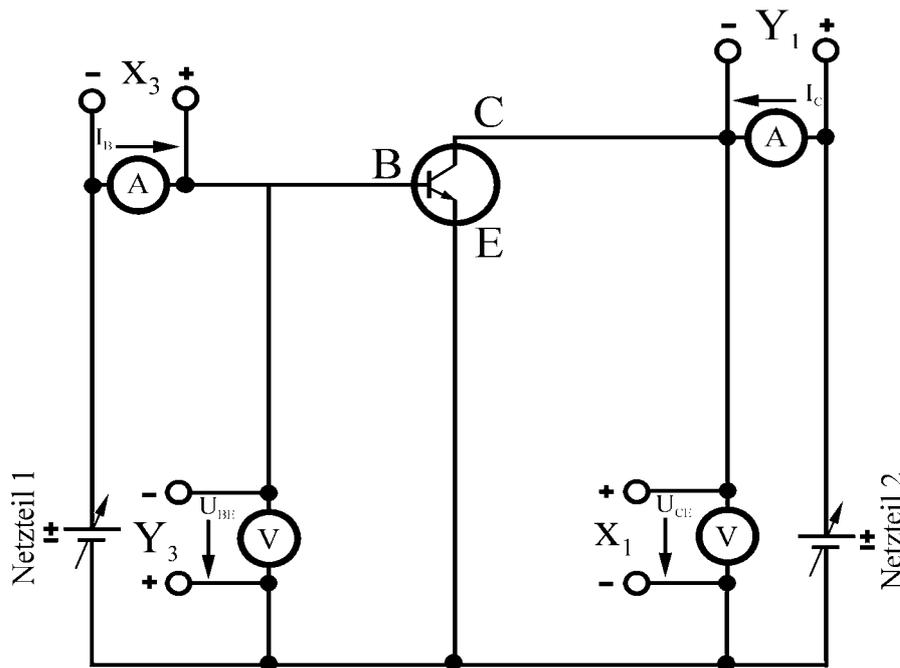


Abb 4:

Emitterschaltung zur Aufnahme der Kennlinien entsprechend Abb.3. Mit $\pm X$ und $\pm Y$ sind die entsprechenden Anschlüsse des Schreibers bezeichnet. Der Stromverbrauch der Meßinstrumente kann wegen ihres großen Innenwiderstandes ($31,6 \text{ k}\Omega/V$) bei der hier erforderlichen Genauigkeit vernachlässigt werden.

Eintragen des Arbeitspunktes für den angegebenen Basisstrom in die vier Quadranten; Bestimmung der h-Parameter im Arbeitspunkt.

- 4.) Messung der Verstärkung gemäß Abb. 5.
- 5.) Vergleich des gemessenen Spannungsverhältnisses an Ausgang und Eingang mit der Formel für die Spannungsverstärkung:

$$v_u = - \frac{h_{21} \cdot R_a}{h_{11} + h_{11} \cdot h_{22} \cdot R_a} \quad (8)$$

Der im Versuch verwendete Transistor ist ein npn-Leistungstransistor vom Typ 2N3055.

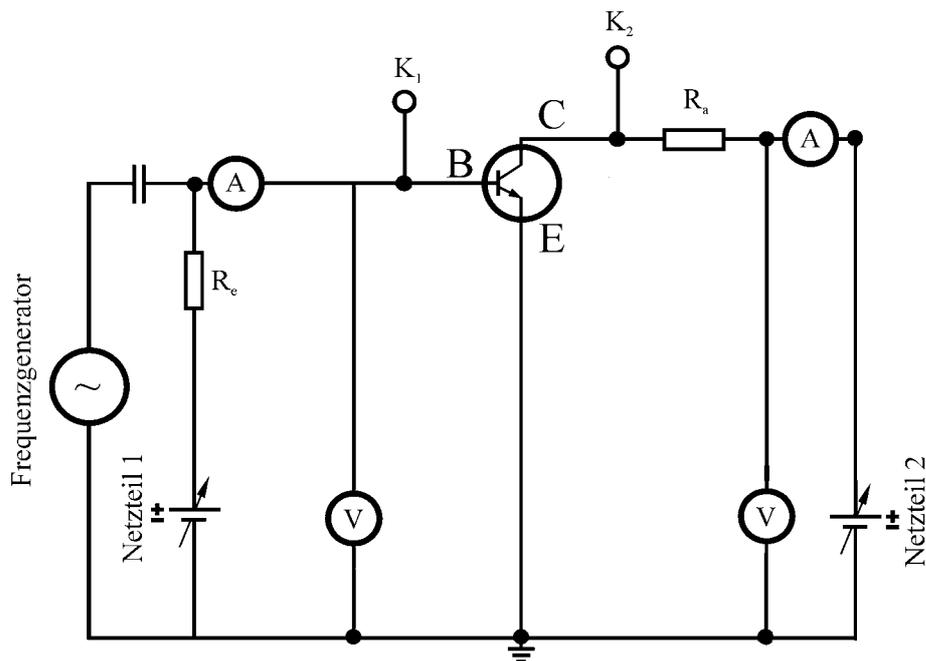


Abb.5: Verstärkerstufe in Emitterschaltung.

K_1 und K_2 bezeichnen die beiden Signaleingänge des Oszillographen. Die Instrumente dienen der vollständigen Kontrolle des Arbeitspunktes entsprechend Abb.4; zur Einstellung des Arbeitspunktes genügen das Amperemeter im Basiskreis und das Voltmeter im Kollektorkreis. Der Kondensator vor dem Frequenzgenerator trennt diesen gleichspannungsmäßig von der Schaltung ab, der Widerstand R_e verhindert den Zusammenbruch der Spannung am Ausgang des Frequenzgenerators bei wechselstrommäßigem Kurzschluß. Der Arbeitspunkt ändert sich nicht bei An- oder Abschalten des Generators; die Wechselspannung darf dabei nur eine Änderung des Basisstromes im linearen Teil der Eingangskennlinie bewirken (Unabhängigkeit von Gleich-Vorspannung und Kleinsignal-Wechselspannung).

Die Grenzdaten lauten:

<u>technisch:</u>		<u>im Versuch:</u>
UCE MaX:	60 V,	10 V
UBE MaX:	7 V,	1 V
Ic max:	15 A,	0,2 A
IB max:	1 A,	1,8 mA
P _{tot} :		8 W