

Versuch EL5

Operationsverstärker

10.06

I. Ziel des Versuchs

In diesem Versuch sollen Sie die Eigenschaften von Operationsverstärkern (Op Amp = Operational Amplifier) kennenlernen. Dabei sollen Sie die für einen stark gegengekoppelten Verstärker typischen Eigenschaften studieren und an einigen exemplarischen Schaltbeispielen den Op Amp praktisch anwenden.

II. Vorkenntnisse

Positive und negative Rückkopplung;
Eingangs- und Ausgangswiderstand einer Verstärkerschaltung,
Begriff des differentiellen Widerstandes,
Strom- und Spannungsquellen

III. Literatur

U. TIETZE, CH. SCHENK: Halbleiterschaltungstechnik
DELANEY: Electronics for the Physicist P. 137 - 143
K.D. KRAMER: Elektronik-Praktikum P. 118 f.

IV. Theorie zum Versuch

1) Allgemeines

Ein Op Amp hat (wie jeder „normale“ Verstärker) die Eigenschaft, Spannung oder Leistung zu verstärken. Während die Eigenschaften eines normalen Verstärkers durch seinen inneren Aufbau vorgegeben sind, ist ein Op Amp so beschaffen, daß seine Wirkungsweise durch äußere Bauelemente programmiert werden kann.

In Abb. 1.1 sehen Sie das Schaltsymbol eines Op Amp.

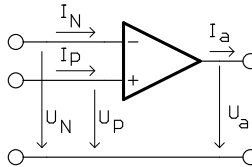


Abb. 1.1: Schaltsymbol eines Op Amp

Ein Op Amp verstärkt die Differenz der Eingangsspannungen U_P und U_N :

$$U_a = v (U_P - U_N) \quad (1)$$

U_P, U_N : Eingangsklemmspannungen

v : Spannungsverstärkungsfaktor

U_a : Ausgangsspannung

Wird der positive Eingang als gemeinsamer Bezugspunkt gewählt (geerdet), so wird aus Gl. 1

$$U_a = -v U_N \quad (2)$$

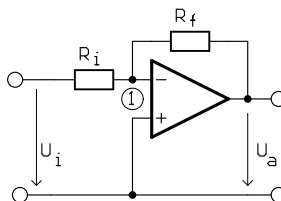
Aus diesem Grund wird der N-Eingang als invertierender Eingang bezeichnet.

2) Der ideale Op Amp

Bei einem idealen Op Amp nimmt man an, daß

- a) die Verstärkung unendlich groß ist, $v = \infty$
- b) der (differentielle) Eingangswiderstand unendlich groß ist; dies bedeutet, daß kein Eingangssignalstrom fließt,
- c) der Ausgangswiderstand Null ist.

Das Schaltbild eines solchen Op Amp im gegengekoppelten Betrieb sehen Sie in Abb. 2.1



R_f : Widerstand in der gegengekoppelten Leitung (feed back)

Abb. 2.1: Gegengekoppelter Op Amp

Aus der Bedingung a) folgt, daß das Potential im Punkt (1) gleich Null ist. Jedes von Null verschiedene Potential am Eingang wird durch die rückgeführte Ausgangsspannung kompensiert.

Aus der Bedingung b) folgt für die Ströme im Knoten (1):

$$I_{R_i} = I_{R_f} \quad (3)$$

$$\frac{U_{R_i}}{R_i} = \frac{U_{R_f}}{R_f} \quad (4)$$

Da der Eingangspunkt (1) das Potential Null besitzt, wird hieraus:

$$U_{R_i} = U_i; \quad U_{R_f} = U_A \quad (5)$$

$$U_A = U_i \frac{R_f}{R_i} \quad (6)$$

Das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsspannung wird nur durch das Widerstandsverhältnis R_i zu R_f bestimmt!

In Abb. 2.1 können die rein Ohm'schen Widerstände für den allgemeinen Fall durch komplexe Widerstände ersetzt werden. Zur Berechnung der jeweiligen Eigenschaften ist stets die Knotenregel im Punkt (1) anzuwenden (Gleichung 3) und zu berücksichtigen, daß das Potential im Punkt (1) gleich Null ist (Gleichung 5).

Beispiel I: Differenzierer

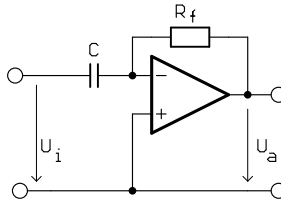


Abb. 2.2: Op Amp als Differenzierer

$$i_c = -i_{R_f} \quad (7)$$

$$i_c = + \frac{dQ_c}{dt} = +C \frac{dU_i}{dt} \quad (8)$$

$$i_{R_f} = \frac{U_a}{R_f} \quad (9)$$

$$\Rightarrow U_a = -C R_f \frac{dU_i}{dt} \quad (10)$$

Beispiel II: Integrierer

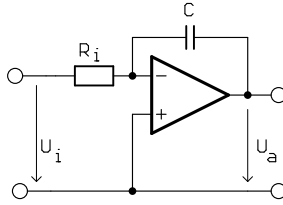


Abb. 2.3: Op Amp als Integrierer

$$i_{R_i} = -i_c \quad (11)$$

$$i_{R_i} = \frac{U_i}{R_i} \quad (12)$$

$$i_c = \frac{dQ_c}{dt} = C \frac{dU_a}{dt} \quad (13)$$

$$C \frac{dU_a}{dt} = -\frac{U_i}{R_i} \quad (14)$$

$$U_a = -\frac{1}{R_i C} \int U_i dt \quad (15)$$

Beispiel III: Konstantstromquelle

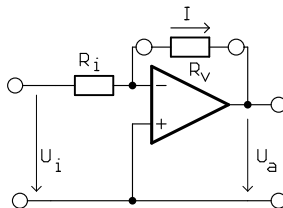


Abb. 2.4: Op Amp als Konstantstromquelle

$$I_{R_i} = -i_{R_v} = I \quad (16)$$

$$\Rightarrow I = \frac{U_i}{R_i} \quad (17)$$

Der Strom I durch den Verbraucher R_v hängt nicht mehr vom Verbrauchswiderstand ab (= Konstantstromquelle).

3) Der reale Op Amp

Der reale Op Amp hat im Gegensatz zu einem idealen Op Amp folgende Eigenschaften:

- a) Die Verstärkung hat einen endlichen Wert (typisch 10^5)
- b) Der differentielle Eingangswiderstand hat einen endlichen Wert (typ. einige $M\Omega$)
- c) Der Ausgangswiderstand ist von Null verschieden (etwa $0,1\text{ k}\Omega$)
- d) Trotz Eingangsspannung U_P , U_N gleich Null fließen Eingangsruhestrome I_{P0} ; I_{N0} . In Datenblättern werden hierzu folgende Kenngrößen angegeben:

$$\text{Eingangsruhestrom (input bias current)} \quad I_{B0} = \frac{I_{P0} + I_{N0}}{2} \quad (18)$$

$$\text{Eingangsruhestromdifferenz (input offset current)} \quad I_0 = I_{P0} - I_{N0} \quad (19)$$

- e) Für U_N , U_P gleich Null ist die Ausgangsspannung U_a noch verschieden von Null. Die Spannungsdifferenz, die zwischen beiden Eingängen liegen muß, damit die Ausgangsspannung Null wird, heißt Offsetspannung:

$$\text{Offsetspannung (input offset voltage)} \quad U_0 = U_P - U_N \quad \text{für} \quad U_a = 0 \quad (20)$$

Die unter d) und e) angesprochenen Eigenschaften sind schaltungstechnischer Natur und sollen zunächst unberücksichtigt bleiben.

Zu a): Einfluß der endlichen Verstärkung:

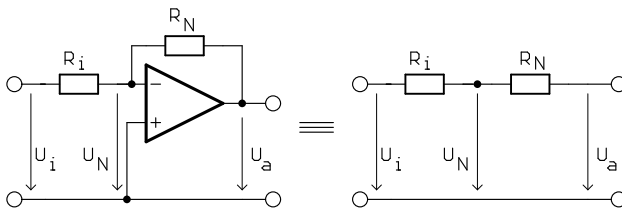


Abb. 3.1: Op Amp mit endlicher Verstärkung

Der Verstärkungsfaktor eines realen Op Amp ist definiert als

$$U_a = -v U_N \quad (21)$$

Wegen der endlichen Verstärkung v ist auch die Eingangsklemmspannung U_N in Abb. 3.1 ungleich Null.

Im Knoten (1) gilt für die Ströme

$$i_{R_i} = -i_{R_f} \quad (22)$$

$$\frac{U_i - U_N}{R_i} = -\frac{U_a - U_N}{R_f} \quad (23)$$

Mit Gl. 21 erhält man für U_i

$$U_i = -U_a \left[\frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} \left(1 + \frac{1}{v} \right) \right] \quad (24)$$

Für reale Verstärkungsfaktoren von $v \approx 10^5$ kann $(1 + \frac{1}{v})$ durch 1 ersetzt werden:

$$U_i = -U_a \left[\frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} \right] \quad (25)$$

$$\Rightarrow U_a = -U_i \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\left(\frac{R_f/R_i}{v} \right) + 1} \quad (26)$$

Für $v \gg \frac{R_f}{R_i}$ geht Gleichung 26 über in die Gleichung 6 eines idealen Op Amps.

Zu b): Einfluß des endlichen Eingangswiderstandes

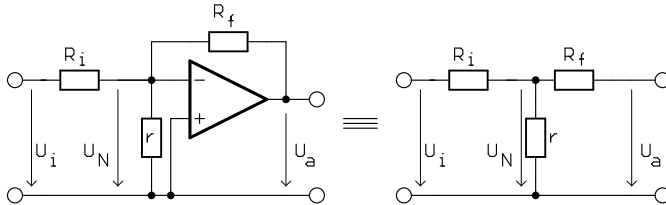


Abb. 3.2: Op Amp mit endlichem Eingangswiderstand und endlicher Verstärkung

Für die im Eingangsknoten (1) fließenden Ströme gilt:

$$\frac{U_i - U_N}{R_i} + \frac{U_a - U_N}{R_f} - \frac{U_N}{r} = 0 \quad (27)$$

Mit der Definition der Verstärkung $v = -\frac{U_a}{U_N}$ wird hieraus:

$$-\frac{U_i}{U_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} \left(1 + \frac{1}{v} \right) + \frac{R_i}{vr} \quad (28)$$

Für $v \approx 10^5$ kann wiederum $(1 + \frac{1}{v})$ durch 1 ersetzt werden:

$$-\frac{U_i}{U_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} + \frac{R_i}{vr} \quad (29)$$

$$= \frac{1}{v} + R_i \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{vr} \right) \quad (30)$$

Ein Vergleich von Gl. 30 mit Gl. 25 zeigt, daß der Eingangswiderstand r die Wirkung wie eine Parallelschaltung des Widerstandes (vr) zum Rückkoppelwiderstand R_f hat.

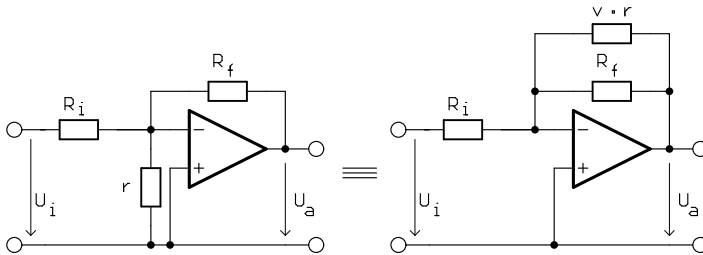


Abb. 3.3: Zur Wirkung eines endlichen Eingangswiderstandes

Zu c): Einfluß eines von Null verschiedenen Ausgangswiderstandes

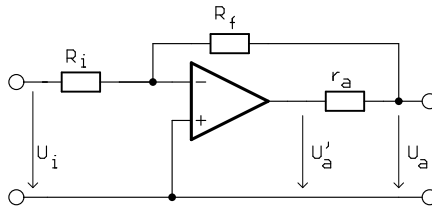


Abb. 3.4: Op Amp mit Ausgangswiderstand

Unter sinngemäßer Definition von

$$v = -\frac{U_a}{U_N}$$

wird aus Gl. 26:

$$-\frac{U_i}{U'_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f + r_a} \quad (31)$$

Unter der Annahme, daß

1. kein Ausgangsstrom fließt
2. die Eingangsklemmspannung U_N sehr klein ist im Verhältnis zu U'_a

ist das Verhältnis der Ausgangsspannung U'_a/U_a gegeben durch das Widerstandsverhältnis des aus r_a und R_f bestehenden Spannungsteilers:

$$\frac{U'_a}{U_a} = \frac{R_f + r_a}{R_f} \quad (32)$$

Eliminiert man U'_a nach Gl. 32 in Gl. 31, so erhält man

$$-\frac{U_i}{U_a} = \frac{1}{v} \frac{R_i + \frac{r_a}{v}}{R_f} \quad (33)$$

Vergleicht man Gl. 33 mit Gl. 26, so sieht man, daß der Ausgangswiderstand r_a die Wirkung wie eine Reihenschaltung des Widerstandes $\frac{r_a}{v}$ zum Eingangswiderstand hat.

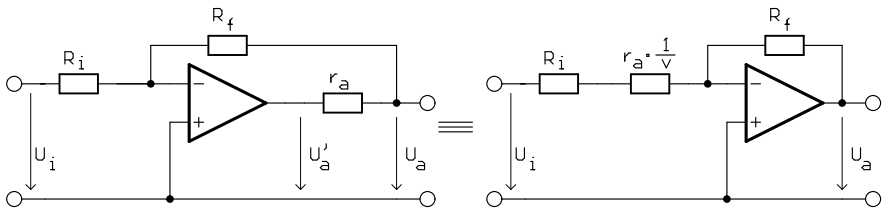


Abb. 3.5: Zur Wirkung eines Ausgangswiderstandes

V. Versuchsdurchführung

1) Experimentieraufbau

In Abb. 4.1 sehen Sie eine schematische Darstellung des Experimentieraufbaus.

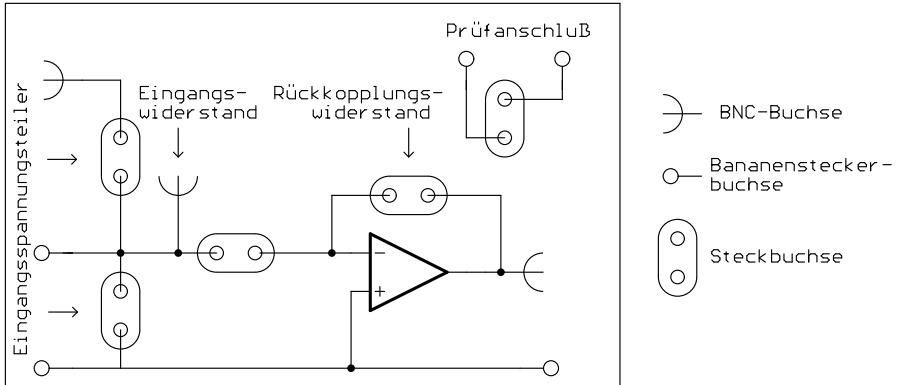


Abb. 4.1: Experimentieraufbau

Als Op Amp wird der Typ uA741 verwendet (s. Anhang). Die Zuführung der Versorgungsspannung +12 Volt, -12 Volt, 0 V, geschieht über drei Buchsen an einer Seitenwand des Aufbaugeschäfts.

Als Steckelemente sind vorhanden:

- Widerstände: 0 Ω (Drahtbrücke)
 10 Ω
 1 k Ω (2 \times)
 5 k Ω
 10 k Ω (2 \times)
 100 k Ω
Potentiometer: 5 k Ω
Kondensator: 0,22 μ F

Bei Unkenntnis des Widerstandsfarbkodes können Sie die Widerstände am Prüfanschluß messen.

Mit Ausnahme des Versuchs zur Konstantstromquelle messen Sie stets Ein- und Ausgangssignale mit dem Zweikanaloszilloskop. Der Eingang ist dabei im Modus DC (warum?). Den Oszilloskop triggern Sie extern über das Triggersignal des Funktionsgenerators.

Insbesondere beim Versuch zur Abschätzung der Leerlaufverstärkung sollten Sie die Dehnung der Zeitbasis benutzen (Schalter „ $\times 5$ “, Lupendarstellung).

Die Offsetspannung des Funktionsgenerators benutzen Sie zur Arbeitspunkteinstellung des Op Amp. Die Amplitude am Funktionsgenerators reduzieren Sie soweit, daß der Op Amp noch nicht übersteuert wird. Gegebenenfalls benutzen Sie den Eingangsspannungsteiler.

Die Versorgungsspannung des Op Amp entnehmen Sie dem Doppelspannungsnetzgerät.

2) Abschätzung der Leerlaufverstärkung eines Op Amp

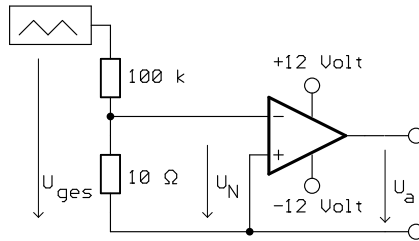


Abb. 5.1: Meßaufbau zur Abschätzung der Leerlaufverstärkung

Bei einer typischen Leerlaufverstärkung von 10^5 ist für eine Variation der Ausgangsspannung von ± 5 V die Eingangsspannung U_p um ± 50 μ V zu ändern (entsprechend $\pm 0,5$ V U_{ges} bei einem Teilfaktor von 10^{-4} des Eingangsspannungsteilers). Die Offsetspannung beträgt jedoch etwa 1 mV. Bei einem stabilen Betrieb des Op Amp muß die Offsetspannung mit solcher Stabilität kompensiert werden, daß deren Änderung klein ist gegenüber der eigentlichen Eingangsspannung. Da die Offsetspannung zudem noch temperaturabhängig ist, ist ein stabiler Betrieb des Op Amp in der Leerlaufverstärkung praktisch nicht möglich. Ein Abschätzen der Leerlaufverstärkung ist jedoch nach folgendem Meßverfahren durchführbar:

Am Eingang des Op Amps wird eine Sägezahnspannung niederer Frequenz (1 Hz) von einigen Millivolt erzeugt. Beim Erreichen der Offsetspannung folgt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung ($U_a = -v U_N$, Gl. 2). Durch Messung der Zeit, in der sich die Ausgangsspannung um ΔU_a geändert hat, läßt sich die zugehörige Eingangsspannungsänderung ΔU_N bestimmen und somit die Leerlaufverstärkung gemäß

$$v = - \frac{\Delta U_a}{\Delta U_N}$$

ermitteln. Führen Sie diesen Versuch durch und schätzen Sie dann in Gl. 26 ab, bis zu welcher gegengekoppelten Verstärkung ($= R_f/R_i$) die Abweichung von der Verstärkergleichung eines idealen Op Amps (Gl. 6) unter 1 % bleibt. Machen Sie sich klar (Abb. 3.3, 3.5) welchen Einfluß Eingangswiderstand (typ. 1 M Ω) und Ausgangswiderstand (typ. 50 Ω) bei Ihrer ermittelten Leerlaufverstärkung haben.

3) Verstärkerschaltung

Messen Sie an einem Umkehrverstärker (Abb. 2.1) für mehrere Widerstandsverhältnisse R_f/R_i die Verstärkung und vergleichen Sie Ihre Meßwerte mit Gleichung 6.

4) Differenzierschaltung

Bauen Sie eine Differenzierschaltung nach Abb. 2.2 auf. Wählen Sie die Frequenz der Eingangsspannung (= Frequenz des Funktionsgenerators) so, daß gilt: $\frac{1}{\omega C} = R_f$.

- Differenzieren Sie a) eine Sinusspannung
b) eine Rechteckspannung
c) eine Dreieckspannung.

Begründen Sie Ihre Meßergebnisse!

5) Integrierschaltung

Bauen Sie durch Vertauschen von C und R_f in der Differenzierschaltung eine Integrierschaltung nach Abb. 2.3 auf.

- Integrieren Sie a) eine Sinusspannung
b) eine Dreieckspannung
c) eine Rechteckspannung

Begründen Sie Ihre Meßergebnisse!

6) Konstantstromquelle

Bauen Sie nach Abb. 2.4 eine Konstantstromquelle auf. Die Eingangsspannung U_i entnehmen Sie dem Festspannungsausgang 5 Volt der Doppelstromversorgung.

- Welchen Strom I (siehe Abb. 2.4) erwarten Sie a) für $R_i = 1 \Omega$?
b) für $R_i = 5 \text{ k}\Omega$?

Als R_v benutzen Sie ein 5-k Ω -Potentiometer. Aus aufbautechnischen Gründen messen Sie den Strom durch R_i und nicht den durch R_v (dürfen Sie das?).

- Messen Sie für $R_i = 1 \text{ k}\Omega$
für $R_i = 10 \text{ k}\Omega$
für $R_i = 5 \text{ k}\Omega$
für $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

den Strom I für verschiedene Widerstandswerte R_v . Was zeigt sich bei $R_i = 1 \text{ k}\Omega$?

Nach dem Ohmschen Gesetz $I = \frac{U}{R}$ ist die graphische Darstellung des Stromes I gegen $\frac{1}{R}$ eine Gerade durch den Nullpunkt mit der Steigung U . Tragen Sie Ihre Meßwerte in dieses Diagramm ein und diskutieren Sie den Verlauf!

VI. Anhang

Technische Daten des uA 741:	min.	typ.	max.	Einheit
Offsetspannung		1	6	mV
Verstärkung	20	200		V/mV
Eingangswiderstand	0,3	2		M Ω
Ausgangswiderstand		75		Ω
Versorgungsstromaufnahme		1,7	2,8	mA
Versorgungsspannung	± 2	± 15	± 18	V

Quelle: Datenblatt Texas Instruments, Nov. 1970 / Sep. 2000

Universität Wuppertal

snk/pk 10.2006

TEX: 12. Oktober 2006