

Versuch EP4 Der Operationsverstärker

I. Zielsetzung des Versuches

Wichtige Halbleiterbausteine der analogen Schaltungstechnik sind die Operationsverstärker (engl. Operational Amplifier, kurz Op-Amp). Mit ihnen lassen sich die verschiedenen Verstärkerschaltungen einfacher und in den elektrischen Eigenschaften genauer aufbauen, als es mit einzelnen Transistoren möglich ist.

In diesem Versuch lernen Sie an typischen Beispielen die unterschiedlichen Einsatzgebiete eines Operationsverstärkers (TL071 oder TL081) kennen.

II. Vorkenntnisse

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

Versuchsanleitung E45 (RCL-Kreis) aus dem Anfängerpraktikum.

Versuchsanleitungen EP2 (Diode) und EP3 (Transistor) aus dem Elektronikpraktikum.

Falls Sie diese Versuche vor mehr als 2 Monaten gemacht haben, lesen Sie unbedingt nochmal diese Versuchsanleitungen durch!

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.

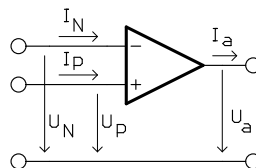


Abb. 1.1: Schaltsymbol eines Op-Amp

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

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

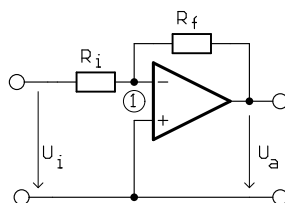
Aus diesem Grund wird der N-Eingang als invertierender Eingang bezeichnet.

2. Der ideale Op-Amp

Bei einem idealen Op-Amp nimmt man an, daß

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

Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden Sie die verschiedenen Schaltungen genauer untersuchen.

3. Wichtige Grundschaltungen

Beispiel 1: Der invertierende Verstärker

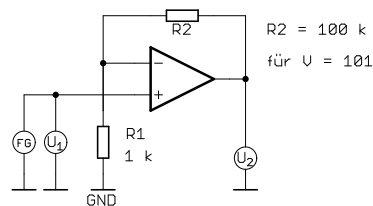
Diese Schaltung haben wir gerade betrachtet beim Op-Amp im gegengekoppelten Betrieb, siehe oben Abb. 2.1. Die Formel hierzu sei nochmal genannt:

$$U_A = -U_i \frac{R_f}{R_i} \quad (7)$$

Beispiel 2: Der nichtinvertierende Verstärker

Die Eingangsspannung wird direkt auf den nichtinvertierenden Eingang gegeben. Sie wird nur durch den Eingangswiderstand des Op-Amps belastet, dieser ist meist sehr groß (theoretisch unendlich, in der Praxis bis zu $10^{13} \Omega$), die Eingangsströme sind dadurch nur im Nano- oder Picoamperebereich (10^{-9} bis 10^{-12} A).

Die Ausgangsspannung wird über einen Spannungsteiler auf den invertierenden Eingang zurückgeführt. (In der folgenden Abbildung ist $U_1 = U_i$ und $U_2 = U_A$.)



Offenbar ist

$$U_P = U_i \quad \text{und} \quad U_N = U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

Eingesetzt in die Verstärkergrundgleichung:

$$U_A = v(U_P - U_N) \quad \text{also} \quad U_A = v\left(U_i - U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \quad (9)$$

oder

$$\frac{U_A}{v} = \left(U_i - U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \quad (10)$$

Da aber v sehr groß (theoretisch unendlich) ist, folgt: $\frac{U_A}{v} \cong 0$. Also:

$$\left(U_i - U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) = 0 \quad \text{oder} \quad U_A = U_i \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \quad (11)$$

Der Verstärkungsfaktor beim nichtinvertierenden Verstärker ist also $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$, im Gegensatz zu $-\frac{R_f}{R_i}$ beim invertierenden Verstärker.

Wenn man den Ausgang direkt mit dem invertierenden Eingang verbindet, also für den Sonderfall $R_2 = 0$ (dabei kann R_1 entfallen), ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von +1. Eine solche Schaltung wird auch Puffer (engl. Buffer) genannt. Sie hat zwar keine Spannungsverstärkung, aber durch den sehr großen Eingangswiderstand wird U_i nur mit einem winziger Meßstrom belastet, während man an U_A mehrere Milliampere entnehmen kann. Es handelt sich also um einen Stromverstärker.

Beispiel 3: Differenzierer

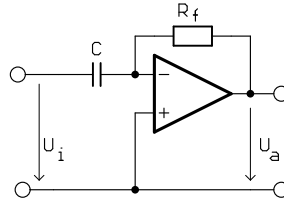


Abb. 2.2: Op-Amp als Differenzierer

$$i_c = -i_{R_f} \quad (12)$$

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

$$i_{R_f} = \frac{U_a}{R_f} \quad (14)$$

$$\Rightarrow U_a = -C R_f \frac{dU_i}{dt} \quad (15)$$

Beispiel 4: Integrierer

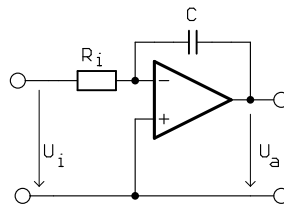


Abb. 2.3: Op-Amp als Integrierer

$$i_{R_i} = -i_c \quad (16)$$

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

$$i_c = \frac{dQ_c}{dt} = C \frac{dU_a}{dt} \quad (18)$$

$$C \frac{dU_a}{dt} = -\frac{U_i}{R_i} \quad (19)$$

$$U_a = -\frac{1}{R_i C} \int U_i dt \quad (20)$$

Beispiel 5: Konstantstromquelle

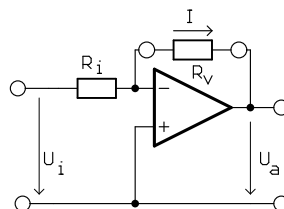


Abb. 2.4: Op-Amp als Konstantstromquelle

$$I_{R_i} = -i_{R_v} = I \quad (21)$$

$$\Rightarrow I = \frac{U_i}{R_i} \quad (22)$$

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

4. Der reale Op-Amp

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

- Die Verstärkung hat einen endlichen Wert (typisch 10^5)
- Der differentielle Eingangswiderstand hat einen endlichen Wert (typ. einige $M\Omega$ bei älteren Typen, moderne Op-Amps mit FET-Eingang wie der TL071/081 haben etwa $10^{12} \Omega$)
- Der Ausgangswiderstand ist von Null verschieden (etwa $0,1 \text{ k}\Omega$)
- Trotz Eingangsspannung U_P, U_N gleich Null fließen Eingangsruheströme $I_{P0}; I_{N0}$. In Datenblättern werden hierzu folgende Kenngrößen angegeben:

$$\text{Eingangsruhestrom (input bias current)} \quad I_{B0} = \frac{I_{P0} + I_{N0}}{2} \quad (23)$$

$$\text{Eingangsruhestromdifferenz (input offset current)} \quad I_0 = I_{P0} - I_{N0} \quad (24)$$

- 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 (beim TL071/081 typ. 3 bis 6 mV):

$$\text{Offsetspannung (input offset voltage)} \quad U_0 = U_P - U_N \quad \text{für} \quad U_a = 0 \quad (25)$$

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

Zu a): Einfluß der endlichen Verstärkung:

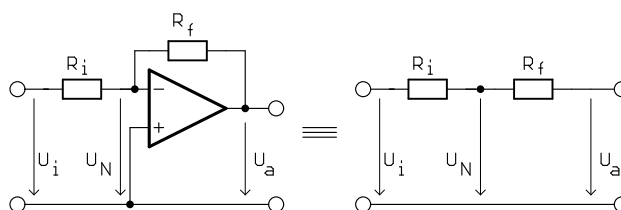


Abb. 3.1: Op-Amp mit endlicher Verstärkung

Der Verstärkungsfaktor eines realen Op-Amp ist (bei $U_P = 0$ wie hier) definiert als

$$U_a = -v U_N \quad (26)$$

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

Im Knoten (1) gilt für die Ströme

$$i_{R_i} = -i_{R_f} \quad (27)$$

$$\frac{U_i - U_N}{R_i} = -\frac{U_a - U_N}{R_f} \quad (28)$$

Mit Gl. 26 erhält man für U_i

$$U_i = -U_a \left[\frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} \left(1 + \frac{1}{v} \right) \right] \quad (29)$$

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

$$U_i = -U_a \left[\frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} \right] \quad (30)$$

$$\implies U_a = -U_i \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\left(\frac{R_f}{R_i} \right) + 1} \quad (31)$$

Für $v \gg \frac{R_f}{R_i}$ geht Gleichung 31 über in die Gleichung 6 einen idealen Op-Amps.

Zu b): Einfluß des endlichen Eingangswiderstandes

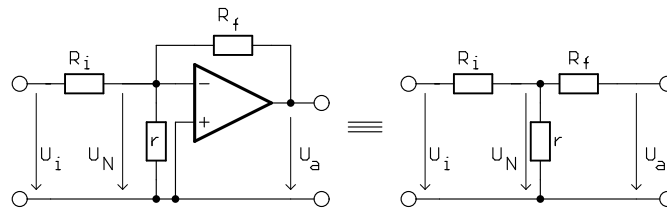


Abb. 3.2: Op-Amp mit endlichem Eingangswiderstand und endlicher Verstärkung

Für die im Eingangsknoten (1) fließenden Ströme gilt:

$$\frac{U_i - U_N}{R_i} + \frac{U_a - U_N}{R_f} - \frac{U_N}{r} = 0 \quad (32)$$

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

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

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

$$-\frac{U_i}{U_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f} + \frac{R_i}{vr} \quad (34)$$

$$= \frac{1}{v} + R_i \left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{vr} \right) \quad (35)$$

Ein Vergleich von Gl. 35 mit Gl. 30 zeigt, daß der Eingangswiderstand r die Wirkung wie eine Parallelschaltung des Widerstandes (vr) zum Rückkoppelwiderstand R_f hat.

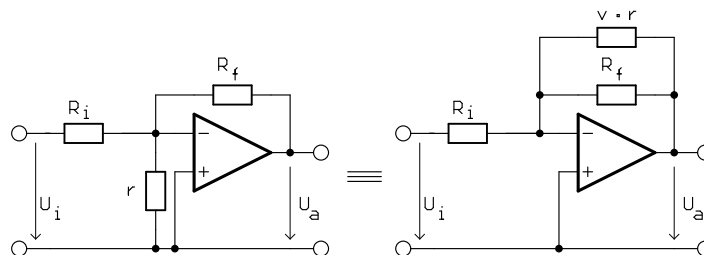


Abb. 3.3: Zur Wirkung eines endlichen Eingangswiderstandes

Zu c): Einfluß eines von Null verschiedenen Ausgangswiderstandes

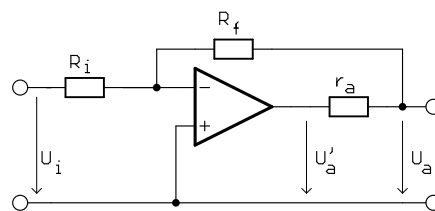


Abb. 3.4: Op-Amp mit Ausgangswiderstand

Unter sinngemäßer Definition von

$$v = -\frac{U'_a}{U_N}$$

wird aus Gl. 30:

$$-\frac{U_i}{U'_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i}{R_f + r_a} \quad (36)$$

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:

$$\frac{U'_a}{U_a} = \frac{R_f + r_a}{R_f} \quad \text{oder} \quad U_a = U'_a \frac{R_f}{R_f + r_a} \quad (U_a \text{ wird nachgeregelt}) \quad (37)$$

Eliminiert man U'_a nach Gl. 37 in Gl. 36, so erhält man

$$-\frac{U_i}{U_a} = \frac{1}{v} + \frac{R_i + \frac{r_a}{v}}{R_f} \quad (38)$$

Vergleicht man Gl. 38 mit Gl. 31, so sieht man, daß der Ausgangswiderstand r_a die Wirkung wie eine Reihenschaltung des Widerstandes $\frac{r_a}{v}$ zum Eingangswiderstand hat.

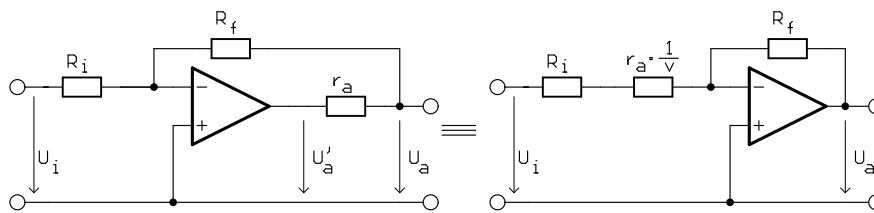


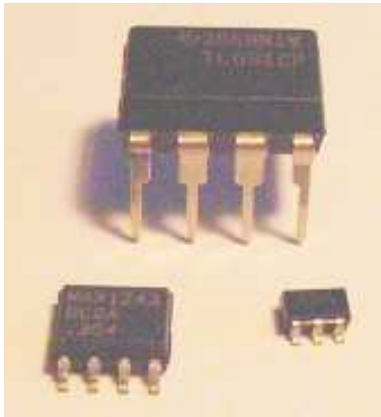
Abb. 3.5: Zur Wirkung eines Ausgangswiderstandes

V. Versuchsprogramm

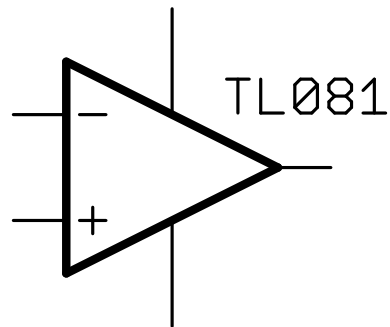
1. Allgemeines

1.1. Bauelement und Schaltsymbol

Op-Amps werden in verschiedenen Gehäusen angeboten, z.B. im ca. 1 cm × 1 cm großen DIL8-Gehäuse. Es gibt aber auch kleinere Bauformen wie SO8 oder SOT23-5, siehe Abbildung. Befinden sich zwei oder 4 Op-Amps im Gehäuse, hat es z.B. 14 statt 8 Pins und ist etwas größer.

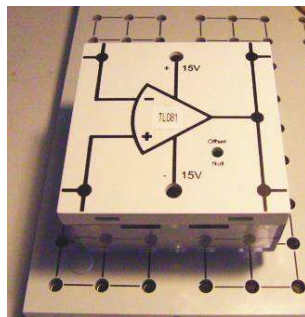


Gehäuseformen

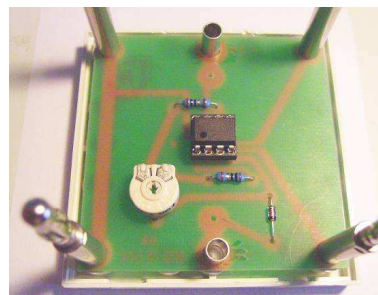


Schaltsymbol

In unserem Versuch ist der Op-Amp in einem Steckelement eingebaut. Die Versorgungsspannung wird über Buchsen auf der Frontplatte zugeführt, die eigentlichen Ein- und Ausgänge werden über Bananenstecker mit dem Steckbrett verbunden.



Steckgehäuse

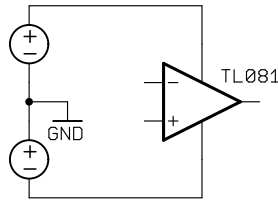


Rückansicht

1.2. Inbetriebnahme

Ein Op-Amp, der sowohl positive als auch negative Ausgangsspannungen liefern soll, braucht auch entsprechende Versorgungsspannungen. In der Praxis werden daher die meisten Op-Amps mit einer **symmetrischen Versorgungsspannung** betrieben.

Schließen Sie die Versorgungsspannung wie im folgenden Schaltbild an. Stellen Sie ± 12 V am Netzgerät ein (nicht mehr als ± 15 V!). Was müssen Sie beim Anschluß des „mittleren Pols“ (der sogenannten Signalmasse, Ground GND) beachten?



In allen folgenden Schaltbildern (außer dem unmittelbar folgenden) wird diese symmetrische Versorgung (+Ub, -Ub) als selbstverständlich vorausgesetzt und nicht mehr gesondert dargestellt, um die Schaltpläne übersichtlicher zu halten. Nur der GND-Anschluß (zugleich mittlere Pol der Versorgungsspannung) wird noch gezeichnet und wird durch einen kurzen waagerechten Balken symbolisiert. GND muß mit der Signalmasse verbunden werden (auch Balken ohne den Text „GND“ gehören zu GND). Das gilt für alle folgenden Schaltungen!

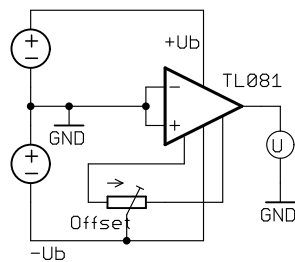
1.3. Offsetabgleich

Wie Sie bereits im Theorieteil gelernt haben, tritt beim realen Op-Amp eine Offsetspannung auf, die sich — je nach Bauform — durch eine externe Beschaltung (ein zusätzliches Potentiometer) korrigieren läßt. Auch bei unserem Op-Amp ist dieses Potentiometer bereits im Steckgehäuse eingebaut. Es handelt sich um ein Mehrgang-Trimmpotentiometer mit ca. 25 Umdrehungen für den kompletten Einstellbereich (im Foto der Rückansicht ist links unten als weißes Bauteil noch das ursprüngliche Einfach-Potentiometer zu sehen, das nur eine Dreiviertel-Umdrehung hatte).

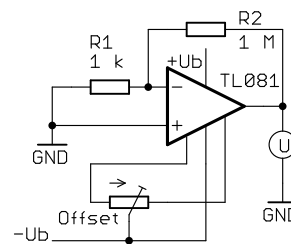
Bauen Sie die folgende Schaltung (Abb. links) auf. Verbinden Sie sowohl den invertierenden (-) als auch den nichtinvertierenden (+) Eingang mit Masse. Bei idealen Op-Amp sollte dann die Ausgangsspannung genau 0 V sein. Beim realen Op-Amp wird aber die Offsetspannung verstärkt und der Ausgang wird eine große positive oder negative Spannung haben. Stellen Sie das Offset-Potentiometer so ein, daß der Ausgang eine möglichst kleine Spannung (d.h. nahe 0 V) hat.

Wahrscheinlich wird Ihnen das kaum gelingen, da aufgrund der sehr hohen Verstärkung des Op-Amp der Ausgang immer schlagartig zwischen ca. -10 V auf ca. +10 V springt und Sie 0 V gar nicht einstellen können. In diesem Fall müssen wir die Verstärkung des Op-Amp deutlich verringern. Bauen Sie dazu die rechts abgebildete Schaltung auf und nehmen Sie für R1 1 kΩ und für R2 1 MΩ. Auch jetzt ist die Einstellung auf exakt 0 Volt sehr schwierig. Es genügt daher, wenn Sie zwischen -1 V und +1 V kommen.

Hinweis: Wenn das Offset-Potentiometer am rechten Anschlag steht, kann es vorkommen, daß der Opamp-Ausgang ungewöhnliche Spannungen liefert und der ganze Opamp nicht richtig funktioniert. Drehen Sie dann das Offset-Potentiometer wieder in die andere Richtung, bis sich der Opamp wieder normal verhält!



Offsetabgleich
(das Potentiometer ist
im Steckelement eingebaut!)



Offsetabgleich mit reduzierter
Verstärkung

Ist diese Einstellung für alle Zeit stabil? Beobachten Sie die Ausgangsspannung, wenn sich der Op-Amp mit der Zeit etwas erwärmt.

2. Op-Amp-Verstärkerschaltungen

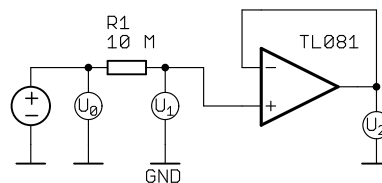
2.1. Impedanzwandler für Gleichspannung

Wir wollen nun einige wichtige Grundschaltungen mit Operationsverstärkern aufbauen.

Die einfachste Schaltung ist der Puffer oder Impedanzwandler. Hier ist der Ausgang direkt auf den invertierenden Eingang geführt. Die Spannungsverstärkung ist genau 1 (warum?). Eine solche Schaltung ist immer dann sinnvoll, wenn die Meßgröße einen hohen Innenwiderstand hat bzw. nur sehr wenig Strom liefern kann.

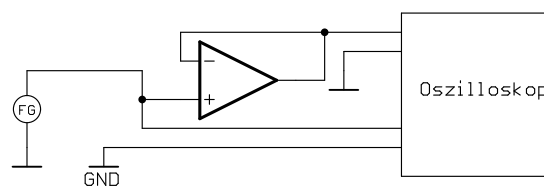
Bauen Sie die folgende Schaltung auf. Wir wollen eine Spannungsquelle mit hohem Innenwiderstand simulieren. Die Spannung des Netzgerätes (hier: der zusätzliche 5-V-Festspannungsausgang) wird deshalb über $R1 = 10\text{ M}\Omega$ an den nichtinvertierenden (+) Eingang des Op-Amp geführt. Messen Sie (*nacheinander*) mit *einem* Digitalvoltmeter (DVM) die Spannung U_0 des Netzgerätes und die Spannung U_1 am nichtinvertierenden Eingang des Op-Amp. Sie ist deutlich kleiner (warum?). Bedenken Sie, daß der Eingangswiderstand des DVM $10\text{ M}\Omega$ beträgt.

Messen Sie nun noch die Spannung U_2 am Ausgang des Op-Amp und vergleichen Sie diese mit U_0 . Achtung: Messen Sie U_2 nur, wenn U_1 *nicht* gemessen wird! (Warum?)



2.2. Impedanzwandler für Wechselspannung

Der Operationsverstärker kann keine beliebig hohen Frequenzen verarbeiten. Um dies zu verdeutlichen, ersetzen Sie das Netzgerät durch den Funktionsgenerator (FG, Sinussignal).



Geben Sie Ein- und Ausgangsspannung auf das Oszilloskop und vergleichen Sie für Frequenzen von 100 Hz bis zu 10 MHz. Bis zu welcher Frequenz würden Sie den Op-Amp noch einsetzen? Geben Sie keine zu große Eingangsspannung auf den Op-Amp (Übersteuerung/Verzerrung des Ausgangssignals).

2.3. Spannungsverstärker für Wechselspannung

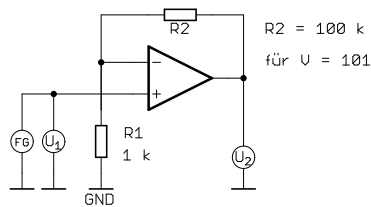
Die folgende Schaltung ermöglicht es, Spannungen um einen Faktor größer als 1 zu verstärken. Bauen Sie die folgende Schaltung auf mit $R1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R2 = 100\text{ k}\Omega$. Geben Sie eine kleine Sinusspannung $U1$ auf den Eingang, indem Sie am Funktionsgenerator beide Tasten „20 dB“ einrasten, wodurch die Generatorspannung 100mal kleiner wird.

Messen Sie $U1$ und $U2$ mit dem Oszilloskop. Wie groß ist die Spannung $U2$ am Ausgang des Op-Amp? Wieso ist sie um den Faktor ca. 100 (genaugenommen 101) verstärkt?

Bis zu welcher Eingangsspannung funktioniert der Verstärker verzerrungsfrei?

Prüfen Sie wie oben das Verhalten der Schaltung bei unterschiedlichen Frequenzen, zunächst bei 1 kHz. Bei zu hohen Frequenzen nimmt die Verstärkung mehr und mehr ab. Messen und notieren Sie daher die Frequenz, bei der sich die Verstärkung um 3 dB abgeschwächt hat (welcher Faktor¹ ist -3 dB?), und zwar für Verstärkungsfaktoren von 1, 11 und 101. Bilden Sie dann das Produkt aus Verstärkungsfaktor (ungeschwächt, also 1, 11, 101) und den jeweiligen -3 dB-Frequenzen. Dieses Produkt ist weitgehend konstant und wird als „Verstärkungs-Bandbreite-Produkt“ bezeichnet; es ist eine wichtige Kenngröße des Op-Amps.

¹Beachten Sie, daß dB zunächst für *Leistungsverhältnisse* definiert ist. Was müssen Sie beachten, wenn Sie *Spannungsverhältnisse* in dB ausdrücken? Lesen Sie dazu auch das Skript zum AP-Versuch E45!



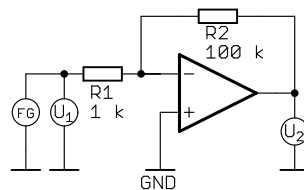
Am Digitaloszilloskop können Sie zu dieser Messung folgende Einstellungen nutzen:

Measure, *Uss* für Ch1 und Ch2

Störendes Rauschen unterdrücken Sie mit *Acquire*, *Mittelwert* (geeignete Zahl einstellen).

2.4. Invertierender Spannungsverstärker für Wechselspannung

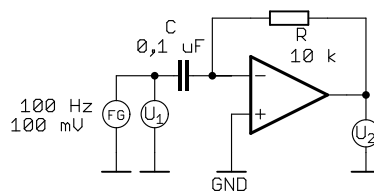
Mit der folgenden Schaltung werden Spannungen mit einem beliebigen *negativen* Faktor verstärkt. Wie müssen Sie die beiden Widerstände R1 und R2 wählen, um einen Verstärkungsfaktor -1 , -10 und -100 zu erreichen? Messen Sie die Verstärkung U_A/U_E , d.h. hier U_2/U_1 für diese 3 Verstärkungsfaktoren.



2.5. Differenzierer

Die folgende Schaltung liefert am Ausgang des Op-Amp die zeitliche Änderung der Eingangsspannung. Sie wird daher Differenzierer genannt. Geben Sie mit dem Funktionsgenerator Sinus-, Dreieck- und Rechteckspannungen bei einer Frequenz von 1 kHz (oder den im Schaltplan angegebenen 100 Hz) auf den Eingang und beobachten Sie die Ausgangsspannungen. Was erwarten Sie?

Wenn Sie mit der Rechteckspannung arbeiten, begrenzen Sie deren Amplitude am sinnvollsten auf max. 100 mV.

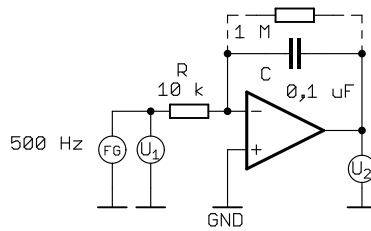


2.6. Integrierer

Im Gegensatz zum Differenzierer liefert die folgende Schaltung am Ausgang des Op-Amp das Zeitintegral über die Eingangsspannung. Sie wird daher Integrierer genannt.

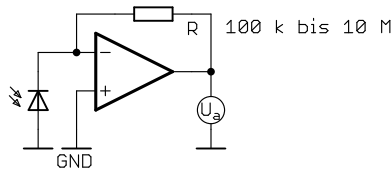
Geben Sie mit dem Funktionsgenerator Sinus-, Dreieck- und Rechteckspannungen bei einer Frequenz von 1 kHz (oder den im Schaltplan angegebenen 500 Hz) auf den Eingang und beobachten Sie die Ausgangsspannungen. Was erwarten Sie?

Bedingt durch Gleichspannungsanteile (Offsetspannungen) wird sich der Kondensator mehr und mehr aufladen, bis die positive oder negative Versorgungsspannung erreicht wird und dadurch das Ausgangssignal verzerrt wird. Man sagt, „der Integratorausgang läuft weg“. Um diesen Effekt zu verringern, sollten Sie zum Kondensator einen großen Widerstand ($1\text{ M}\Omega$) parallelschalten. Was bewirkt dieser Widerstand?



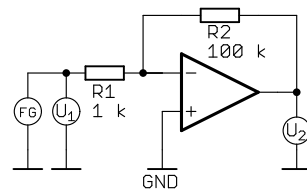
2.7. Strommessungen mit dem Op-Amp

Eine Photodiode liefert einen Photostrom, dessen Größe proportional zur einfallenden Lichtintensität ist. Sie kann aber nur Photospannungen von maximal etwa 0,6 V liefern. Genaue Messungen ergeben sich daher nur, wenn die Diode vollkommen kurzgeschlossen wird, also I_{Ph} für $U_{Ph} = 0$ gemessen wird. Dies wird mit der folgenden Schaltung erreicht (R hat den gleichen Wert wie oben). Wie arbeitet sie? Wie können Sie den Umsetzungsfaktor zwischen Eingangsstrom I_i und Ausgangsspannung U_a beeinflussen? Prüfen Sie auch hier mit dem Filtersatz (100 % bis 20 % Abschwächung), ob das Ausgangssignal mit dieser Schaltung wirklich proportional zur Lichtintensität ist.

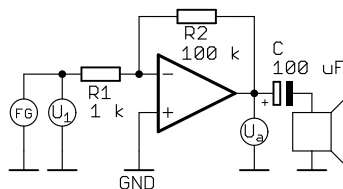


2.8. Vergrößerung der Ausgangsleistung

Wenn noch Zeit ist: Bauen Sie nochmals die Schaltung zur Spannungsverstärkung auf, stellen Sie eine Frequenz von etwa 1 kHz ein. Mit den angegebenen Werten für R1 und R2 erreichen Sie eine 100fache Verstärkung.



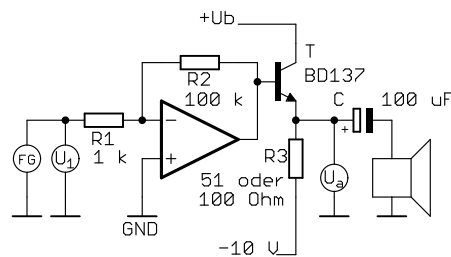
Wählen sie die Eingangsspannung so, daß Sie mit dem Oszilloskop eine Ausgangsspannung mit einer Amplitude von ± 1 Volt sehen. Ein solches Signal erzeugt am Lautsprecher einen sehr lauten Ton. Schließen Sie nun den Lautsprecher an. Er wird immer über einen Koppelkondensator (hier: $C = 100 \mu\text{F}$) angeschlossen, damit kein Gleichspannungsanteil den Lautsprecher beschädigen kann.



Die Lautstärke ist relativ gering und das Signal ist verzerrt, denn der Op-Amp ist nicht in der Lage, die für einen 8- Ω -Lautsprecher nötigen hohen Ströme zu liefern. Stattdessen bricht die Ausgangsspannung zusammen.

Wir müssen also Maßnahmen zur Stromverstärkung ergreifen. Eine Möglichkeit besteht im Nachschalten eines (Leistungs-)Transistors. Das Prinzip kennen Sie aus dem Transistorversuch, es handelt sich nämlich um einen Emitterfolger.

Schließen Sie den Lautsprecher an und beobachten Sie das Ausgangssignal. Als Transistor verwenden Sie den BD137, als R3 sind 51 Ω oder 100 Ω sinnvoll. Achten Sie darauf, daß R3 mit der negativen Versorgungsspannung verbunden werden muß (warum?). Für die im Schaltplan angegebene Spannung +Ub nehmen Sie +10 V.



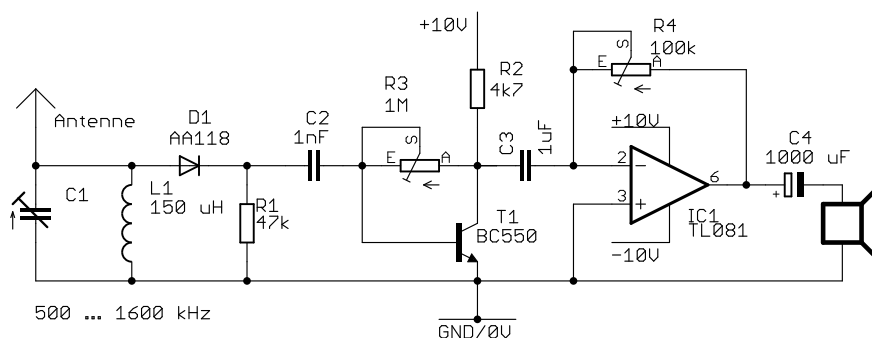
3. Mittelwellen-Radioempfänger mit LC-Kreis, Diode, Transistor und Operationsverstärker

FREIWILLIGE ZUSATZAUFGABE! Geht nicht in die Bewertung ein!

Mit den Kenntnissen und Bauteilen der bisherigen Versuche können wir einen Mittelwellenempfänger² aufbauen. Wenn Sie noch Zeit und Lust haben, bauen Sie einer der folgenden Schaltung nach (Schaltung B hat eine größere Empfindlichkeit).

Als Antenne verwenden Sie ein langes Bananenkabel. Der mit GND bezeichnete Anschluß sollte mit Erdpotential (z.B. dem Rand einer BNC-Buchse des Oszilloskops) verbunden sein. Der Empfang wird evtl. noch besser, wenn Sie das Antennenkabel in die Hand nehmen. (Hinweis zu R2: 4k7 bedeutet 4,7 k Ω . Damit man es nicht übersieht, ersetzt man in der Elektronik gern das Komma durch das Zehnerpotenzkürzel.)

Schaltung A

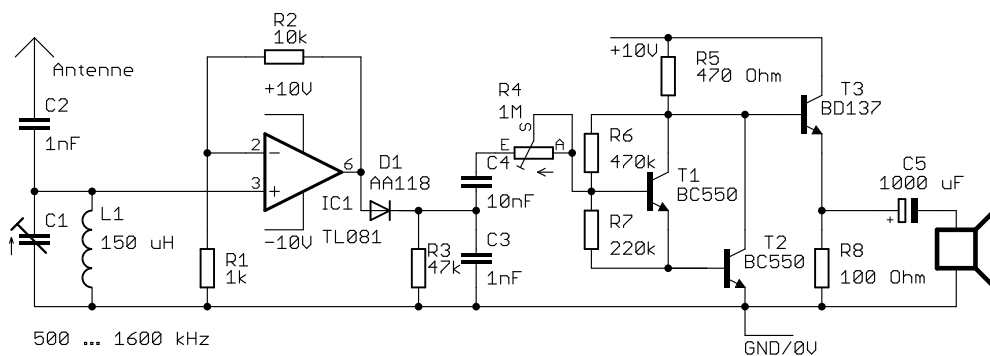


Zur Funktionsweise der Schaltung:

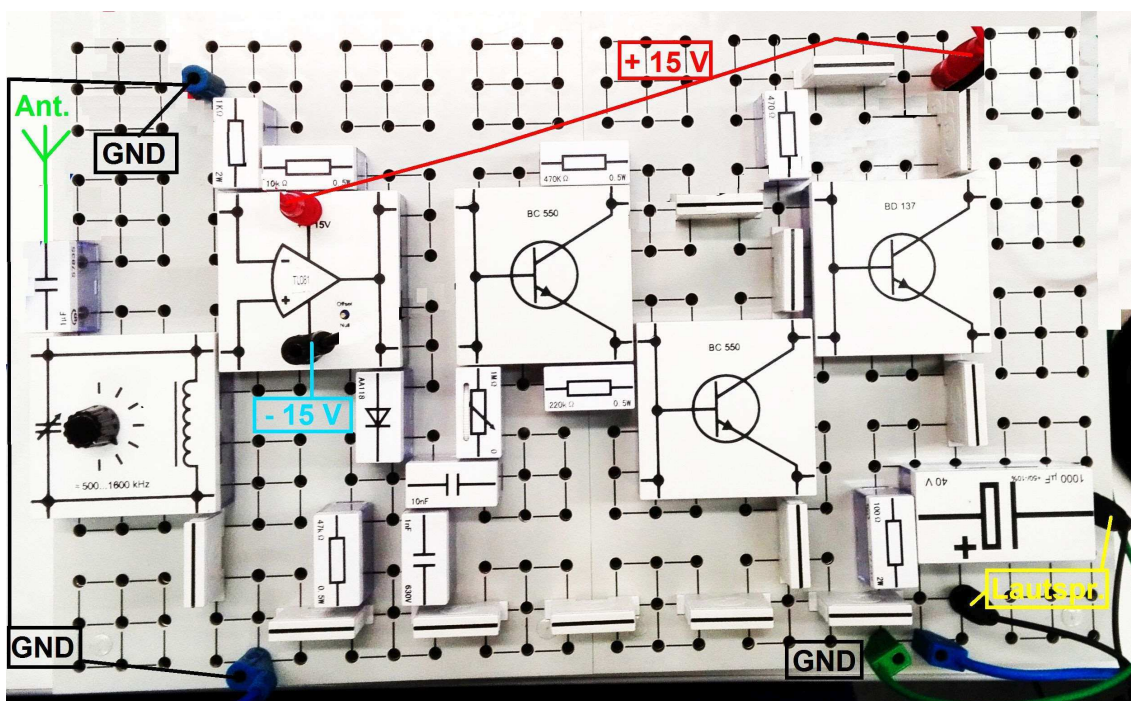
- C1 und L1 bilden einen Resonanzkreis, der nur die gewünschte Senderfrequenz herausfiltert.
- D1 (AA118) richtet die Wechselspannung gleich. Auf diese Weise wird aus dem amplitudenmodulierten Sendersignal die niederfrequente Modulation, also das hörbare Signal herausgeholt (das Sendesignal wird demoduliert).
- T1 verstärkt dieses Signal (1. Verstärkerstufe), C2 hält Gleichspannungsanteile fern. Den Arbeitspunkt müssen Sie mit R3 einstellen. Am besten beginnen Sie mit R2 = 1 M Ω .
- IC1 verstärkt nochmals und liefert insbesondere genug Strom, damit ein Lautsprecher oder Kopfhörer mit einem einigermaßen hörbaren Signal angesteuert werden kann. R4 regelt dabei den Verstärkungsfaktor und damit die Lautstärke.

²Seit Sommer 2015 ist der MW-Sender Langenberg abgeschaltet, er war der stärkste MW-Sender in der Umgebung mit WDR2 auf 720 kHz; Ende 2015 wurden auch alle anderen deutschen MW-Sender abgeschaltet. Wir betreiben am Praktikumsnachmittag daher einen Prüfsender, der nur wenige Meter Reichweite hat.

Schaltung B



Um alle Bauelemente dieser Schaltung gut auf dem Steckbrett unterzubringen, können Sie sich an folgendem Musteraufbau orientieren. Die Versorgung des Operationsverstärkers kann ± 10 bis 15 Volt betragen:



Zur Funktionsweise der Schaltung:

- C1 und L1 bilden einen Resonanzkreis, der nur die gewünschte Senderfrequenz herausfiltert. C2 hält niederfrequente Störungen fern.
- Die Wechsellspannung am LC-Kreis wird zuerst extrem hochohmig (d.h. ohne den Kreis zu belasten und zu dämpfen) mit dem Operationsverstärker 10fach verstärkt. Eine höhere Verstärkung ist bei knapp 1 MHz mit diesem Operationsverstärkertyp nicht möglich (Verstärkungs-Bandbreite-Produkt beachten!)
- D1 (AA118) richtet die Wechsellspannung gleich. R3 ist der Lastwiderstand der Diode. Auf diese Weise wird aus dem amplitudenmodulierten Sendesignal die niederfrequente Modulation, also das hörbare Signal herausgeholt (das Sendesignal wird demoduliert). Der Kondensator C3 filtert die Hochfrequenz heraus.
- Der aus zwei Transistoren T1 und T2 (BC550) bestehende Darlingtonverstärker belastet die Filterschaltung nur wenig und verstärkt das Signal nochmals. Die Widerstände R6 und R7 dienen zur Einstellung des Arbeitspunktes. Mit dem Potentiometer R4 kann die Lautstärke eingestellt werden. C4 hält Gleichspannungsanteile fern, R5 ist der Kollektorwiderstand.
- Der Leistungstransistor T3 (hier unbedingt nur den BD137 nehmen!) ist als Emitterfolger geschaltet und sorgt als Stromverstärker für genügend Leistung am Lautsprecher. C5 (Polung beachten!) hält Gleichspannungsanteile vom Lautsprecher fern.