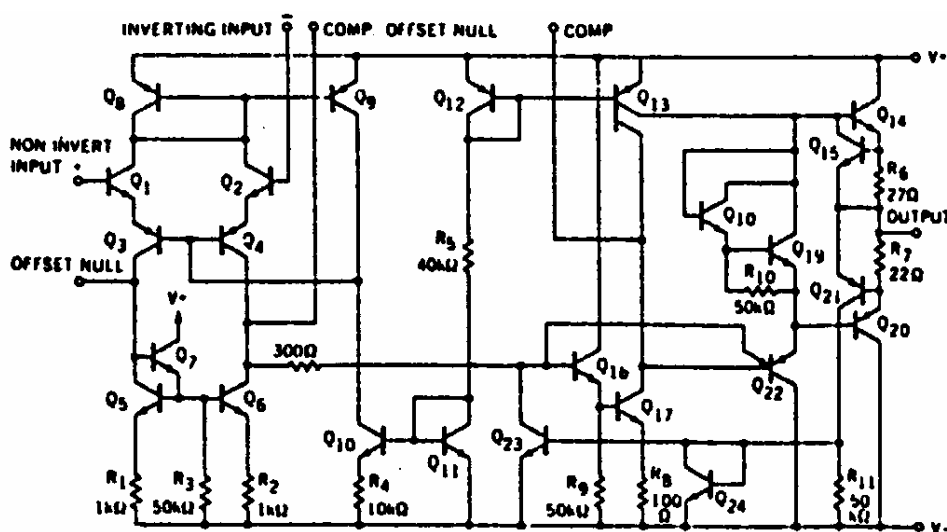
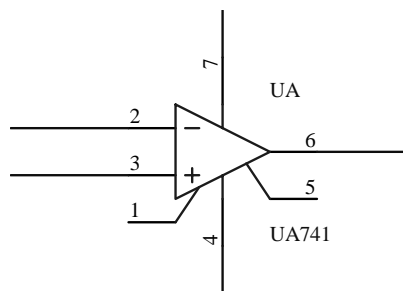


Elektrotechnik Grundlagen

Kapitel 5

Operationsverstärker

5	Operationsverstärker	3
5.1	Ideale Eigenschaften	3
5.2	Speisung.....	3
5.3	Erscheinungsformen.....	4
5.4	Verhalten gegenüber Gleichspannung	5
	5.4.1 Nichtinvertierender Gleichspannungsverstärker	5
	5.4.2 Invertierender Gleichspannungsverstärker	6
5.5	Anwendungen.....	7
	5.5.1 Summierer.....	7
	5.5.2 Potentiometrische Rückführung.....	8
	5.5.3 Differenzverstärker.....	9
5.6	Aufgaben	10
5.7	Auftrag.....	11
5.8	Verzeichnisse	13
	5.8.1 Literaturverzeichnis.....	13
	5.8.2 Figurenverzeichnis.....	13
	5.8.3 Stichwortverzeichnis	13



5 Operationsverstärker

Operationsverstärker (OpAmp) oder Rechenverstärker sind integrierte Spannungs-Verstärker mit einem Differenzverstärker im Eingang.

Der OpAmp ist ein aktives Bauelement in der Analogtechnik. Seinen Namen hat er aus der Anwendung als Rechner. Analogrechner setzen sich aus vielen OpAmp zusammen; erste Analogrechner wurden mit Röhren gebaut. Zusammen mit einer äusseren Beschaltung kann der OpAmp analoge Rechenoperationen ausführen.

5.1 Ideale Eigenschaften

Der OpAmp wird zunächst als „Black Box“ mit bestimmten idealen Eigenschaften angenommen.

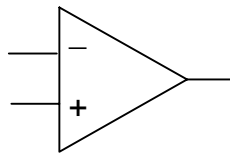


Fig. 5-1 Symbol

Ideale Eigenschaften:

- In die beiden Eingänge (invertierend und nichtinvertierend) fliesst kein Strom
- Zwischen den beiden Eingängen herrscht keine Spannung ($u = 0$)
- Die Spannungsverstärkung v_U ist unendlich gross
- Die Eingangsimpedanz (Eingangswiderstand) Z_{IN} ist unendlich gross
- Die Ausgangsimpedanz (Ausgangswiderstand) Z_{OUT} ist Null. Der Ausgang wirkt als ideale Spannungsquelle

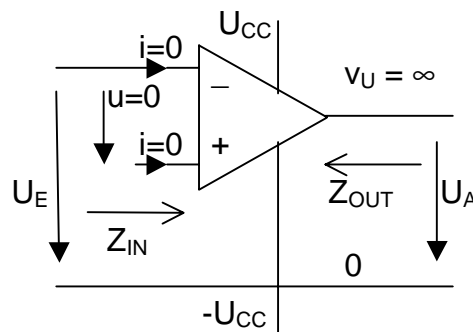


Fig. 5-2 Ideale Eigenschaften

5.2 Speisung

Der OpAmp ist normalerweise $+ 0 -$ gespeist. Vielfach sind die Speiseanschlüsse in den Schemata (Stromlaufplänen) weggelassen.

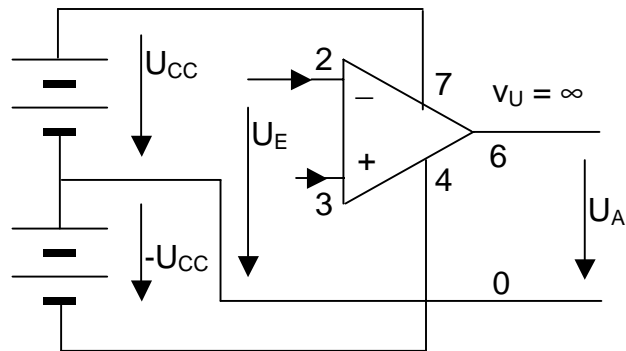


Fig. 5-3 Speisung

Für das Zählen der Anschlüsse wird der OpAmp im Dual Inline (DIP) – Gehäuse von oben, von der Anschriftseite her, betrachtet:

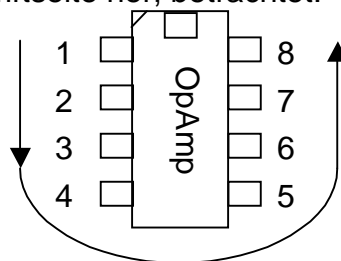


Fig. 5-4 Anschlüsse des OpAmp

Die Anschlüsse (Pin) werden von oben im Gegenuhrzeigersinn gelesen.

5.3 Erscheinungsformen

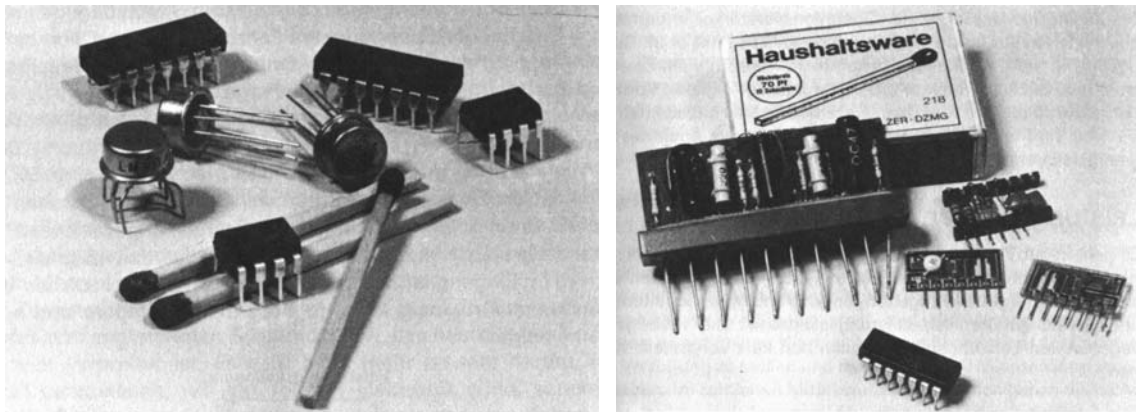


Fig. 5-5 Erscheinungsformen

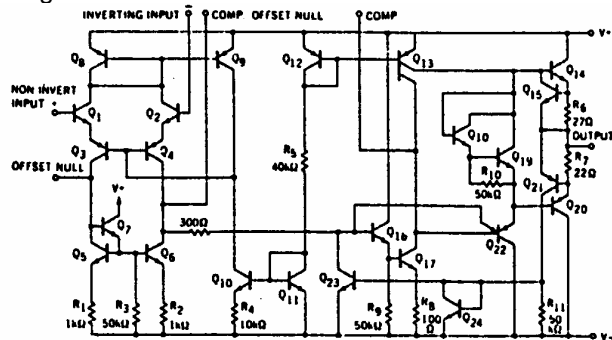


Fig. 5-6 Inneres Schema

5.4 Verhalten gegenüber Gleichspannung

Der OpAmp gilt als aktives Bauelement, da er die Spannung U_E am Eingang, je nach zusätzlicher Beschaltung, um die Verstärkung v_U vergrößert.

5.4.1 Nichtinvertierender Gleichspannungsverstärker

Der nichtinvertierende Verstärker verändert die Spannung so, dass der Ausgang dem Eingang mit gleichem Vorzeichen folgt. Nimmt die Eingangsspannung zu, nimmt auch die Ausgangsspannung zu und umgekehrt.

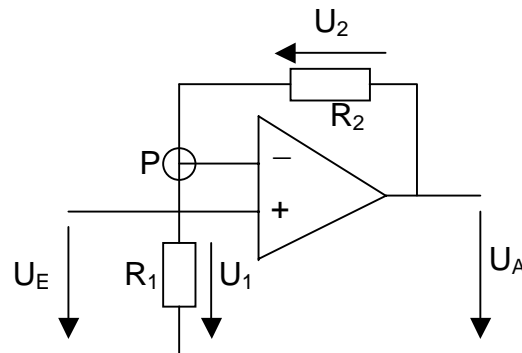


Fig. 5-7 Nichtinvertierender Verstärker

Gefragt wird nach der Spannungsverstärkung v_U . (Idealer OpAmp)

Es gelten $U_1 = U_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ Spannungsteiler

und $U_E = U_1$ wegen $u = 0$

Damit wird die Spannungsverstärkung für den nichtinvertierenden Gleichspannungsverstärker zu

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5-1)$$

Die Verstärkung wird oft in Dezibel (dB) angegeben.

5.4.2 Invertierender Gleichspannungsverstärker

Der invertierende Verstärker verändert die Spannung so, dass der Ausgang dem Eingang mit entgegengesetztem Vorzeichen folgt. Nimmt die Eingangsspannung zu, nimmt die Ausgangsspannung ab und umgekehrt.

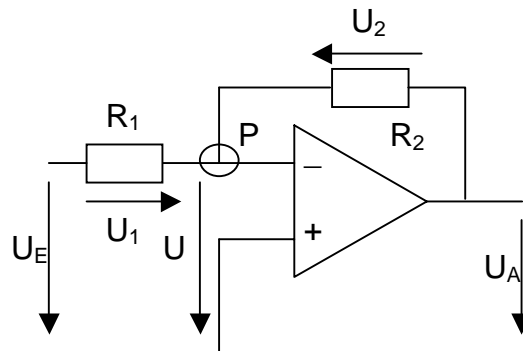


Fig. 5-8 Invertierender Verstärker

Gefragt wird nach der Spannungsverstärkung v_U . (Idealer OpAmp)

Im Knoten P gilt: $I_1 + I_2 = 0$ Es fließt kein Strom in den OpAmp.

Weiter werden $I_1 = \frac{U_E}{R_1}$ und $I_2 = \frac{U_A}{R_2}$, da sich die Spannung zwischen den Eingängen auf Null einstellt. $U = 0$.

Der Knoten P gilt als virtueller Nullpunkt. P ist mit 0 nicht unmittelbar verbunden.

Damit wird die Spannungsverstärkung für den invertierenden Gleichspannungsverstärker zu

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (5-2)$$

Die Verstärkung wird oft in Dezibel (dB) angegeben.

5.5 Anwendungen

5.5.1 Summierer

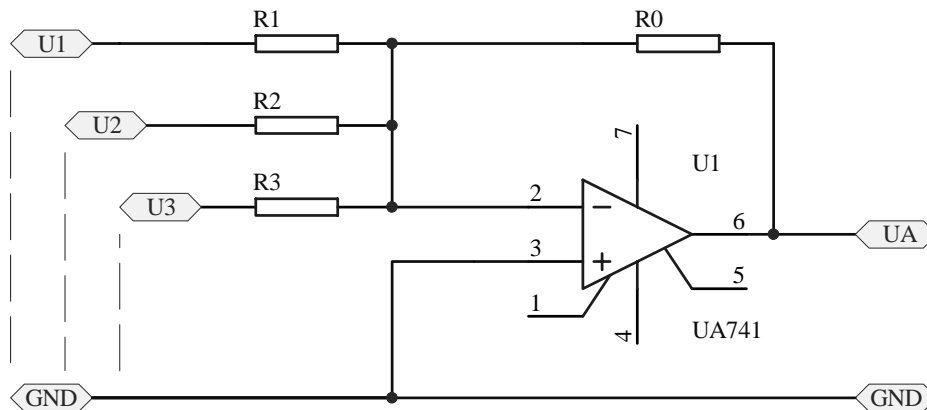


Fig. 5-9 Summier - Schaltung

Im Knoten zu Pin 2 gilt: $I_1 + I_2 + I_3 + I_0 = 0$ und damit

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = -\frac{U_A}{R_0} \quad \text{womit}$$

$$U_A = -\left(U_1 \frac{R_0}{R_1} + U_2 \frac{R_0}{R_2} + U_3 \frac{R_0}{R_3} \right) \quad (5-3)$$

oder allgemein

$$U_A = -\sum_{k=1}^n U_k \frac{R_0}{R_k} \quad (5-4)$$

Für $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_k = \dots = R_n = R_0$ wird

$$U_A = -\sum_{k=1}^n U_k \quad (5-5)$$

In dieser Beschaltung kann der Summierer für mathematische Additionen verwendet werden. Er wird zum Addierer.

5.5.2 Potentiometrische Rückführung

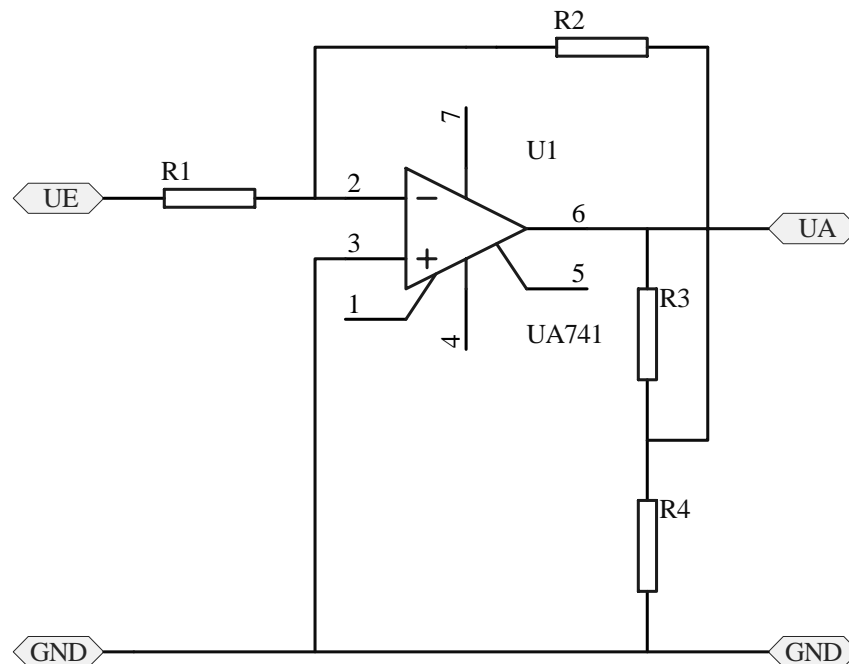


Fig. 5-10 Potentiometrische Rückführung

Im Knoten zu Pin 2 gilt: $I_1 + I_2 = 0$ und damit

$$\frac{U_E}{R_1} + \frac{U_4}{R_2} = 0$$

Im Knoten zwischen R_3 und R_4 gilt: $I_3 - I_2 - I_4 = 0$ und damit

$$\frac{U_A - U_4}{R_3} = \frac{U_4}{R_4} + \frac{U_4}{R_2}$$

Aus dem geordneten Gleichungssystem wird

$$\frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (5-6)$$

Sehr oft ist $R_2 \gg R_3$. In diesem Fall wird näherungsweise

$$\frac{U_A}{U_E} \approx -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (5-7)$$

Mit den beiden Widerständen R_3 und R_4 kann die Verstärkung v_U eingestellt werden. Eine stufenlose Einstellung der Verstärkung v_U in Grenzen kann erreicht werden, wenn der Serieschaltung $R_3 + R_4$ ein Potentiometer zugefügt wird. Die Bezeichnung „potentiometrische Rückführung“ ergibt sich aus dieser oft eingesetzten Möglichkeit.

5.5.3 Differenzverstärker

Mit dem Differenzverstärker wird die Spannungsdifferenz zwischen U_{E1} und U_{E2} verstärkt.

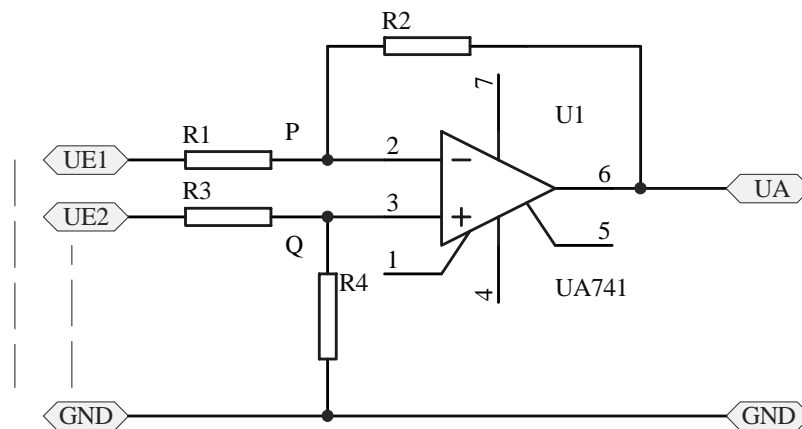


Fig. 5-11 Differenzverstärker

Im Knoten P gilt: $I_1 + I_2 = 0$ und damit

$$\frac{U_{E1} - U_4}{R_1} + \frac{U_A - U_4}{R_2} = 0$$

Im Knoten Q gilt: $I_3 - I_4 = 0$ und damit

$$\frac{U_{E2} - U_4}{R_3} - \frac{U_4}{R_4} = 0$$

Aus dem geordneten Gleichungssystem wird

$$U_A = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot U_{E2} - U_{E1} \right) \quad (5-8)$$

Sonderfälle:

- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$. In diesem Fall entspricht die Ausgangsspannung U_A der Differenz der Eingangsspannungen $U_{E2} - U_{E1}$.
- Für $R_2 = k \cdot R_1$ und $R_4 = k \cdot R_3$ wird mit $R_2 = R_4 = R$: $U_A = k \cdot (U_{E2} - U_{E1})$.
- Für $U_{E2} = 0$ ergibt sich v_U des invertierenden Verstärkers.
- Für $U_{E1} = 0$ wird $U_A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot U_{E2}$. Für $R_4 \gg R_3$ geht v_U über in jene des nichtinvertierenden Verstärkers.

5.6 Aufgaben

1. Nichtinvertierender Verstärker

- $R_1 = 6,8 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$. Wie gross ist die Verstärkung v_U ?
- $R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$. Wie gross wird R_2 für $v_U = 100$?
- Wie gross darf in a) die Eingangsspannung höchstens sein, wenn die Ausgangsspannung die Speisespannung $U_{CC} = 15 \text{ V}$ nicht überschreiten darf ?
- Was geschieht für $R_2 = 0$?

2. Invertierender Verstärker

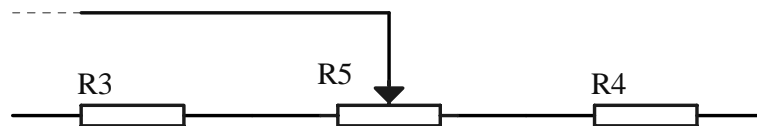
- $R_2 = 150 \text{ k}$ und dB $v_U = +32 \text{ dB}$. Wie gross wird R_1 ?
- $U_E = 2 \text{ V} + \frac{1 \text{ V}}{2 \cdot T} \cdot t$, $0 < t < 4 \text{ s}$, $T = 1 \text{ s}$, $R_1 = R_2 = R$. Wie verläuft U_A als Funktion der Zeit ?

3. Summierer

- In der Beschaltung nach Fig. 5-9 seien $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3,9 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5,6 \text{ k}\Omega$, und $R_0 = 4,7 \text{ k}\Omega$.
Wie gross wird die Spannung U_A für $U_1 = 2,3 \text{ V}$, $U_2 = 1,8 \text{ V}$, $U_3 = 2 \text{ V}$. $U_A = ?$
- In der Beschaltung nach Fig. 5-9 seien $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3,9 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5,6 \text{ k}\Omega$, und $R_0 = 4,7 \text{ k}\Omega$.
Wie gross wird die Spannung U_2 für $U_1 = 2,3 \text{ V}$, $U_3 = 1,8 \text{ V}$, $U_A = 7 \text{ V}$. $U_2 = ?$

4. Potentiometrische Rückführung

- Leiten Sie die Formel (5-6) für die Verstärkung v_U in der potentiometrischen Rückführung her.
- Wie gross wird die Verstärkung v_U für $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 82 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5,6 \text{ k}\Omega$, und $R_4 = 1,2 \text{ k}\Omega$. $v_U = ?$
- In den Rückführungszweig wird ein Potentiometer R_5 gefügt:



In welchem Bereich lässt sich die Verstärkung v_U einstellen mit $R_5 = 2,2 \text{ k}\Omega$ und den Werten aus b) ?

- Die Verstärkung v_U soll einstellbar sein von 29,54 dB bis 34 dB. Bestimmen Sie R_3 und R_4 für $R_1 = 6,8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$ und $R_5 = 2,2 \text{ k}\Omega$.

5. Differenzverstärker

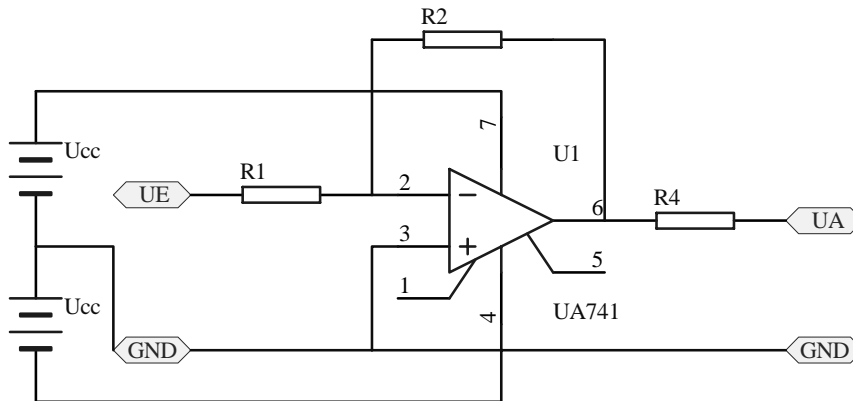
- Leiten Sie die Formel (5-8) her.
- Wie gross wird U_A für $U_{E1} = 1,1 \text{ V}$, $U_{E2} = 1,2 \text{ V}$, $R_1 = 3,9 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5,6 \text{ k}\Omega$, und $R_4 = 33 \text{ k}\Omega$?
- Es soll $\Delta U_E = U_{E2} - U_{E1}$ um den Faktor $v_U = 20$ verstärkt werden. Es sei $R = 2,7 \text{ k}\Omega$. Dimensionieren Sie den Differenzverstärker.

5.7 Auftrag

OPERATIONSVERSTÄRKER

Der Rechenverstärker (Operational Amplifier) hat in der Elektronik (Analogtechnik), seiner idealen Eigenschaften wegen, eine grosse Bedeutung gewonnen. Der OpAmp ist in vielen Schaltungen vertreten und die Kenntnis seiner Einsatzmöglichkeiten daher unumgänglich.

ZU UNTERSUCHENDE SCHALTUNG



Anmerkungen

Speisespannungen:

+ $U_{CC} = +15$ Volt an Pin 7 (Anschluss 7)

- $U_{CC} = -15$ V an Pin 4

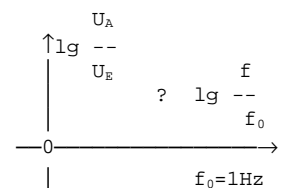
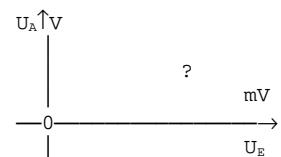
AUFTRAG

- Bauen Sie die gegebene Schaltung auf (Löten, Stecken) mit dem Operationsverstärker 741 (μ A741, MC1741, LM741, UA741, CA741 usw.) und den Widerständen $R_1 = 10$ k Ω , $R_2 = 33$ k Ω und $R_4 = 100$ Ω (je $\frac{1}{4}$ Watt).
- Messen Sie die Ausgangsspannung U_A bei unterschiedlicher Eingangsspannung U_E . (U_E gilt als Parameter). Durchlaufen Sie mit U_E den Bereich von 0 bis höchstens 5 Volt. Die Schrittwahl hängt von Ihren Feststellungen ab. (Wertetabelle im Anhang).
Wie gross wird das Verhältnis von U_A zu U_E ? Bleibt es für jedes U_E gleich gross? Möglich ist eine statistische Auswertung der Messreihe. (Für eine Grafik verwenden Sie Millimeterpapier oder Mathcad®).
- Ersetzen Sie die Speisung mit -5 V/ $+5$ V (statt -15 V/ $+15$ V) und wiederholen Sie die Messungen gemäss Punkt 2.
- Legen Sie zusätzlich einen Kondensator $C = 100$ nF in Serie vor R_1 und speisen Sie 500 mV_{pp} aus einem Sinus-Generator ein. Beobachten Sie das Verhältnis von U_A zu U_E mit zunehmender Frequenz ab 500 Hz. (Für eine Grafik verwenden Sie doppeltlogarithmisches Papier oder ein Mathematik-Programm).

Die Bezeichnungen sind unterschiedlich (je nach Hersteller).

R_4 ist zum Schutz der Ausgangsstufe eingesetzt.

U_E verwirklichen wir aus einem Speisegerät mit einstellbarer Spannung.



ANHANG: WERTETABELLEN

Wertetabelle zu Auftrag Punkt 2

U_E in V	U_A in V		U_E in V	U_A in V
0,5			4	
1			4,1	
1,5			4,15	
2			4,2	
2,5			4,25	
3			4,3	
3,5			4,35	
3,7			4,4	
3,9			4,5	

Wertetabelle zu Auftrag Punkt 3

U_E in V	U_A in V		U_E in V	U_A in V
0,2			1,2	
0,4			1,23	
0,6			1,25	
0,8			1,28	
0,9			1,3	
1			1,35	
1,05			1,4	
1,1			1,5	
1,15			1,6	

5.8 Verzeichnisse

5.8.1 Literaturverzeichnis

5.8.2 Figurenverzeichnis

Fig. 5-1	Symbol	3
Fig. 5-2	Ideale Eigenschaften	3
Fig. 5-3	Speisung	4
Fig. 5-4	Anschlüsse des OpAmp.....	4
Fig. 5-5	Erscheinungsformen	4
Fig. 5-6	Inneres Schema.....	4
Fig. 5-7	Nichtinvertierender Verstärker	5
Fig. 5-8	Invertierender Verstärker	6
Fig. 5-9	Summier - Schaltung	7
Fig. 5-10	Potentiometrische Rückführung.....	8
Fig. 5-11	Differenzverstärker.....	9

5.8.3 Stichwortverzeichnis

Differenzverstärker	9	Operationsverstärker	
Figuren.....	13	Erscheinungsformen.....	4
Gleichspannungsverstärker.....	5	ideale Eigenschaften	3
invertierend.....	6	Speisung.....	3
mit Rückführung	8	Sachwortregister	13
nichtinvertierend	5	Stichworte	13
Literatur.....	13	Summierschaltung	7
OpAmp.....	3		