

# Übungen zur Elektrodynamik und Optik

## Übung 2: Der Differenzverstärker

Oliver Neumann  
Sebastian Wilken

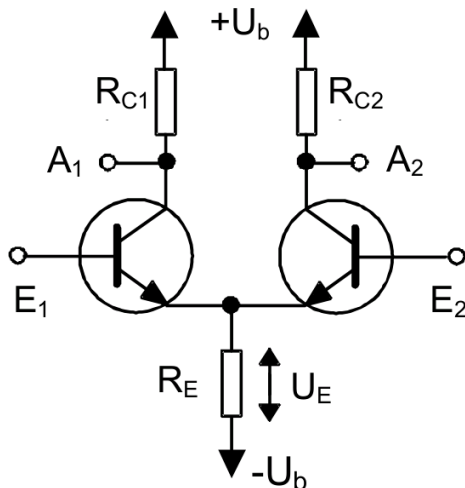
10. Mai 2006

### Inhaltsverzeichnis

1	Eigenschaften des Differenzverstärkers	2
2	Verschiedene Verstärkerschaltungen	3
3	Dimensionierung der Schaltung	4
4	Versuchsdurchführung	5
5	Abbildungsnachweis	7
6	Literatur	7

# 1 Eigenschaften des Differenzverstärkers

In dieser Experimentalübung beschäftigen wir uns mit dem Differenzverstärker. Der Differenzverstärker besteht im wesentlichen aus zwei Transistoren, die einen gemeinsamen Emittterwiderstand  $R_E$  besitzen. Einen auf das Wesentliche reduzierten Schaltplan für einen Differenzverstärker zeigt Abbildung 1.



**Abb. 1:** Vereinfachte Grundschaltung des Differenzverstärkers

Aus der Grundschaltung ist zu erkennen, dass jeder der beiden Zweige der Schaltung einer *Emitterschaltung* entspricht. Ebenso wie in der vorherigen Experimentalübung liegen die Eingänge nämlich an der Basis und die Kollektoren an der positiven Betriebsspannung  $+U_b$ . Zudem liegen die Ausgänge  $A_1$  und  $A_2$  wie bei einer Emitterschaltung am Kollektor (vgl. Aufgabe 1a).

Um zu erreichen, dass die Summe beider Emittterströme konstant bleibt, ist eine Konstantstromquelle wünschenswert. Um diesen Effekt annähernd zu erreichen, schalten wir den Emittterwiderstand  $R_E$  zwischen die Emittter und die negative Betriebsspannung  $-U_b$ . Dadurch wird der Emittterstrom auf einen bestimmten Wert begrenzt. Dieser Effekt ist aber weitaus größer, wenn wir eine "echte" Konstantstromquelle verwenden, welche u.a. aus einem weiteren Transistor besteht (vgl. Aufgabe 1b).

Einige Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit dem Differenzverstärker (vgl. Aufgabe 1c, d):

- **Differenzverstärkung.** Die Differenzverstärkung ist definiert als Verhältnis der Ausgangsspannungsänderung eines Differenzverstärkers zur Änderung der Differenz der Eingangsspannungen. Bei einem idealen Differenzverstärker mit den Eingangsspannungen  $U_{e1}$  und  $U_{e2}$  gilt mit dem Verstärkungsfaktor  $V$  für die Ausgangsspannung  $U_a$ :

$$U_a = V \cdot (U_{e1} - U_{e2}) \Leftrightarrow V = \frac{U_a}{(U_{e1} - U_{e2})}$$

Aus der Gleichung folgt unmittelbar, dass die Ausgangsspannung gleich Null ist, falls die Eingangsspannungen identisch sind. Zudem hängt die Ausgangsspannung nicht mehr von den Eingangsspannungen selbst, sondern nur noch von deren Differenz ab (daher die Bezeichnung *Differenzverstärker*). Die Differenzverstärkung ist eine erwünschte Verstärkung und Hauptaufgabe des Transistors.

- **Gleichtaktverstärkung.** Im Gegensatz zur Differenzverstärkung ist die Gleichtaktverstärkung unerwünscht und je kleiner, desto besser der Differenzverstärker gebaut ist. Bei einem idealen Differenzverstärker ist die Gleichtaktverstärkung gleich Null. Gleichtaktverstärkung tritt auf, wenn die Ausgangsspannung sich mit der Eingangsspannung ändert, obwohl die Differenz der Eingangsspannungen gleich Null ist.
- **Gleichtaktunterdrückung.** Als Gleichtaktunterdrückung wird im Allgemeinen das Verhältnis von der erwünschten Differenzverstärkung zur unerwünschten Gleichtaktverstärkung bezeichnet. Sie ist ein Maß für die Güte eines Differenzverstärkers.

Der **Operationsverstärker (OP)** ist eine Weiterentwicklung unseres Differenzverstärkers. Neben einem herkömmlichen Differenzverstärker besteht ein OP aus einer Konstantstromquelle, einer Verstärkerstufe und einer Ausgangsstufe. Der Aufbau des OP ist wesentlich komplizierter als beim Differenzverstärker und besteht aus zehn oder mehr Transistoren. Ein großer Vorteil des OP ist es, dass er als integrierter Schaltkreis (IC) in einem kleinen Gehäuse hergestellt wird und somit einen minimalen Platzverbrauch aufweist. Zudem arbeiten ICs in der Regel präziser als großflächige Schaltungen, da die Temperaturunterschiede auf dem kleinen Raum sehr gering sind. Der OP hat Verstärkungsfaktoren von mehr als 100 000. Beim OP werden die beiden Ausgänge des Differenzverstärkers zu einem zusammengefasst. Dieser Ausgang besitzt im Vergleich zum Differenzverstärker einen kleinen Widerstand.

Während die Hauptaufgabe des Differenzverstärkers die Verstärkung von Eingangsspannungsdifferenzen ist, lassen sich mit dem OP mannigfaltige Anwendungen realisieren. Wie der Name schon vermuten lässt, kann man mit Hilfe des OP verschiedene mathematische Operationen wie Addieren, Subtrahieren, Differenzieren und Integrieren realisieren. Desweiteren kann der OP als invertierender oder nichtinvertierender Verstärker genutzt werden (vgl. Aufgabe 1e).

## 2 Verschiedene Verstärkerschaltungen

Im Allgemeinen wird zwischen folgenden Schaltungen unterschieden (vgl. Aufgabe 2a und die Schaltskizzen auf dem Aufgabenblatt):

- **Eintaktverstärker.** Wenn eine positive Flanke über den Eingang in die Schaltung gelangt, dann fließt ein größerer Strom  $I_1$  durch den linken Zweig. Das bedeutet, dass durch den rechten Zweig ein geringerer Strom  $I_2$  fließt, da der Strom beim Emitter immer konstant ist. Da  $I_2$  klein ist,

fällt weniger Spannung über den Kollektorwiderstand ab, d.h. am Ausgang misst man eine größere Spannung. Das Eingangs- und das Ausgangssignal bleiben im Takt.

- **Differenzverstärker.** Wenn die Spannung am Eingang  $E_1$  größer als die am Eingang  $E_2$  ist, dann fließt mehr Strom durch den linken als durch den rechten Zweig, da die Summe der Ströme durch beide Zweige konstant ist. Das bedeutet, dass der Spannungsabfall am Kollektorwiderstand im rechten Zweig klein und im linken Zweig groß wird. Die Differenz der Signale wird verstärkt.
- **Eintakt-Gegentakt-Wandler.** Wenn eine positive Flanke über den Eingang in die Schaltung gelangt, dann fließt ein größerer Strom  $I_1$  durch den linken Zweig. Das bedeutet, dass durch den rechten Zweig ein geringerer Strom  $I_2$  fließt, da die Summe der Ströme in beiden Zweigen konstant ist. Daraus folgt, dass über den Kollektorwiderstand im linken Zweig mehr Spannung als bei dem Kollektorwiderstand im rechten Zweig abfällt, d.h. am Ausgang  $A_1$  misst man eine kleinere Spannung als am Ausgang  $A_2$ . Am Eingang war das Signal noch in Takt, am Ausgang jedoch laufen die Signale gegen den Takt. Daher der Name.
- **Gegentakt-Eintakt-Wandler.** Wenn die Spannung am Eingang  $E_1$  größer als die Spannung an  $E_2$  ist, dann fließt ein größerer Strom durch den linken als durch den rechten Zweig. Im rechten Zweig fällt weniger Spannung am Kollektorwiderstand ab. Am Ausgang  $A_2$  misst man eine größere Spannung. Am Eingang waren die Signale nicht in Takt, am Ausgang hingegen schon. Daher die Bezeichnung Gegentakt-Eintakt-Wandler.

Die Gleichtaktunterdrückung ist bei dem Differenzverstärker und bei dem Eintakt-Gegentaktwandler wesentlich, da nur diese beiden Schaltungen über zwei Ausgänge verfügen. Die Symmetrie spielt laut Definition nur bei dem Differenzverstärker und bei dem Gegentakt-Eintakt-Wandler eine Rolle: Gibt man beim Gegentakt-Eintakt-Wandler auf beide Eingänge z.B. eine Spannung von 5 V, ändert sich die Ausgangsspannung nur gering, da sich  $I_E$  ändert während beide Kollektorströme fast gleich bleiben damit auch die Spannung bei  $A_2$ . Schalten aber beide Transistoren sehr unterschiedlich, ändert sich auch die Ausgangsspannung. Der Differenzverstärker ist zudem die Schaltung, welche am meisten einem OP ähnelt, da er durch die Bildung der Differenz zweier Ströme eine Operation ausführt (vgl. Aufgabe 2b).

### 3 Dimensionierung der Schaltung

Zur Dimensionierung (vgl. Aufgabe 3a) verwenden wir folgende Größen:  $I_{C1} = I_{C2} = 1 \text{ mA}$ ,  $U_E = 4 \text{ V}$ ,  $R_2 = \frac{1}{10}(R_1 + R_3)$ ,  $I_b = 10 \mu\text{A}$ ,  $I_q = 100 \mu\text{A}$ ,  $I_{RE} = I_{C1} + I_{C2} = 2 \text{ mA}$  und  $U_B = U_E + 0,7 \text{ V} = 4,7 \text{ V}$ . Nun können wir die Widerstände für unsere Schaltung bestimmen. Für den Emitterwiderstand ergibt sich:

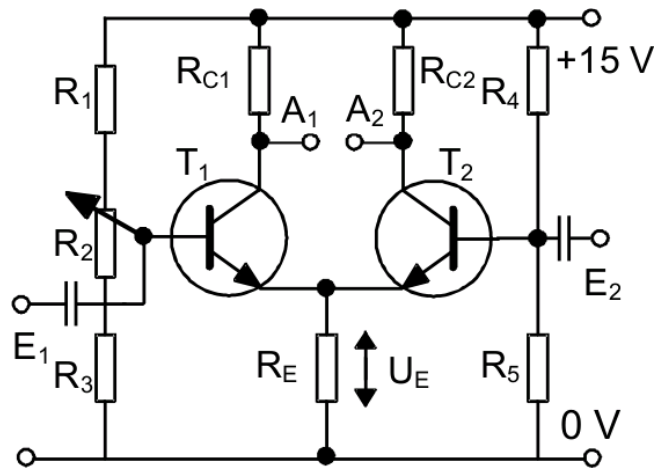


Abb. 2: Schaltung für den Versuch

$$R_E = \frac{U_E}{I_{RE}} = \frac{4 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega$$

Die Kollektorwiderstände wählen wir wie folgt:

$$R_{C1} = R_{C2} = \frac{5 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Für den Spannungsteiler an den Eingängen  $E_1$  und  $E_2$ , welche wir symmetrisch aufbauen, benutzen wir folgende Widerstände:

$$R_1 = R_4 = \frac{10 \text{ V}}{10 \mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_5 = \frac{5 \text{ V}}{10 \mu\text{A}} = 50 \text{ k}\Omega$$

Mit Hilfe des Potentiometers  $R_2$  ist eine Feinabstimmung zwischen beiden Schaltungszweigen möglich. Das Potentiometer teilt dabei seinen ohmschen Widerstand elektrisch in zwei Widerstände auf. Mit Hilfe eines Reglers können wir die Größe des Widerstands regeln.

## 4 Versuchsdurchführung

Mit Hilfe der Farbcodierung suchen wir die geeigneten ohmschen Widerstände aus. Zur Sicherheit messen wir die Größe der Widerstände nochmals mit einem

Ohmmeter aus. Für die Versuchsdurchführung (vgl. Aufgabe 3b) haben wir folgende Widerstände gewählt:

- $R_1 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$
- $R_{C1} = R_{C2} = 5,6 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = R_5 = 47 \text{ k}\Omega$
- $R_E = 2,2 \text{ k}\Omega$

Mittels eines Lötkolbens bauen wir die in Abb. 3 gezeigte Schaltung auf. Nun schließen wir das Netzgerät mit  $U_b = 15 \text{ V}$  an. Mit Hilfe eines Oszilloskops überprüfen wir, ob die Gleichspannungspotenziale richtig vorliegen und ob die Gleichtaktunterdrückung zufriedenstellend ist. Dazu betrachten wir die Ausgangssignale auf dem Oszilloskopschirm und drehen so lange am Potentiometer, bis die kleinstmögliche Differenz beider Signale vorliegt. In unserem Fall wird dies  $0 \text{ V}$ , da wir für  $A_1$  und  $A_2$  jeweils  $9,8 \text{ V}$  gemessen haben. Des Weiteren haben wir gemessen:

- $U_B$  in  $T_1$ :  $4,8 \text{ V}$
- $U_B$  in  $T_2$ :  $4,8 \text{ V}$
- $U_E$ :  $4,3 \text{ V}$

Wir legen nun an beide Eingänge das selbe Signal und messen die Spannung über dem Emitter und über den Kollektoren. Dabei haben wir erhalten:

- $U$  in  $T_1$ :  $1,8 \text{ V}$
- $U$  in  $T_2$ :  $0,7 \text{ V}$
- $U_E$ :  $1 \text{ V}$

Für eine optimale Gleichtaktunterdrückung müsste die Differenz der Ausgangssignale gleich Null sein. Die Differenz beträgt aber in unserem Fall  $1,1 \text{ V}$ . Die Gleichtaktunterdrückung ist also nicht zufriedenstellend.

Jetzt legen wir nur an einen Eingang der Schaltung ein Signal an. Den anderen Eingang schalten wir wechselstromseitig kurz. Das Eingangssignal darf keine Amplitude größer  $50 \text{ mV}$  haben, da wir sonst aufgrund der 100-fachen Verstärkung aus dem Aussteuerbereich gelangen. Deswegen wählen wir ein Signal mit einer Amplitude von  $10 \text{ mV}$ . Damit haben wir folgende Messwerte erhalten:

- $U$  in  $T_1$ :  $0,8 \text{ V}$
- $U$  in  $T_2$ :  $0,8 \text{ V}$

- $U_E$ : 0,7 mV

Diesmal ist die Differenz der Spannungen an  $T_1$  und  $T_2$  gleich Null. Somit haben wir eine optimale Gleichtaktunterdrückung erhalten.

## 5 Abbildungsnachweis

- **Abbildung 1:** Reuter, Rainer: Übungsblatt 2: Der Differenzverstärker, Universität Oldenburg, Institut für Physik, SoSe 2006.
- **Abbildung 2:** Reuter, Rainer: Ebd.

## 6 Literatur

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Differenzverstärker>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverstärker>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0209091.htm>