

Hinweis: Zu Beginn des Praktikums muss die Ausarbeitung der unter II. genannten Versuchsvorbereitung in handschriftlicher Form vorliegen, um den Versuch durchführen zu können!

Versuch 3:

Kennlinienfeld eines Transistors – der Transistor als Stromverstärker

Name: _____ Vorname: _____

Matrikelnr: _____

Termin: _____

Endtestat: _____

I. Grundlagen

Es gibt zwei Hauptfragen, die man bei der Benutzung eines Transistors (allgemein eines Bauelements) stellen kann. Die erste Frage lautet:

- **Wieso** hat er seine Eigenschaften? bzw. **Warum** funktioniert er?

Um diese Frage zu beantworten, muß man die ganze Physik betrachten, die dahinter steht: Die Struktur des Kristallgitters, die Leitung mit Elektronen und mit Löchern usw.

Die zweite Frage ist:

- **Wie** funktioniert er? oder **Was** macht das Bauelement?

Die Antwort auf diese Frage ist eher experimentell zu beantworten und das ist das Ziel dieses Versuches.

Kurze Beschreibung eines Bipolartransistors

Der Bipolartransistor ist ein Bauelement mit drei elektrischen Kontakten. Sie heißen Emitter, Basis und Kollektor. Es gibt zwei Arten von Bipolartransistoren: npn und pnp. Das Bild 1 zeigt das Schaltsymbol für die beiden Transistortypen an.

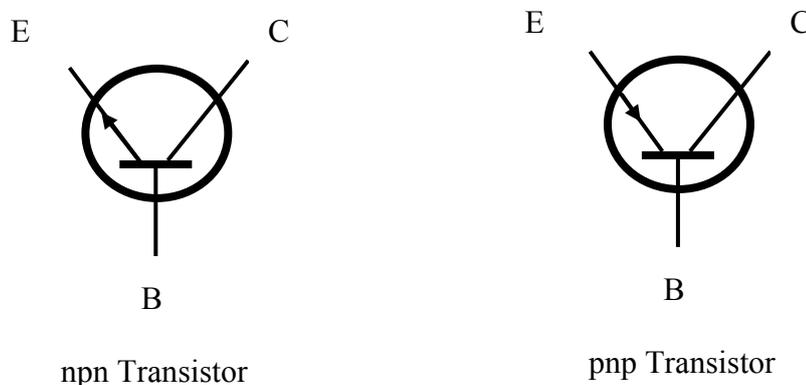


Bild 1 technische Schaltungssymbole eines npn- bzw. pnp- Transistors

Da der Transistor drei Anschlüsse besitzt, sind auch je drei Teilspannungen und drei Teilströme vorhanden:

- | | | | |
|--------------------------------|----------|-------------------|-------|
| 1. Kollektor - Emitterspannung | U_{CE} | 4. Kollektorstrom | I_C |
| 2. Kollektor - Basisspannung | U_{CB} | 5. Emitterstrom | I_E |
| 3. Basis - Emitterspannung | U_{BE} | 6. Basisstrom | I_B |

Die sechs Parameter sind jedoch nicht voneinander unabhängig. Das Knotengesetz beschreibt die Beziehung zwischen den Strömen:

$$I_E + I_B + I_C = 0 \text{ (siehe Bild 2)}$$

Die technische Stromrichtung ist wie folgt definiert: die Ströme, die in den Transistor tatsächlich eintreten, sind per Definition positiv, und die, die austreten, negativ

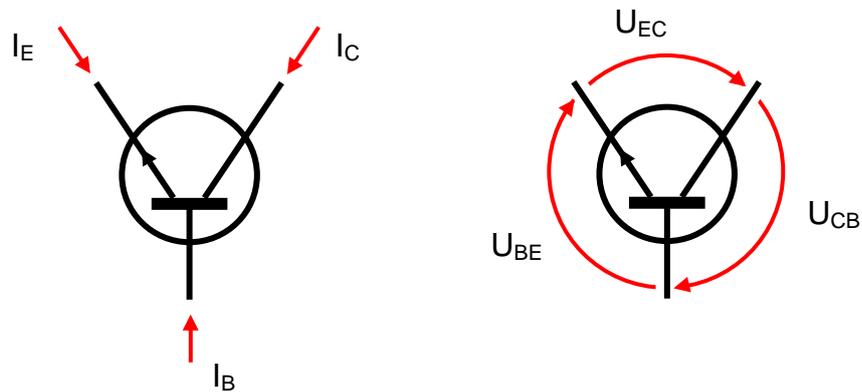


Bild 2 Ströme und Spannungen an einem npn-Transistor

Das Maschengesetz gibt eine Beziehung zwischen den Spannungen an:

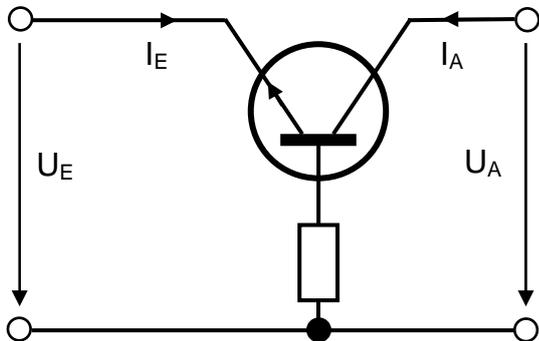
$$U_{EC} + U_{CB} + U_{BE} = 0 \quad \text{mit } U_{EC} = \Phi_E - \Phi_C$$

Φ_x ist das elektrische Potenzial am Punkt x

Es bleiben also vier unabhängige Parameter (zwei Ströme und zwei Spannungen), die den Transistor vollständig beschreiben.

Mögliche Schaltungen mit einem Transistor

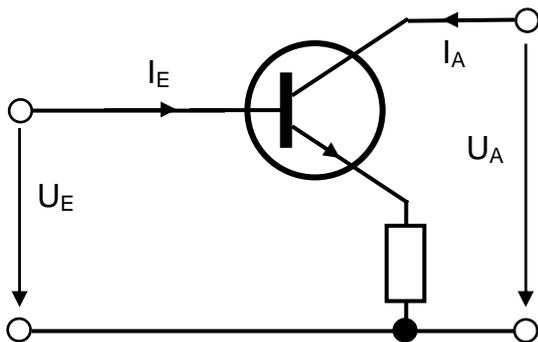
Es gibt drei Arten, einen Transistor in einer Schaltung zu benutzen



(50k...1M Ω), diese Eigenschaft wird für Impedanzanpassungen genutzt. Die Stromverstärkung der Basisschaltung beträgt $v_i \leq 1$, und die Spannungsverstärkung $v_u = 100 \dots 500$.

Basisschaltung

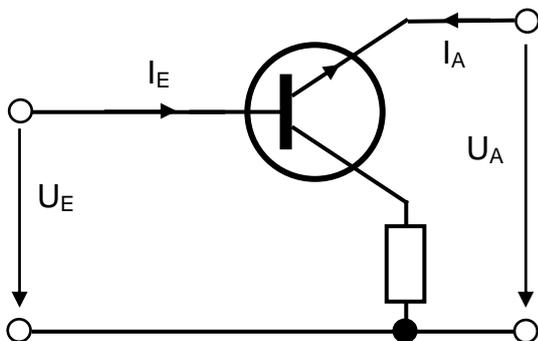
Die Basiselektrode ist hier der gemeinsame Bezugspunkt für den Eingang und für den Ausgang der Schaltung. Diese Schaltung wird in Oszillatoren und HF-Verstärkern eingesetzt, da sie sehr gute Hochfrequenzeigenschaften aufweist (obere Grenzfrequenz im GHz-Bereich). Die Eingangsimpedanz ist klein (10...100 Ω), die Ausgangsimpedanz sehr groß



Durch eine mittlere Eingangsimpedanz (20...5k Ω), und die große Ausgangsimpedanz (5k...20k Ω), ist sie ebenfalls zur Impedanzanpassung geeignet.

Emitterschaltung

Die Emittierelektrode ist hier der gemeinsame Bezugspunkt für den Eingang und für den Ausgang der Schaltung. Diese Grundschaltung ist die am häufigsten verwendete Variante, da sie zur Leistungsverstärkung ($v_i = 50 \dots 500$, $v_u = 300 \dots 1000$) im NF-, HF-Bereich eingesetzt werden kann (obere Grenzfrequenz im MHz-Bereich).



gangsimpedanz (10k...200k Ω), und die kleine Ausgangsimpedanz (4...100 Ω) ausgenutzt.

Kollektorschaltung

Die Kollektorelektrode ist hier der gemeinsame Bezugspunkt für den Eingang und für den Ausgang der Schaltung. Sie wird als NF-Eingangsverstärker eingesetzt, mit einer oberen Grenzfrequenz im MHz-Bereich. Die Stromverstärkung beträgt $v_i = 30 \dots 500$, und die Spannungsverstärkung $v_u = 0,9 \dots 0,98 < 1$. Zur Impedanzanpassung wird die große Ein-

Kennlinienfeld eines Transistors in Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist die am meisten eingesetzte Grundschaltung, daher wird in diesem Versuch der npn-Transistor in Emitterschaltung betrieben (siehe Bild 3). Wie schon gezeigt wurde, sind zwei Spannungen, und zwei Ströme ausreichend, um einen Transistor in seiner Funktion zu beschreiben. Aus Gründen, die von der Schaltungstheorie abhängen, werden hier I_C , U_{CE} , I_B , U_{BE} gemessen.

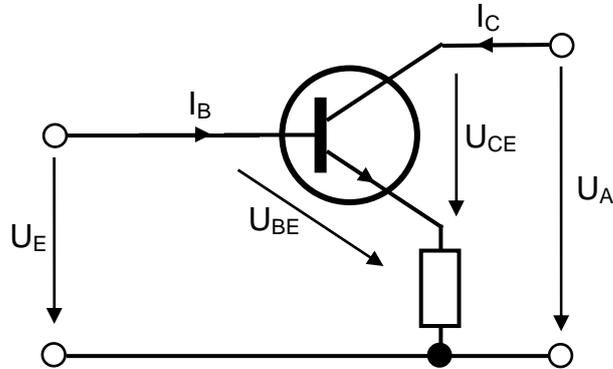


Bild 3 Ein Transistor in Emitterschaltung

Die anschauliche Darstellung der Abhängigkeit dieser Parameter erfolgt in Kennlinienfeldern. Man kann z.B. für einen Strom I_{B1} die Beziehung $I_C = f(U_{CE})$ messen; man erhält so eine Kennlinie. Verändert man den Basisstrom, so erhält man eine weitere Kennlinie. Nimmt man I_B in einem Bereich $I_{B,min}$ bis $I_{B,max}$ an, so ergibt sich eine Serie von Einzelkennlinien (siehe Bild 7), die als Kennlinienfeld bezeichnet werden.

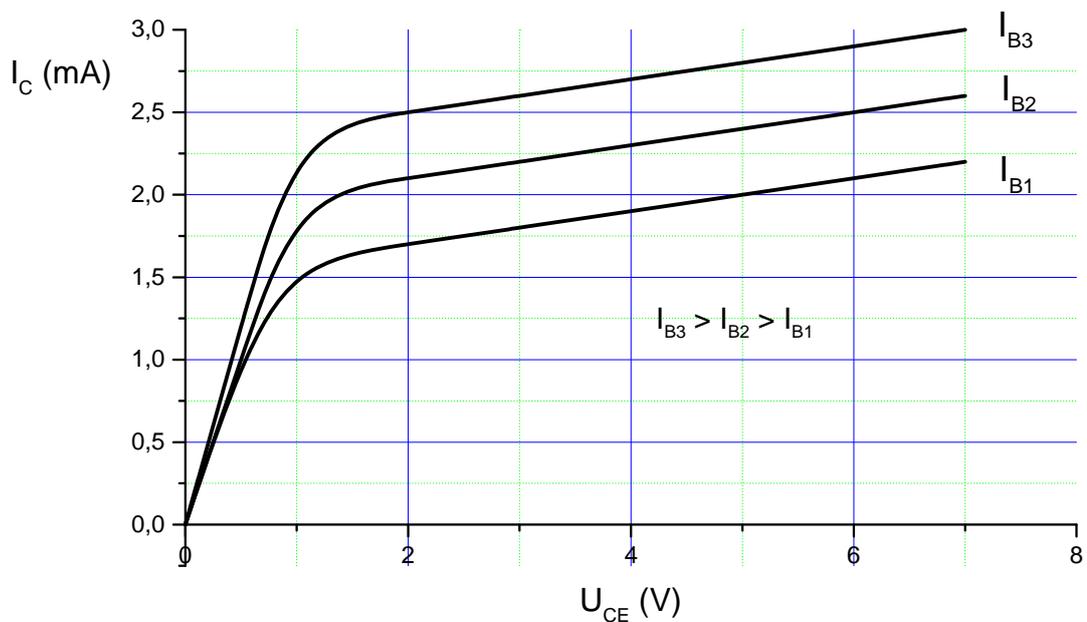


Bild 4 Ausgangskennlinienfeld eines Transistors

Analog dazu erhält man

- das Stromübertragungskennlinienfeld $I_C = f(I_B)$ mit U_{CE} als Parameter
- das Spannungsübertragungskennlinienfeld $U_{CE} = f(U_{BE})$ mit I_B als Parameter
- das Eingangskennlinienfeld $I_B = f(U_{BE})$ mit U_{CE} als Parameter

Alle Kennlinienfelder können in einer Vier-Quadranten-Darstellung zusammengefasst werden (siehe Bild 5).

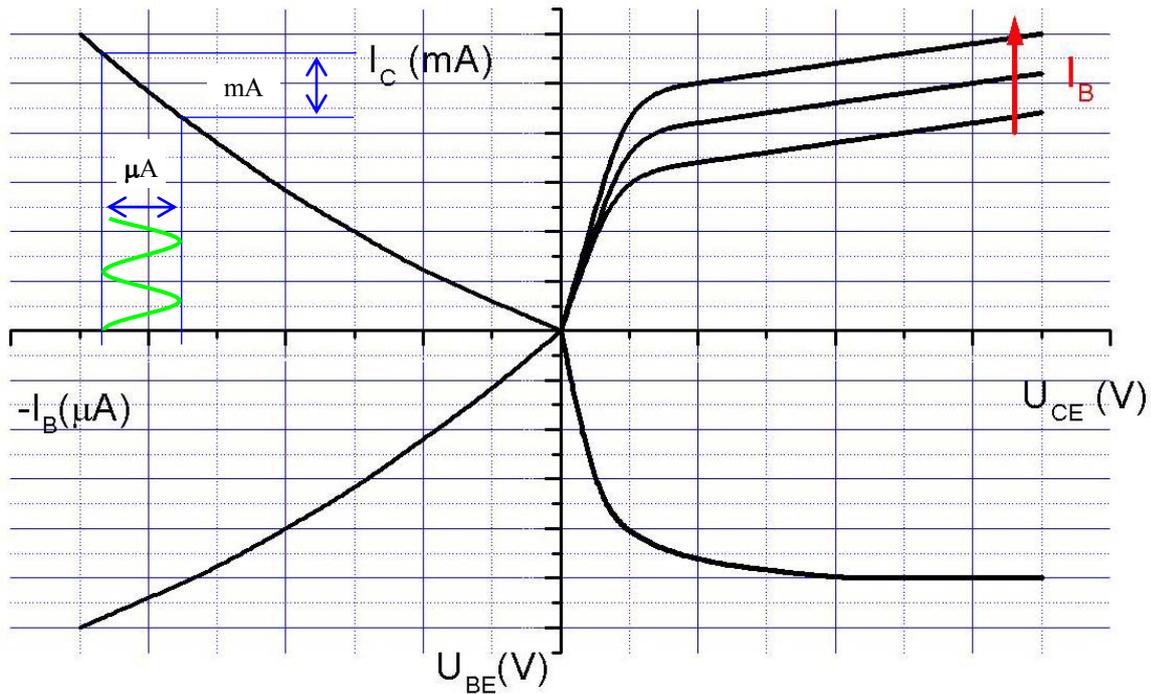


Bild 5 Kennlinienfelder des Transistors

Betrachtet man das Stromübertragungskennlinienfeld $I_C = f(I_B)$, sieht man dass kleine Änderungen von I_B (μA Bereich) große Änderungen von I_C (mA Bereich) verursachen. Man sagt, der Strom I_B wird verstärkt. Daher spricht man hier von einer Stromverstärkung.

Die Eingangsimpedanz ist kleiner als die Ausgangsimpedanz. Deshalb wird nicht nur der Strom, sondern auch die Spannung verstärkt. Somit eignet sich diese Schaltung zur Leistungsverstärkung, da sowohl der Strom als auch die Spannung verstärkt werden.

II. Versuchsvorbereitung

- Zeichnen Sie die technischen Schaltungssymbole für einen npn, bzw. pnp Transistor!
- Nennen Sie die drei möglichen Transistorgrundsaltungen!
- Erläutern Sie kurz die Eigenschaften der jeweiligen Grundsaltung!
- Zeichnen Sie das prinzipielle 4-Quadranten-Kennlinienfeld eines Transistors in Emitterschaltung und erläutern Sie die einzelnen Bereiche!
- Leiten Sie die allgemeine Formel zur Berechnung der Kollektor-Emitterspannung U_{CE} , der in Bild 7 (Seite 9) dargestellten Schaltung, in Abhängigkeit von U_B und I_C her (mit der Vereinfachung $I_C \gg I_B \rightarrow I_C \approx I_E$).

III. Versuchsaufbau und -durchführung

In der vorliegenden Box gibt es nicht nur einen Transistor, sondern auch andere Bauelemente, wie Widerstände, Kondensatoren usw. Die Dimensionierung dieser Bauelemente ist Gegenstand der Vorlesung. Die gesamte Schaltung und die Belegung der Buchsen an kann man im Bild 8 sehen. Da die Schaltung etwas kompliziert aussehen kann (obwohl sie ganz einfach ist), werden wir die Hauptteile separat analysieren.

DC Messungen

I_B und I_C können mit zwei Amperemetern direkt gemessen werden. Für die Bestimmung von I_E wird das Knotengesetz benutzt: (siehe Bild 6 oben)

$$I_B + I_C + I_E = 0 \quad \rightarrow \quad I_E = - (I_C + I_B)$$

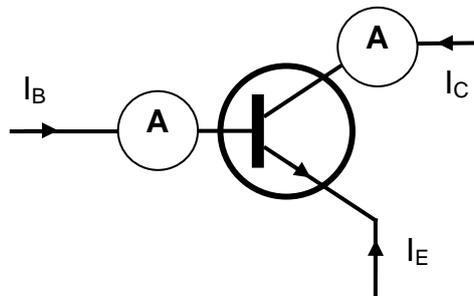
U_{BE} und U_{CE} kann man in der gegebenen Schaltung nicht direkt messen sondern nur mittels Maschengesetz berechnen (siehe Bild 6 unten):

$$U_1 = U_{BE} - R \cdot I_E = U_{BE} + R \cdot (I_C + I_B) \quad \rightarrow \quad U_{BE} = U_1 - R \cdot (I_C + I_B)$$

$$U_2 = U_{CE} - R \cdot I_E = U_{CE} + R \cdot (I_C + I_B) \quad \rightarrow \quad U_{CE} = U_2 - R \cdot (I_C + I_B)$$

wobei I_E zuvor berechnet wurde.

Strommessung:



Spannungsmessung:

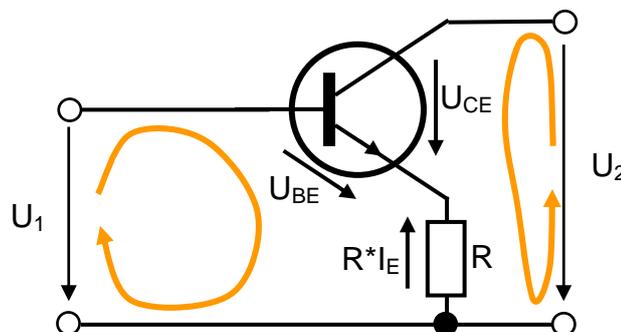


Bild 6 Messung der DC-Ströme und -Spannungen in der gegebenen Schaltung

DC Spannungseinstellung

Um die Spannungseinstellung zu beschreiben, werden die wichtigen Knoten und Widerstände gekennzeichnet (siehe Bild 7).

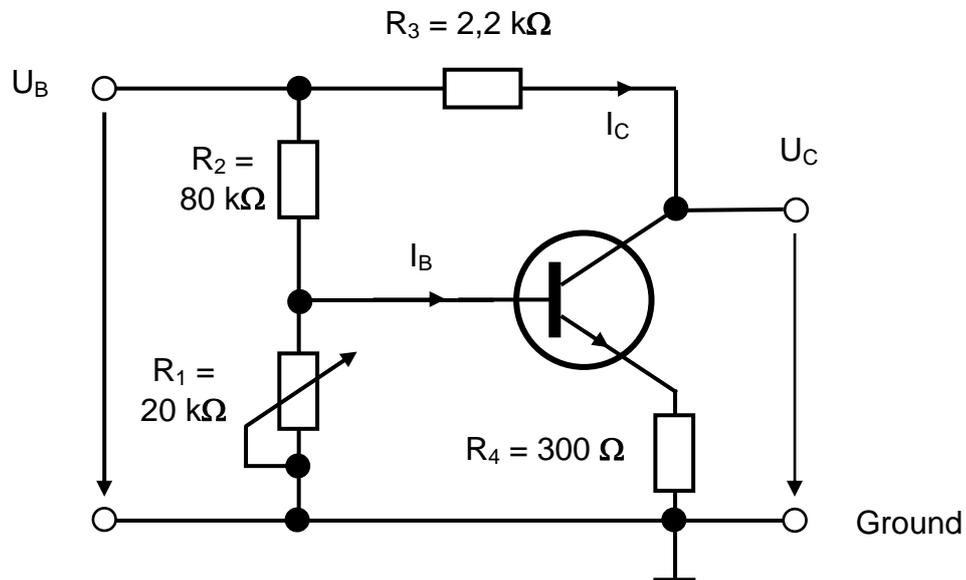


Bild 7 Emitterschaltung für DC-Messungen

Die Basis–Emitterspannung U_{BE} wird durch den Spannungsteiler R_2 - R_1 generiert. Durch das Verändern des Widerstandwertes von R_1 lässt sich U_{BE} variieren, was einen direkten Einfluss auf I_B hat, und somit auch indirekt auf den Kollektorstrom I_C einwirkt.

U_{CE} stellt sich direkt durch den Spannungsteiler R_3 - $R_{(\text{Kollektor-Emitter})}$ - R_4 ein und wird indirekt durch I_B beeinflusst.

Somit haben Änderungen der Betriebsspannung U_B einen direkten Einfluss auf U_{BE} und U_{CE} , aber auch indirekt auf I_B und I_C , zur Folge.

Stromübertragungskennlinienfeld

Das Stromübertragungskennlinienfeld $I_C = f(I_B)$ mit U_{CE} als Parameter wird aufgenommen. Beim ersten Durchlauf wird U_{CE} konstant gehalten durch Variation von U_B , und beim zweiten Durchlauf wird U_B nicht verändert. Um U_{CE} leichter berechnen zu können nimmt man $I_C \approx I_E$ an.

Zur Bestimmung der Strom-Übertragungskennlinie werden die BNC-Buchsen nicht verwendet. Die Betriebsspannung wird an den Buchsen U_B (rot) und Ground (schwarz) angeschlossen, und die Ströme I_B und I_C mit einem Amperemeter an den dafür vorgesehenen Messbuchsen (grün, gelb) gemessen.

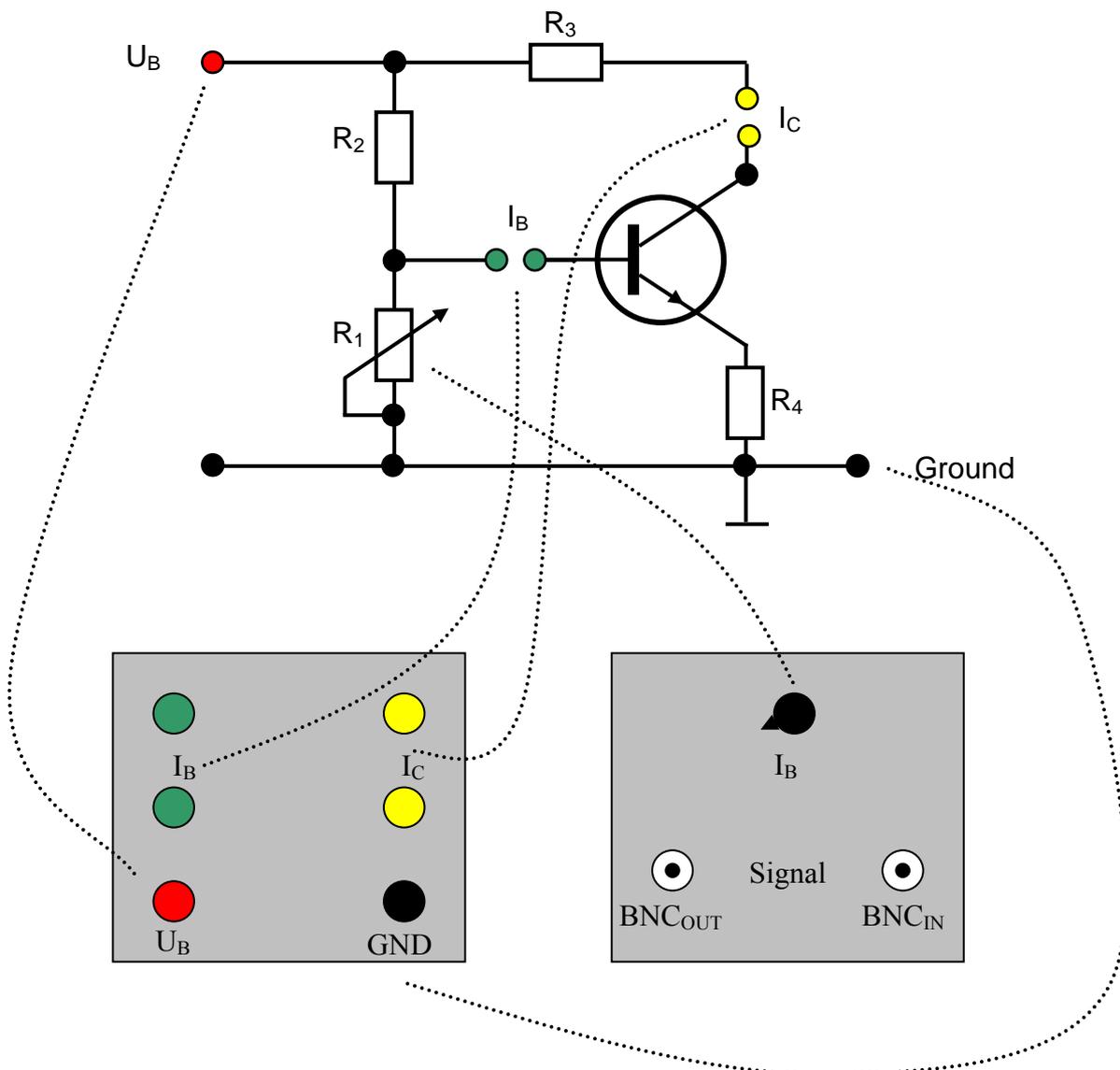


Bild 8 Versuchsaufbau und innere Beschaltung

Versuchdurchführung:

1. $I_B = 1 \mu\text{A}$

- Stellen Sie das Potenzial U_B auf 5 V ein.
- Verändern Sie R_1 durch Drehen des mit I_B gekennzeichneten Knopfes bis $I_B = 1 \mu\text{A}$ ist
- Lesen Sie I_C ab.
- Berechnen Sie die Spannung U_{CE} (Vereinfachung $I_C \approx I_E$)

2. $I_B = 2 \mu\text{A}$

- Verändern Sie R_1 durch Drehen des mit I_B gekennzeichneten Knopfes bis $I_B = 2 \mu\text{A}$ ist
- Lesen Sie I_C ab.
- Berechnen Sie die Spannung U_{CE}
- Falls $U_{CE}(I_B = 2 \mu\text{A}) \neq U_{CE}(I_B = 1 \mu\text{A})$ ist ändern Sie die Spannung U_B ; drehen Sie das Potentiometer I_B bis $I_B = 2 \mu\text{A}$; berechnen Sie die Spannung U_{CE} erneut.

Wiederholen Sie die Messungen nach 2 für $I_B = 3 \mu\text{A}$, $4 \mu\text{A}$, $5 \mu\text{A}$, $6 \mu\text{A}$ bei $U_{CE} = \text{konstant}$
Tragen Sie die Werte in die nachfolgende Werte-Tabelle 1 ein.

- Stellen Sie nun die Spannung U_B auf 10 V ein. Wiederholen Sie die Messreihe **ohne** Nachregelung von U_{CE} . Die Werte werden in Tabelle 2 notiert.
- Zeichnen Sie die aufgenommenen Stromübertragungskennlinien ($U_{CE} = \text{konstant}$, und $U_{CE} \neq \text{konstant}$) in das Diagramm auf Seite 13 ein.
- Berechnen Sie nun die Stromverstärkung des Transistors ν_i .

IV. Werte-Tabelle

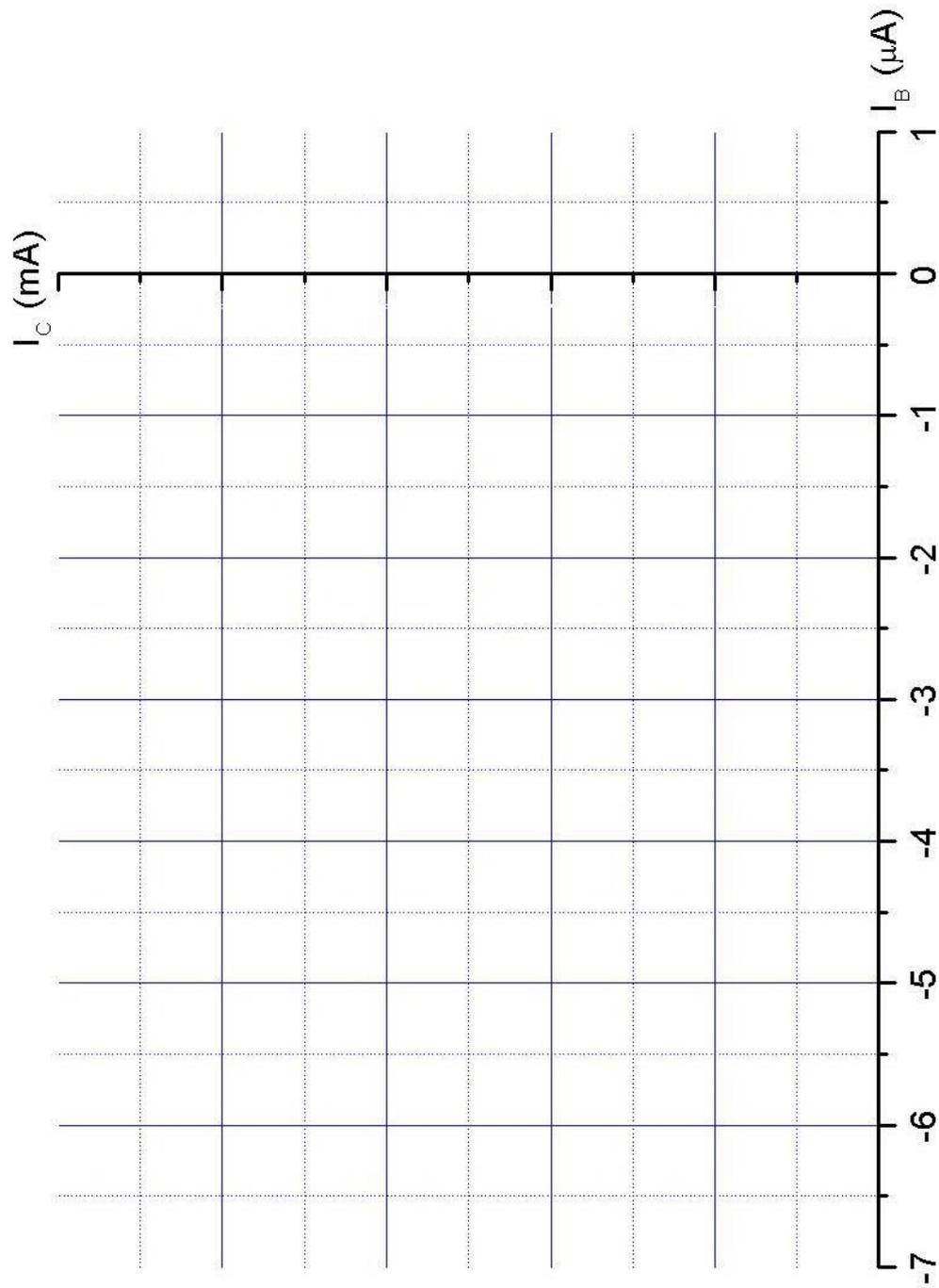
Tabelle 1 - $U_{CE} = \text{konstant}$

I_B (μA)	I_C (mA)	U_B (V)	U_{CE} (V)
1		5	
2			
3			
4			
5			
6			

Tabelle 2 - Ohne Nachregelung - $U_{CE} \neq \text{konstant}$

I_B (μA)	I_C (mA)
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Stromübertragungskennlinie:



AC Strom- und Spannungsverstärkung

Nach Einstellung eines Arbeitspunktes, wird über die BNC IN-Buchse eine kleine Wechselspannung eingekoppelt. Die Amperemeter müssen vorher durch Brücken ersetzt werden. Die eingekoppelte Wechselspannung wird sowohl eine kleine, periodische Änderung der Spannung U_{BE} verursachen und somit auch die des Stroms I_B . Hieraus resultiert eine verstärkte Änderung am Ausgang BNC OUT. Der Strom und die Spannung werden so verstärkt.

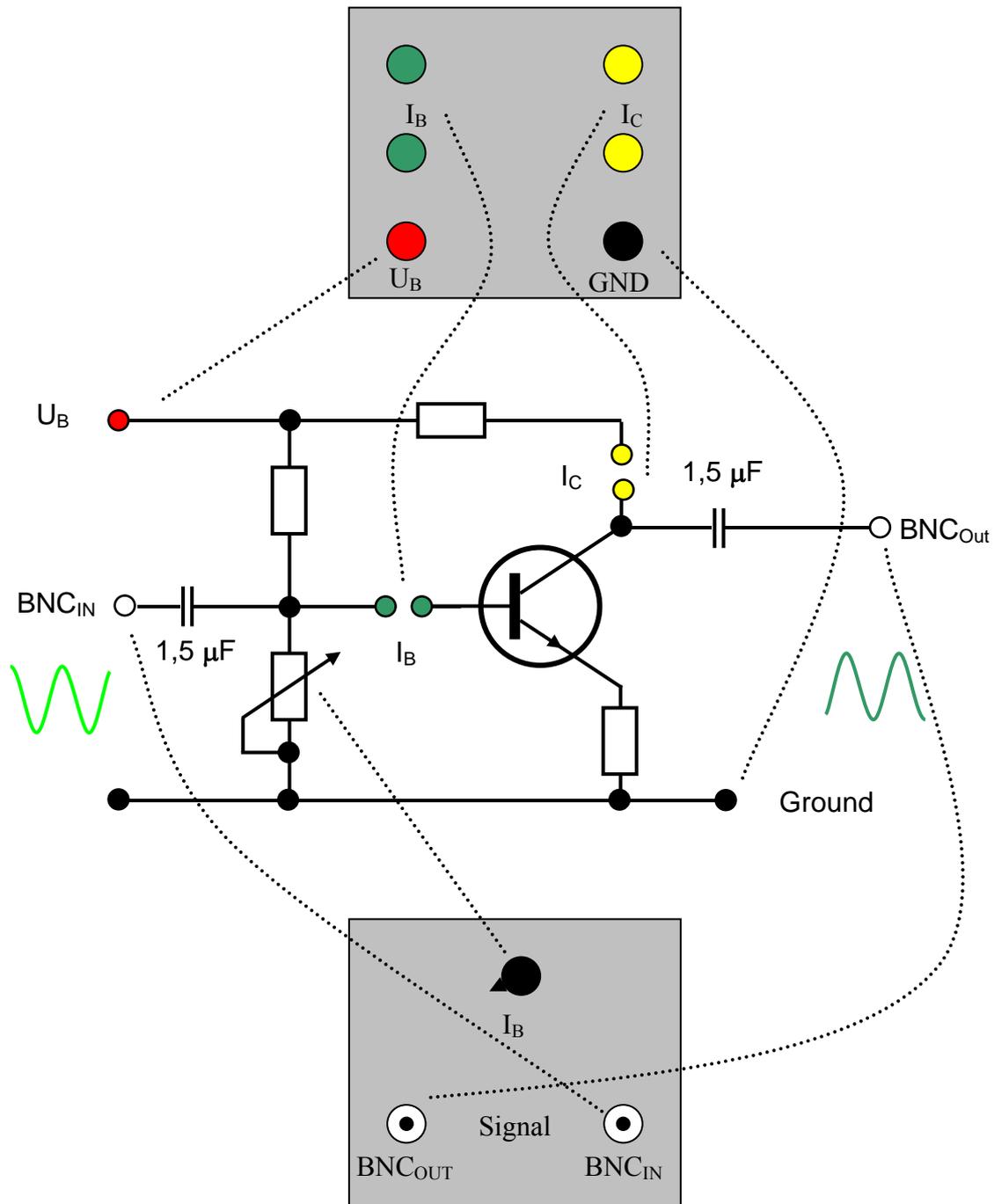
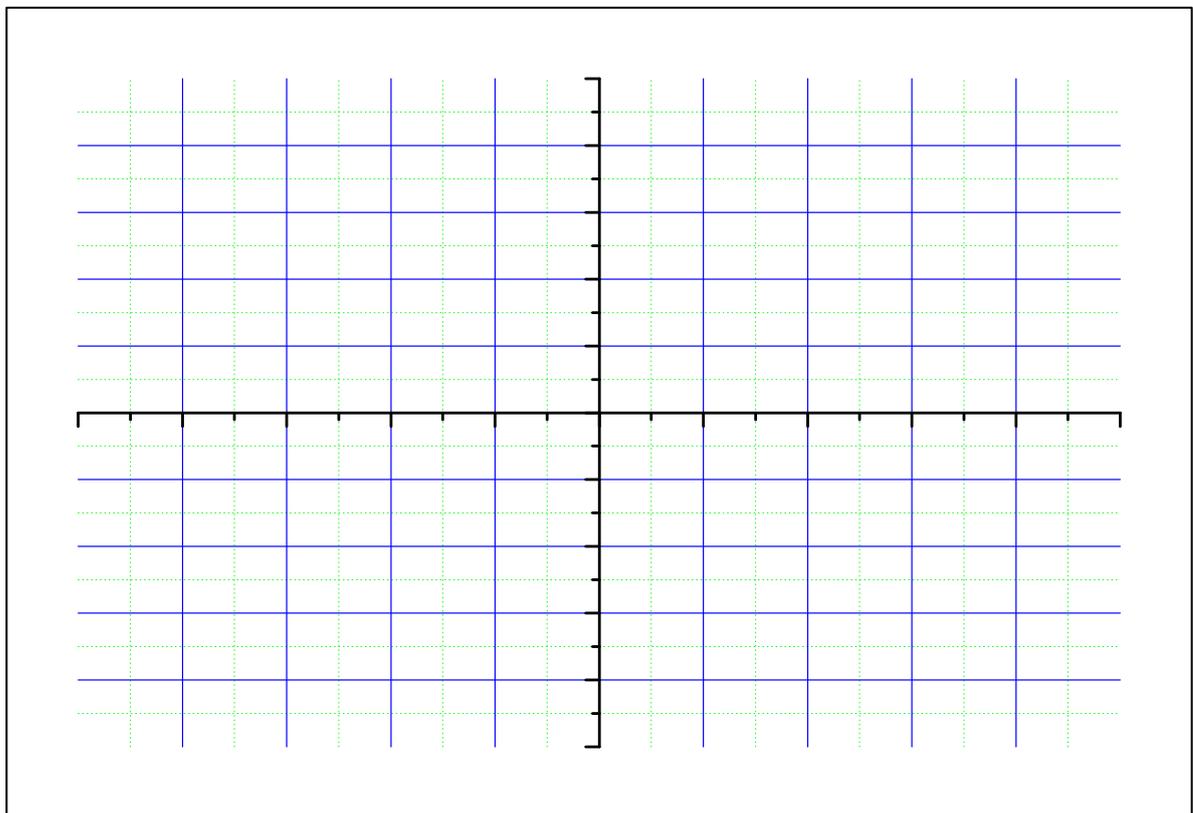


Bild 9 Beschaltung des Transistors für AC-Messungen in der Messbox

Spannungsverstärkung

- Stellen Sie die Spannung U_B auf 10 V ein.
- Verändern Sie R_1 durch Drehen des mit I_B gekennzeichneten Knopfes bis $I_B = 3 \mu\text{A}$ ist
- Ersetzen Sie die Amperemeter durch Brücken.
- Legen Sie eine von dem Signalgenerator erzeugte, sinusförmige Wechselspannung, mit einer Amplitude zwischen 100mV...300mV, und einer Frequenz von 1kHz, an BNC_{IN} an.
- Messe Sie diese Eingangsspannung mit dem Oszilloskop (Kanal 1).
- Benutzen Sie Kanal 2 um die Ausgangsspannung an BNC_{OUT} darzustellen.
- Zeichnen Sie die Verläufe des Ein- bzw. Ausgangssignals in das untenstehende Diagramm ein.
- Vergleichen Sie die Phase und die Amplitude der gemessenen Signale.
- Berechnen Sie nun die Spannungsverstärkung der Schaltung v_u .



V. Fazit

Das Konzept des Kennlinienfeldes eines Bipolartransistors wurde erläutert. Dann wurde der Transistor in Emitterschaltung als Strom / Spannung – Verstärker beschrieben.

Das Stromübertragungskennlinienfeld eines Bipolartransistors wurde aufgenommen. Die Kennlinien des Kennlinienfeldes sind fast identisch. Die DC-Stromverstärkung wurde nachgewiesen. Die Schaltung wurde auch als AC-Stromverstärker benutzt.

VI. Abschließende Fragen

- Welche Information liefert die Stromübertragungskennlinie?
- Es scheint dass, sowohl der Strom, als auch die Spannung verstärkt wird. Woher kommt die Energie für diese Verstärkung? Ist das ein „Perpetuum Mobile“?
- Welche Aufgabe haben die Kondensatoren?
- Wieso sind u_e und u_a um 180° phasenverschoben?