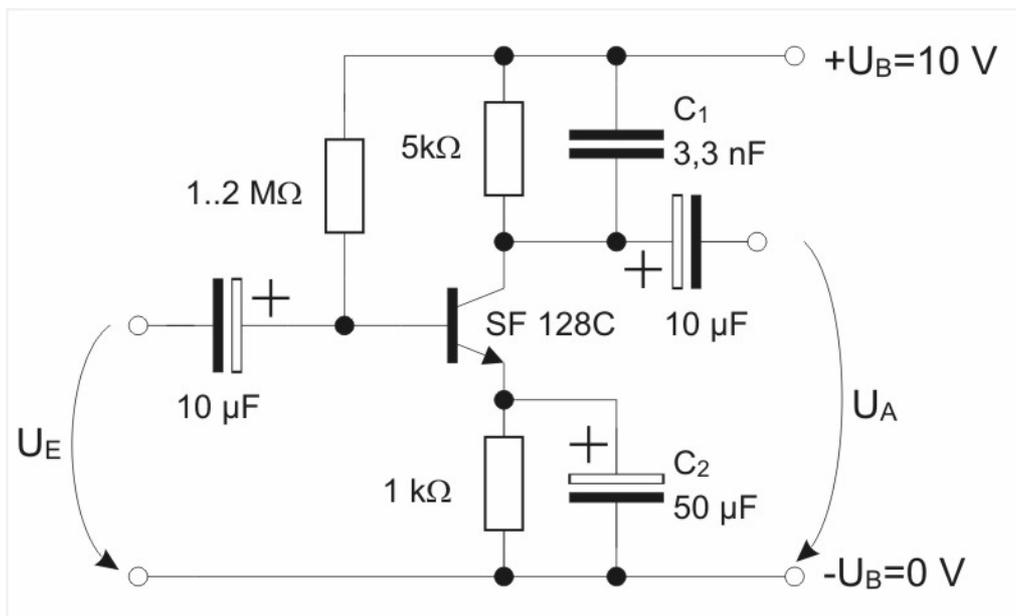


# Versuch 305

## Transistorverstärker

### 1. Aufgaben

1.1 Bauen Sie einen einstufigen Verstärker mit einem n-p-n-Transistor nach folgender Schaltung auf!



1.2 Bestimmen Sie die größte unverzerrt verstärkte Eingangsschwingung bei einer Messfrequenz von 1 kHz und legen Sie eine zur Verstärkungsmessung geeignete Eingangsspannung  $U_E$  fest.

1.3 Messen Sie die Verstärkung und die Phasendrehung des Verstärkers als Funktion der Frequenz im Intervall von 20 Hz bis 20 kHz (ca. 3 Messpunkte je Dekade) für die folgenden beiden Fälle:

- nach obiger Schaltung
- ohne die Kondensatoren C1 und C2

1.4 Werten Sie die Messergebnisse aus und stellen Sie den Amplitudengang des Verstärkers auf doppeltlogarithmischem Papier und den Frequenzgang auf halblogarithmischem Papier dar. Ermitteln Sie die Grenzfrequenzen! Schätzen Sie die relativen Fehler für die Verstärkung und die Phasendrehung ab.

## 2. Literatur

/3/ Mende, /13/ Studienbücherei, /22/ Rumpf

## 3. Grundlagen

### 3.1 Verstärker

Ein Verstärker ist ein elektronisches Gerät, welches den am Eingang des Verstärkers anliegenden zeitlichen Signalverlauf  $U_E(t)$  mit einer um die Verstärkung  $V$  vergrößerten Amplitude  $U_A(t)$  am Ausgang wieder abgibt (Bild1). Die Energiezufuhr, die die Amplitudenvergrößerung (Verstärkung) ermöglicht, erfolgt über die beiden Betriebsspannungsanschlüsse  $U_B$ . Für den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung gilt:

$$U_A = V(f) \cdot U_E$$

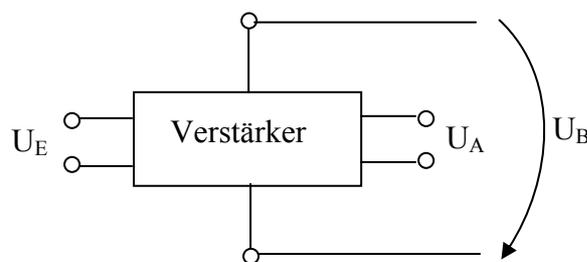


Bild 1: Spannungsverstärker:  $U_E$  - Eingangsspannung,  $U_A$  - Ausgangsspannung,  $U_B$  - Betriebsspannung

#### 3.1.1 Amplitudengang

Die Verstärkung  $V$  ist bei jedem Verstärker frequenzabhängig. Um einschätzen zu können, ob ein Verstärker zur Verstärkung von Signalen in einem bestimmten Frequenzbereich geeignet ist, muss die Funktion  $V(f)$  (Amplitudengang) des Verstärkers bekannt sein. Wechselspannungsverstärker besitzen einen Verstärkungsabfall bei niedrigen und bei hohen Frequenzen (Bild 2a).

Ein Gleichspannungsverstärker besitzt keinen Verstärkungsabfall für  $f \rightarrow 0$ ; die Verstärkung fällt lediglich bei hohen Frequenzen ab (Bild 2b)

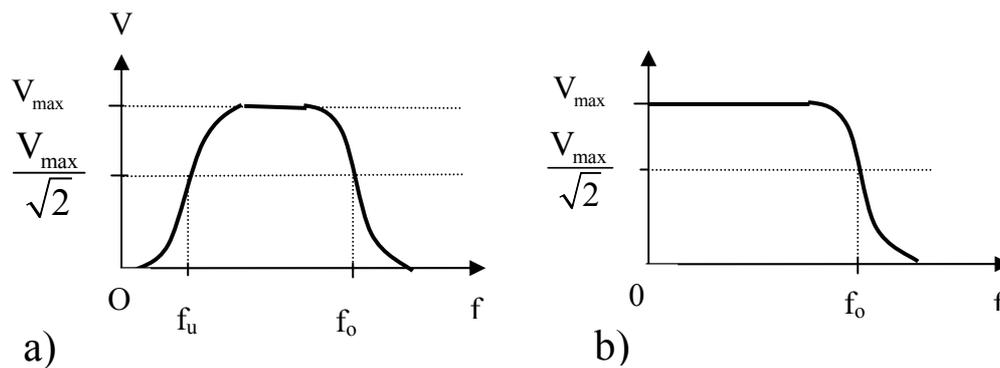


Bild 2: Verstärkung  $V$  als Funktion der Frequenz  $f$ :

- a) Wechselspannungsverstärkung
- b) Gleichspannungsverstärkung

Die Frequenzen, bei denen die Verstärkung auf den Wert  $V_{\max} / \sqrt{2}$  abgesunken ist, bezeichnet man als untere Grenzfrequenz  $f_u$  bzw. als obere Grenzfrequenz  $f_0$ . Die Bandbreite  $\Delta f$  des Verstärkers ergibt sich aus der Differenz

$$\Delta f = f_0 - f_u$$

### 3.1.2 Phasengang

Bisher wurde nur der Betrag der Verstärkung betrachtet. Im allgemeinen tritt jedoch eine Phasendifferenz  $\varphi$  zwischen Aus- und Eingangsspannung auf; es gilt also

$$U_E = \hat{U}_E \cos(\Omega \cdot t + \varphi_1)$$

$$U_A = \hat{U}_A \cos(\Omega \cdot t + \varphi_2)$$

mit  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

Die Phasendrehung  $\varphi$  des Verstärkers ist frequenzabhängig (Phasengang). Insbesondere in der Nähe der Grenzfrequenzen ist dieser Effekt stark ausgeprägt. Verstärker, deren Phasendrehung im Bereich des Verstärkungsmaximums  $\pi$  beträgt, werden als *invertierende Verstärker*, solche mit Phasendrehung Null als *nichtinvertierende Verstärker* bezeichnet (Bild 3). Ein Anwachsen der Eingangsspannung bewirkt also bei einem invertierenden Verstärker einen um den Faktor  $V$  größeren *Abfall* der Ausgangsspannung.

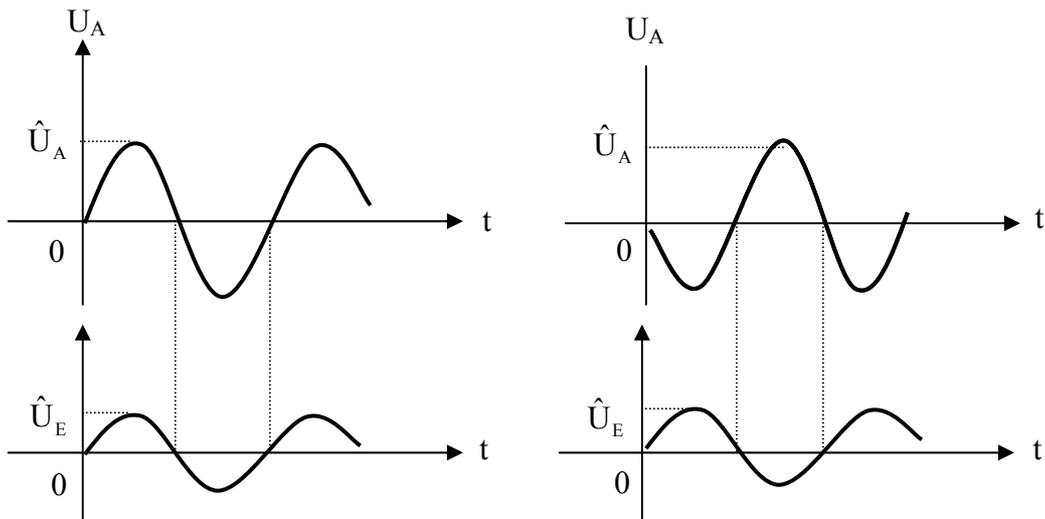


Bild 3: Phasenbeziehung zwischen Eingangsspannung  $U_E$  und Ausgangsspannung  $U_A$  beim nichtinvertierenden (a) und invertierenden (b) Verstärker.

### 3.2 Transistorverstärker

Im Versuch wird ein sehr einfacher einstufiger Wechselspannungsverstärker in Emitterschaltung zur Untersuchung des Verstärkungsverhaltens aufgebaut. Die Funktion der Schaltung soll in zwei Schritten erläutert werden.

#### 3.2.1 Verstärkung mit einem n-p-n-Transistor in Emitterschaltung

Die Schaltung des Verstärkers zeigt das Bild 4.

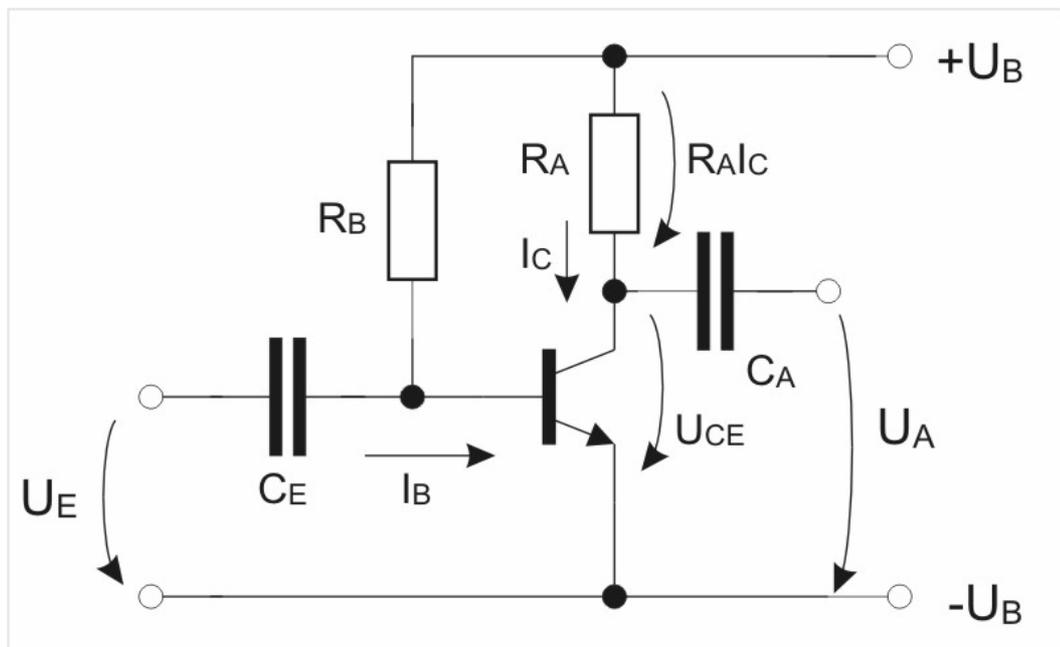


Bild 4: Transistorverstärker in Emitterschaltung

Die Betriebsspannung  $U_B$  wird über den Arbeitswiderstand  $R_A$  an die Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors angelegt. Außerdem erzeugt die Betriebsspannung über den Basiswiderstand  $R_B$  einen Basisstrom  $I_B$ , der seinerseits infolge der Stromverstärkung  $V_i$  des Transistors einen entsprechend größeren Kollektorstrom  $I_C = V_i \cdot I_B$  bewirkt. Der Kollektorstrom fließt über  $R_A$  und erzeugt an diesem einen Spannungsabfall  $U = I_C \cdot R_A$ .

Eine Wechselspannung  $U_E(t)$  am Eingang des Verstärkers verursacht über den Einkoppelkondensator  $C_E$  einen zusätzlichen Wechselstrom  $I_{B\sim}$ , der über die Basis-Emitter-Strecke des Transistors fließt. Auf diese Weise wird der Basisstrom zeitabhängig. Ein Anwachsen von  $U_E$  vergrößert den Basisgleichstrom  $I_{B=}$ , ein Abfall vermindert ihn (Bild 5). Infolge der Stromverstärkung des Transistors gilt das entsprechende für den Kollektorstrom. Der Kollektorwechselstrom  $I_{C\sim} = I_{B\sim} \cdot V_i$  erzeugt am Arbeitswiderstand  $R_A$  einen Spannungsabfall  $R_A \cdot I_{C\sim} = R_A \cdot I_{B\sim} \cdot V_i$ , der größer als  $U_E$  ist. Dieser Wechselspannungsanteil  $R_A \cdot I_{C\sim}$  der Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  wird über einen Auskoppelkondensator  $C_A$  an den Ausgang des Verstärkers geführt. Den zeitlichen Verlauf von  $I_B$ ,  $U_{CE}$  und  $U_A$  bei einer angelegten Eingangsspannung  $U_E$  zeigt Bild 5.

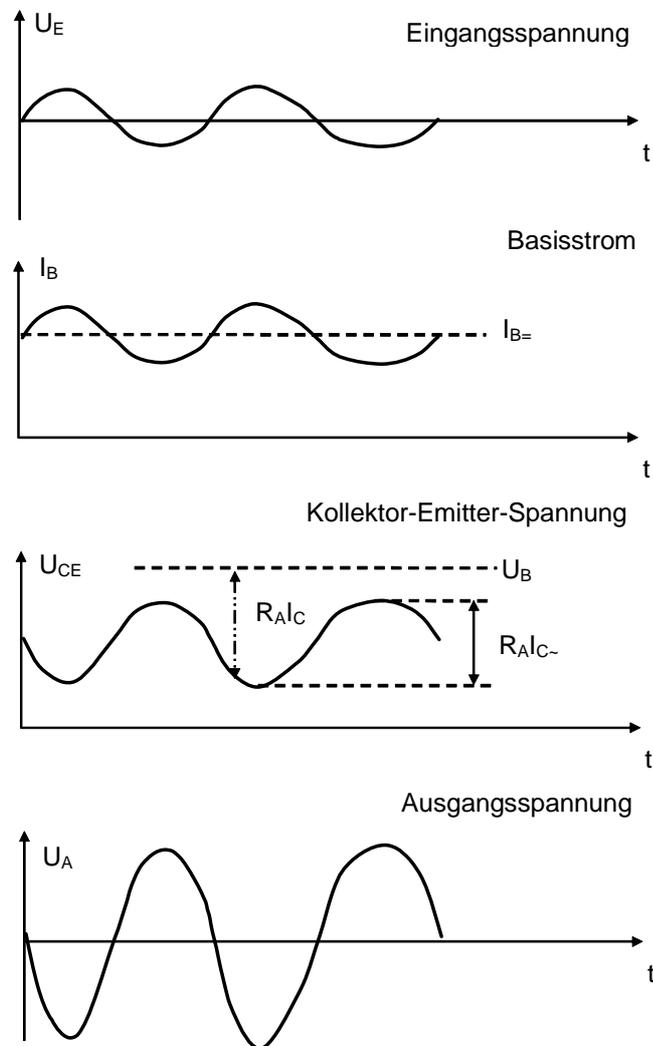


Bild 5: Zeitlicher Verlauf von  $U_E$ ,  $I_B$ ,  $U_{CE}$  und  $U_A$ .

Erklären Sie, weshalb die Phase der Ausgangswchelspannung  $U_A$  gegenüber  $U_E$  um  $\pi$  verschoben ist (invertierender Verstärker)!

### 3.2.2 Gegengekoppelter Verstärker

Um eine weitgehende Unabhängigkeit der Eigenschaften des Verstärkers von der Betriebsspannung und von den Transistorparametern (Auswechseln des Transistors, Einfluss der Umgebungstemperatur) zu erreichen und um die Signalverzerrung zu vermindern, werden Verstärker gegengekoppelt. Die Gegenkopplung ist eine spezielle Art der Rückkopplung, bei der ein Teil des Ausgangssignals auf den Eingang des Verstärkers zurückgekoppelt wird. Zwei wichtige Fälle der Rückkopplung sind die Mitkopplung und die Gegenkopplung. Bei der Mitkopplung erfolgt die Signalarückführung auf den Eingang des Verstärkers so, dass die Eingangsspannung unterstützt wird (Phasendrehung Null, Generator).

Bei der Gegenkopplung erfolgt die Signalarückführung mit einer Phasendrehung von  $\pi$ . Dadurch wird das Eingangssignal geschwächt und die Verstärkung vermindert. Im Versuch wird eine einfache Form der Gegenkopplung angewendet. Die Schaltung ist in Bild 6 dargestellt. Der Kollektorstrom  $I_C$  fließt wegen  $I_C \gg I_B$  ebenfalls über den Emitterwiderstand  $R_E$  und erzeugt an diesem einen Spannungsabfall  $R_E \cdot I_E \approx R_E \cdot I_C$ , der die Steuerspannung des Transistors vermindert. Diese Gegenkopplung führt zu einer Herabsetzung der Verstärkung  $V$  auf den Wert

$$V \approx \frac{R_A}{R_E} \quad \text{für} \quad V_i \gg 1,$$

der nahezu unabhängig von den Transistorparametern ist, wenn die Stromverstärkung sehr groß ist ( $V_i \gg 100$ ).

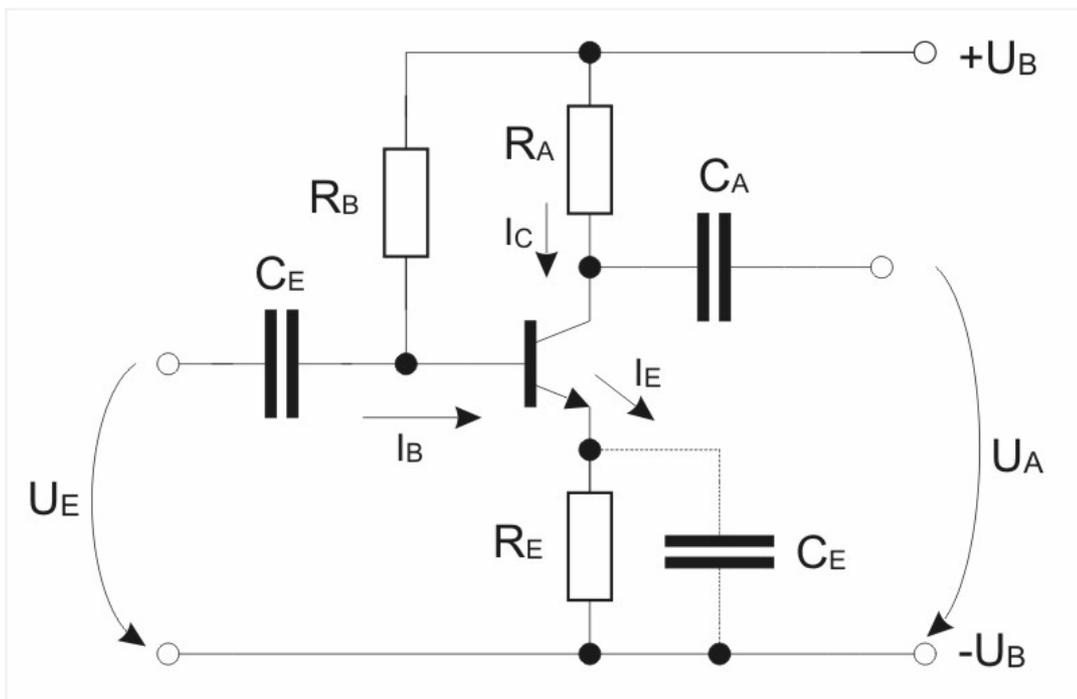


Bild 6: Gegengekopplung mit Emitterwiderstand  $R_E$

Soll die Gegenkopplung nur die Stabilisierung des gleichstrommäßigen Arbeitspunktes des Transistors bewirken, ohne die Verstärkung zu verringern, so kann ein Emittorkondensator  $C_E$  parallel zu  $R_E$  geschaltet werden und diesen wechselstrommäßig überbrücken. Die Kapazität von  $C_E$  muss so groß sein, dass für die Signalfrequenz  $f$  die Bedingung

$$R_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_E} \ll R_E$$

eingehalten wird.

Berechnen Sie  $C_E$  für  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$  und  $R_C = 10 R_E$ !

## 4. Versuchsdurchführung

### 4.1 Wahl der Eingangsspannung zur Verstärkungsmessung

Die Verstärkung  $V$  ist entsprechend ihrer Definition als Quotient  $V = U_A / U_E$  von der Amplitude des Eingangssignals unabhängig. Praktisch muss jedoch die Existenz einer oberen Grenze für die Amplitude der zu verstärkenden Signale berücksichtigt werden. Die obere Grenze für die Amplitude der Eingangsspannung  $U_E$  ergibt sich daraus, dass die Ausgangsspannung  $U_A = V \cdot U_E$  nicht größer als die Betriebsspannung  $U_B$  des Verstärkers werden kann. Wird dies nicht beachtet, so entstehen Verzerrungen des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal (Bild 7).

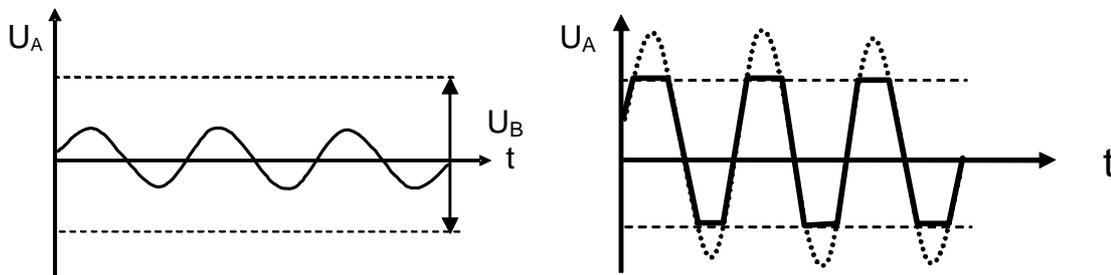


Bild 7: Ausgangssignalverlauf  $U_A(t)$  eines Verstärkers bei verschiedenen Eingangsspannungen  $U_E$ .  
Links:  $U_E$  richtig gewählt, Rechts:  $U_E$  zu groß gewählt.

Bei den meisten Verstärkern entstehen infolge der nichtlinearen Kennlinien der Transistoren bereits Verzerrungen, wenn  $U_A$  noch wesentlich kleiner als  $U_B$  ist. Die Entscheidung darüber, wie groß die maximal zulässige Signalamplitude ist, hängt von der geforderten Qualität der Signalübertragung ab. Ein Maß dafür ist der *Klirrfaktor*, der den auf das Ausgangssignal bezogenen Anteil der durch den Verstärker erzeugten Oberwellen angibt.

Bei der Durchführung des Praktikumsversuchs ist es ausreichend, die Signalform am Ausgang des Verstärkers oszillographisch zu beobachten und die Eingangssignalamplitude so einzustellen, dass keine Ausgangssignalverzerrungen sichtbar sind. Eine sehr genaue Kontrolle der Verzerrungen ergibt sich, wenn mit dem Ein- und dem Ausgangssignal des Verstärkers eine Lissajous-Figur erzeugt wird (Schaltung nach Bild 8).

Treten keine Verzerrungen auf, so ergibt sich (infolge einer möglichen Phasendrehung) eine Ellipse. Beträgt die Phasendrehung Null oder  $\pi$ , so entsteht eine Gerade.

## 4.2 Verstärkungsmessung

Bei der Verstärkungsmessung müssen die Ein- und die Ausgangsspannung mit Voltmetern bestimmt werden. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Die Voltmeter müssen einen hohen Innenwiderstand  $R_i$  besitzen ( $R_i \gg R_a$ ), damit keine Messfehler entstehen.
- Besonders bei Verstärkern mit großer Spannungsverstärkung ( $V > 100$ ) muss das Voltmeter zur Messung von  $U_E$  einen Messbereich für sehr kleine Spannungen besitzen.

Beide Forderungen werden sowohl von Oszillographen als auch von Messinstrumenten, denen ein Verstärker vorgeschaltet ist, erfüllt. Eine Schaltung zur Verstärkungsmessung mit dem Oszillographen zeigt Bild 8.

Die von einem Generator erzeugte Wechselspannung  $U'_E$  wird mit einem niederohmigen Spannungsteiler  $R_2$ ,  $R_1$  geteilt und an den Eingang des Verstärkers gelegt. Die Ausgangsspannung  $U_A$  wird mit dem Oszillographen in y-Richtung gemessen. Die Spannung  $U_E$  wird mit dem Oszillographen in x-Richtung gemessen. Dabei ist der interne Ablenkgenerator des Oszillographen ausgeschaltet (Triggerwahlschalter in Stellung „X“).

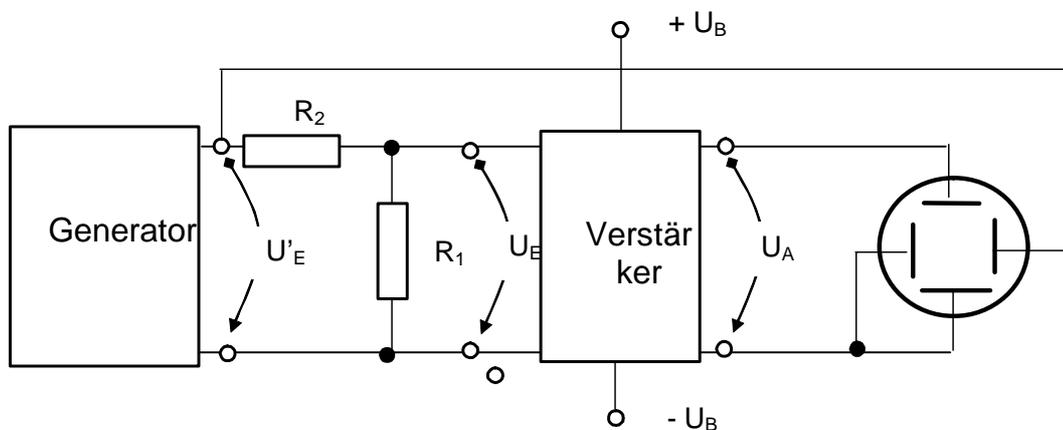


Bild 8: Schaltung zur Messung der Verstärkung und der Phasendrehung eines Verstärkers ( $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$ )

Die Verstärkung  $V$  wird aus den gemessenen Spannungen  $U_A$  und  $U'_E$  folgendermaßen berechnet:

$$V = \frac{U_A}{U'_E} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{U_A}{U'_E}$$

### 4.3 Phasenmessung

Die Messung der Phasendrehung  $\varphi$  des Verstärkers erfolgt ebenfalls mit der Schaltung in Bild 8. Die Phasendifferenz zwischen Ein- und Ausgangssignal wird durch Ausmessen der Ellipse nach Bild 9 bestimmt.

Für die Phasendrehung  $\varphi$  gilt demnach:

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{A} = \arcsin \frac{b}{B}$$

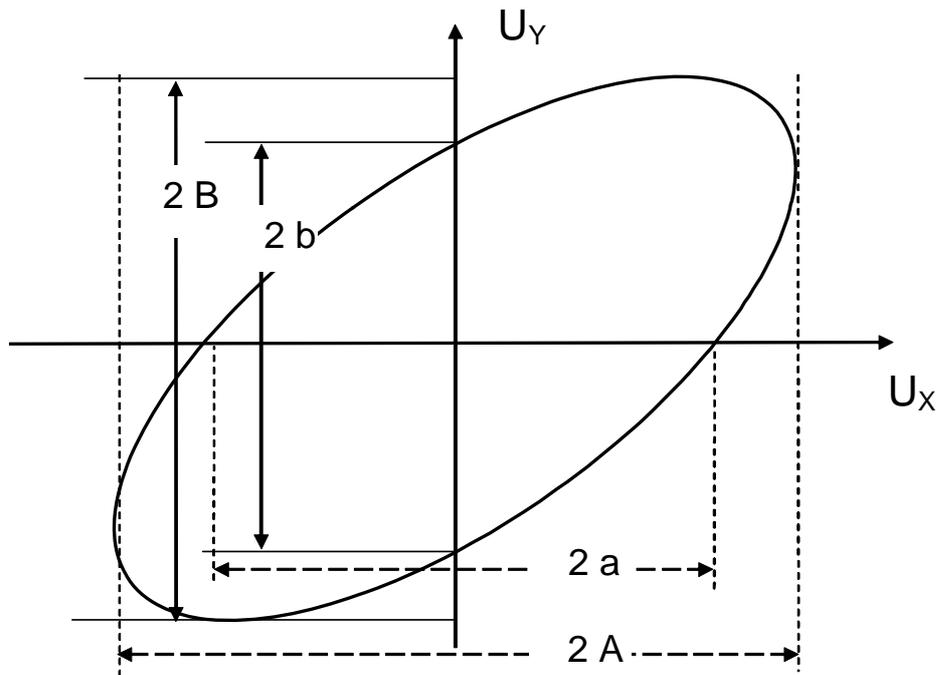


Bild 9: Bestimmung der Phasendifferenz durch Ausmessen der Lissajous-Figur