

Versuch C14: Operationsverstärker

1. Literatur: W. Walcher, Praktikum der Physik

Stichworte: Eigenschaften des unbeschalteten OP, Rückkopplung, parametrischer Verstärker, (nicht)invertierender Verstärker, Impedanzwandler, Addierer, Subtrahierer, Differenzierer, Integrierer, Zeitverhalten durch äußere Beschaltung

2. Grundlagen

Ein Operationsverstärker (OP) besteht aus der in einem Chip integrierten Zusammenschaltung mehrerer gleichstromgekoppelter Transistoren. Ein OP hat ohne äußere Beschaltung eine extrem hohe Leerlauf-Spannungsverstärkung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal (bis zu 10^5). Wesentlich für die Eigenschaften eines OP sind darüber hinaus der sehr hohe Widerstand seiner Eingänge (einige MOhm), d.h. die zur Verstärkung erforderlichen Ströme des Eingangssignals sind sehr gering (einige nA), sowie der relativ niedrige Ausgangswiderstand (einige 10 Ohm).

Der OP ist daher sehr gut als Bauelement in elektronischen Schaltungen geeignet, bei denen Eigenschaften wie z.B. die Spannungsverstärkung aber auch die allgemeine Umformung von Signalspannungen wie -strömen nicht durch die Eigenschaften des Verstärker-Chips selbst, sondern lediglich durch seine äußere Beschaltung, d.h. durch geeignete *Rückkopplung* zwischen Eingangs- und Ausgangsseite bestimmt werden.

Ein Operationsverstärker stellt damit einen sog. *parametrischen Verstärker* dar, bei dem die Verstärkereigenschaften durch die Parameter der äußeren Beschaltung festgelegt sind. Operationsverstärker wurden primär als analoge Rechenverstärker entwickelt, finden heute aber auch in der Digitaltechnik z.B. als Signalumformer Anwendung.

Abb. 1a zeigt das Schaltsymbol eines Operationsverstärkers, dessen funktionale Eigenschaften wie Addition, Subtraktion, Differenzation und Integration anhand verschiedener äußerer Beschaltungen im vorliegenden Versuch untersucht werden.

Der OP hat einen sog. *invertierenden Eingang* (-) mit Spannung U_1 , einen *nichtinvertierenden Eingang* (+) mit Spannung U_2 sowie einen *Ausgang* mit Spannung U_A jeweils gegen Masse. Zur Energieversorgung ist der Verstärker an ein Netzgerät mit stabilisierten Spannungen ± 15 V (gegen Masse) angeschlossen.

Die Spannung U_1 des invertierenden Eingangs erzeugt eine um dem Faktor V_0

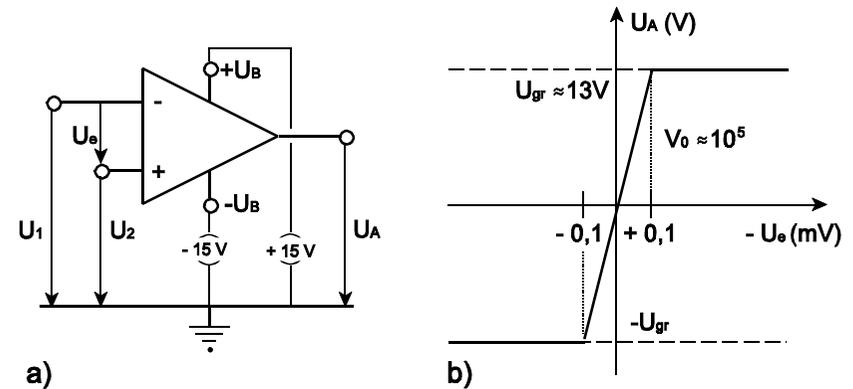


Abb. 1: a) Schaltsymbol des Operationsverstärkers mit Anschlüssen der Eingänge $U_{1,2}$, des Ausgangs U_A sowie der Betriebsspannungen $\pm U_B$; b) Kennlinie $U_A(-U_e)$ des unbeschalteten Operationsverstärkers bei einer Leerlaufverstärkung $V_0 \approx 10^5$ mit Grenzspannung $U_{gr} \approx 0,9 U_B$

verstärkte Ausgangsspannung U_A umgekehrter Polarität, die Spannung U_2 des nichtinvertierenden Eingangs eine um dem Faktor V_0 verstärkte Spannung U_A gleicher Polarität. Dies bedeutet, dass die Ausgangsspannung U_A durch die Differenz $U_e = U_1 - U_2$ der Eingangsspannungen und die Verstärkung V_0 festgelegt ist:

$$U_A = - V_0 U_e = - V_0 (U_1 - U_2) \quad (1)$$

Abb. 1b zeigt die Kennlinie des unbeschalteten OP, die Ausgangsspannung U_A als Funktion der Spannungsdifferenz $-U_e$ der Eingänge. Bei der hohen Verstärkung V_0 von etwa 10^5 zwischen Eingangssignal $-U_e$ und Ausgangssignal U_A reicht eine Eingangsspannung von ca. $100 \mu\text{V}$ aus, um die maximale Ausgangsspannung $\pm U_{gr}$ von ca. 90 % der Betriebsspannung zu erzeugen. Der OP dient ohne weitere Beschaltung lediglich als Komparator: Für $U_1 > U_2$ ist $U_A = -U_{gr}$, für $U_1 < U_2$ ist $U_A = +U_{gr}$.

Anmerkung: Da nicht Gegenstand des vorliegenden Versuchs, wird hier lediglich erwähnt, dass sowohl die Leerlauf-Verstärkung V_0 als auch die Verstärkung V und die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangssignal des beschalteten OP (s.u.) von der Frequenz ν der Eingangsspannung abhängt. Unterhalb einer Grenzfrequenz ν_g (V) ist V in etwa unabhängig von ν , oberhalb ν_g nimmt V etwa $\sim \nu^{-1}$ ab.

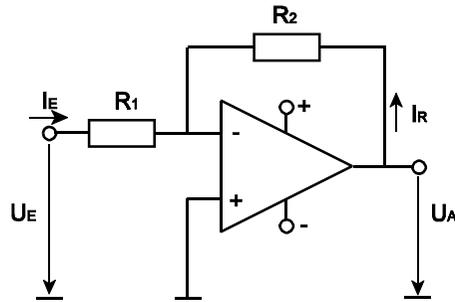


Abb. 2: Invertierender Verstärker

2.1 Invertierender Verstärker

Abb. 2 zeigt die Schaltskizze des beschalteten invertierenden OP. Das Eingangssignal U_E ist über den Widerstand R_1 , der Verstärkerausgang U_A über den Widerstand R_2 mit dem invertierenden Eingang (-) verbunden. Der nichtinvertierende Eingang (+) liegt an Masse. Da die Spannungsdifferenz $U_c = U(-) - U(+)$ der Eingänge im Vergleich zur Ausgangsspannung U_A sehr gering ist, liegt der invertierende Eingang (-) im Vergleich zu U_E und U_A quasi auf Massepotential. Der Strom I_E ist damit U_E/R_1 , der Strom $I_R = U_A/R_2$. Aufgrund des sehr geringen Eingangsstroms der Eingänge (-) und (+) gilt nach der Knotenregel ($\Sigma I = 0$ an einem Knotenpunkt) $I_E = -I_R$. Hieraus folgt für die Verstärkung V des invertierenden OP:

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

Infolge der Gegenkopplung des Ausgangs auf den Eingang ist die Verstärkung vollständig durch die äußere Beschaltung (hier R_1 und R_2) festgelegt.

Anmerkung: Ist die Eingangsspannung U_E konstant, z.B. durch eine Zenerdiode stabilisiert, d.h. unabhängig vom Strom I_E infolge der Belastung mit dem Widerstand R_1 , so ist I_E und damit $I_R = U_A/R_2$ ebenfalls konstant. Die Schaltung, Abb. 2, stellt unter diesen Voraussetzungen eine mit R_1 (bzw. R_2) einstellbare *Konstantspannungsquelle* U_A bezüglich eines variablen Lastwiderstandes R_A dar. Zum anderen liefert die Schaltung einen konstanten Strom $I_R = I_E$ durch einen variablen Lastwiderstand $R_2 = R_L$. Sie dient dann als *Konstantstromquelle* I_R .

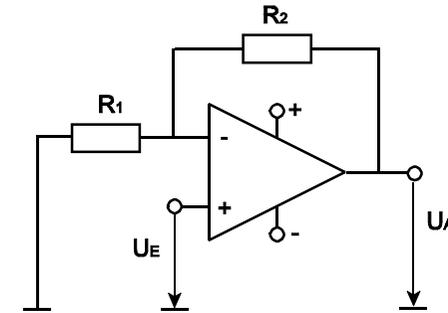


Abb. 3: Nichtinvertierender Verstärker

2.2 Nichtinvertierender Verstärker

Die Schaltung des nichtinvertierenden OP, Abb.3, ähnelt der von Abb. 2, nur dass hier R_1 an Masse liegt und am nichtinvertierenden Eingang (+) die Eingangsspannung U_E . Aufgrund der geringen Spannung zwischen den Eingängen ist $U(-) \approx U(+)$ und damit der Strom durch R_1 $I_1 = U_E/R_1$. Aufgrund des geringen Eingangsstroms fließt durch die Widerstände R_1 und R_2 der gleiche Strom, sie wirken als Spannungsteiler von U_A . Die Spannung $U(-)$ ist daher $R_1/(R_1 + R_2) U_A$. Hieraus folgt für die Verstärkung V des nichtinvertierenden OP:

$$V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

Anmerkung: Wird in der Schaltung des nichtinvertierenden Verstärkers der Ausgang mit dem invertierenden Eingang direkt verbunden ($R_2 = 0$) und die Verbindung über R_1 zu Masse weggelassen ($R_1 \rightarrow \infty$), ist mit Gl. (3) die Verstärkung $V = 1$, $U_A = U_E$. Die Schaltung arbeitet als sog. *Impedanzwandler*, da der Eingangswiderstand sehr hoch, der Ausgangswiderstand jedoch gering ist.

2.3 Addierer, Subtrahierer

Abb. 4 zeigt eine Kombination der Schaltungen Abb. 2 und 3: Zwei Eingangsspannungen U_1 und U_2 sind über die Widerstände R_1 bzw. R_2 auf den invertierenden Eingang (-) geschaltet, eine weitere Eingangsspannung U_3 über den Spannungsteiler $R_3 - R$ auf den nichtinvertierenden Eingang (+).

Nach dem zuvor angewandten Schema ergibt sich: $U(+)$ \approx $U(-) = R/(R+R_3) U_3$.

- C14.5 -

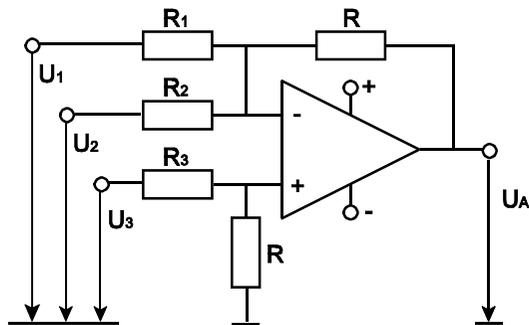


Abb. 4: Addierer bzw. Subtrahierer

Ferner ist $I_1 \approx (U_1 - U(+))/R_1$, $I_2 \approx (U_2 - U(+))/R_2$ und $I_R \approx (U_A - U(+))/R$. Mit der

Wahl $R_1 = R_2 = R$ ergibt sich aus der Knotenregel $I_1 + I_2 = -I_R$:

$$U_1 + U_2 - 2U(+) \approx U(+) - U_A \quad \text{bzw.} \quad U_A \approx 3U(+) - (U_1 + U_2) \quad (4)$$

Mit der Wahl $R_3 = 2R$ bzw. $U(+)=U_3/3$ folgt:

$$U_A \approx U_3 - (U_1 + U_2) \quad (5)$$

Der Verstärker arbeitet in der Beschaltung Abb. 4 bei geeigneter Wahl der Widerstände R_1 , R_2 u. R_3 als Addierer bzw. Subtrahierer.

2.4 Differenzierer

In der Schaltung, Abb.5, ist anstelle des Widerstands R_1 der Schaltung des invertierenden Verstärkers (Abb. 2) ein Kondensator der Kapazität C geschaltet.

Betrachtet wird zunächst die Schaltung ohne die gestrichelt gezeichneten Bauelemente R_1 und C_1 . Liegt eine zeitlich konstante Eingangsspannung U_E am Kondensator und ist dieser entsprechend der Beziehung $Q = C U_E$ aufgeladen, dient der Kondensator als Gleichstromsperre des Eingangs und bewirkt, dass damit auch der Strom I_R des Ausgangs und die Spannung U_A Null ist.

Eine zeitlich variable Eingangsspannung U_E hat dagegen einen Lade- bzw. Entladestrom I_E des Kondensators zur Folge. Die zeitliche Ableitung der

- C14.6 -

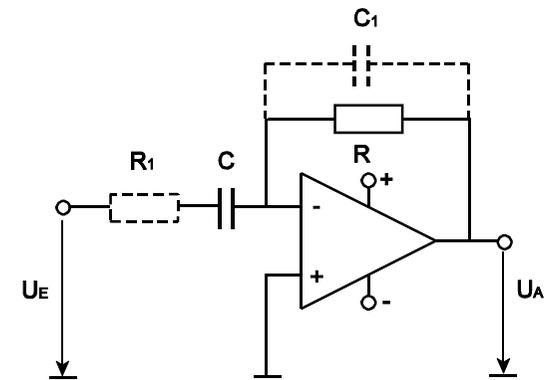


Abb. 5: Differenzierer

Beziehung $Q = C U_E$ liefert:

$$I_E = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_E}{dt} = -I_R = -\frac{U_A}{R} \quad \text{bzw.} \quad U_A = -RC \frac{dU_E}{dt} \quad (6)$$

Die Ausgangsspannung U_A ist mit Gl. (6) proportional zur zeitlichen Änderung der Eingangsspannung U_E . Die Schaltung, Abb. 5, stellt einen *zeitlichen Differenzierer* dar.

Einschränkend muss bemerkt werden, dass die Ladung Q des Kondensators C sich nicht beliebig schnell mit einer sich ändernden Eingangsspannung U_E ändern kann. Der Auf- bzw. Entladestrom I des Kondensators ist durch den Widerstand R bzw. die maximale Ausgangsspannung U_{gr} begrenzt ($I_{max} = U_{gr}/R$).

Das typische Zeitintervall für den Lade- bzw. Entladevorgang des Kondensators ist $\tau = RC$. In diesem Intervall ist der (mit $e^{-t/\tau}$ abfallende) Lade- bzw. Entladestrom auf $1/e$ (ca. ein Drittel) des Anfangswertes abgefallen. Für Zeitintervalle $t > \tau$ ist daher die Ladung des Kondensators $Q \approx C U_E$. Eine strenge Proportionalität der Ausgangsspannung U_A zur zeitlichen Ableitung der Eingangsspannung U_E ist jedoch auf Spannungen mit Periodendauern $T \gg \tau$ bzw. Frequenzen $\nu \ll 1/\tau$ beschränkt.

Dies verdeutlicht Abb. 6. In ihr ist als Eingangsspannung $U_E(t)$ eines als Differenzierer geschalteten OP eine Rechteckspannung der Grundfrequenz ν bzw. Periode T dargestellt. Die Rechteckspannung enthält viele Oberwellen der

- C14.7 -

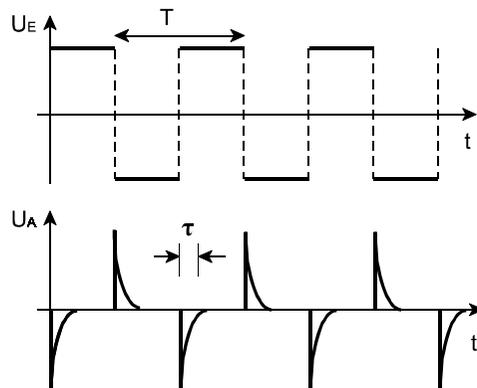


Abb. 6: Zeitverhalten der Ausgangsspannung $U_A(t)$ beim Differenzierer für eine Rechteckspannung $U_E(t)$ am Eingang.

vielfachen Frequenz $n \cdot v$ (vergl. Versuch C3: *Fourieranalyse akustischer und elektrischer Schwingungen*). Die korrekte zeitliche Ableitung einer Rechteckspannung ist eine Spannung, die aus einer Reihe abwechselnd positiver und negativer δ -Peaks bei den Sprungstellen der Rechteckspannung besteht. Die in Abb. 6 gezeigte Ausgangsspannung $U_A(t)$ des Differenzierers besitzt zwar an den Sprungstellen der Rechteckspannung positive und negative Peaks mit jeweils (dem Betrage nach) steil ansteigender Flanke, dagegen eine lediglich mit der Zeitkonstanten $\tau = RC$ exponentiell abfallende Flanke. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, inwieweit die Ausgangsspannung des Differenzierers die wahre zeitliche Ableitung der Eingangsspannung darstellt.

Anmerkung: Ein mit C in Reihe geschalteter Widerstand R_1 ($\ll R$) in der Schaltung des Differenzierers, Abb. 5, bewirkt, dass der Strom für hohe Frequenzen eingangsseitig begrenzt wird und der Betrag der maximalen Ausgangsspannung U_{Amax} unterhalb der Grenzspannung bleibt. Für kleine Frequenzen ist $R_1 \ll R_C = 1/\omega C$; die Schaltung arbeitet als Differenzierer. Für große Frequenzen ist umgekehrt $R_1 \gg R_C$; die Schaltung arbeitet dann als invertierender Verstärker ($V = -R/R_1$). Eine weitere Aufgabe des Widerstands R_1 ist die Veränderung der Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung. Diese beträgt für hohe Frequenzen bei der RC-Kombination am invertierenden Eingang nahezu 2π , die Schaltung neigt daher zu Schwingungen. Der Kondensator C_1 ($\ll C$) parallel zu R vermindert (wie auch R_1) das am Ausgang verstärkte Rauschen des Eingangs. Bei hoher Frequenz arbeitet die Schaltung dann als Integrierer (s.u.). Man dimensioniert R_1 und C_1 so, dass $R_1 C = R C_1$.

- C14.8 -

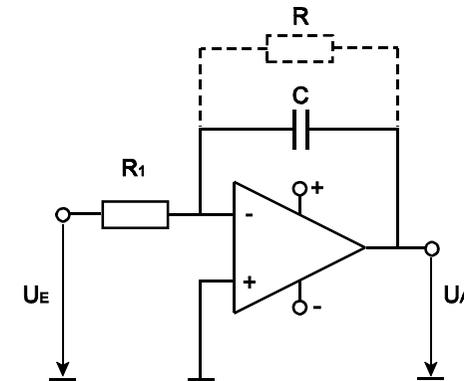


Abb. 7: Integrierer

2.5 Integrierer

Abb. 7 zeigt die Schaltskizze des OP als Integrierer. Hier ist anstelle des Widerstands R_2 beim invertierenden Verstärker (Abb. 2) ein Kondensator der Kapazität C zwischen invertierenden Eingang und Ausgang geschaltet, zusätzlich parallel dazu ein Widerstand R ($\gg R_1$).

Liegt (für die Schaltung ohne R) am Eingang eine zeitlich konstante bzw. zeitlich variable positive Spannung U_E , so fließt ein konstanter bzw. zeitlich variabler positiver Strom $I_E = U_E/R_1 = -I_C = -C dU_C/dt$. Die Spannung am Kondensator $U_C = U_A$ nimmt linear mit der Zeit bzw. stetig ab, bis sie die Grenzspannung $-U_{gr}$ erreicht. Integration der Zeitabhängigkeit zwischen U_E und U_A liefert:

$$U_A = - \frac{1}{R_1 C} \int U_E dt + \text{const.} \quad (7)$$

Die Schaltung, Abb. 7, arbeitet als Integrierer. Zur Integration zeitabhängiger Signale wie Wechselspannungen verschiedener Frequenz ist es oft notwendig, selbst geringe Gleichspannungsanteile zu unterdrücken, da anderenfalls der Wert der Ausgangsspannung schnell den der Grenzspannung annimmt. Dies wird durch den Widerstand R parallel zu C erreicht. Für große Frequenzen ist $R_C = 1/\omega C \ll R$; der Widerstand R kann vernachlässigt werden. Umgekehrt ist für Wechselspannungen geringer Frequenz bzw. Gleichspannungen $R_C \gg R$; die Schaltung arbeitet dann als invertierender Verstärker der Verstärkung $V = -R/R_1$.

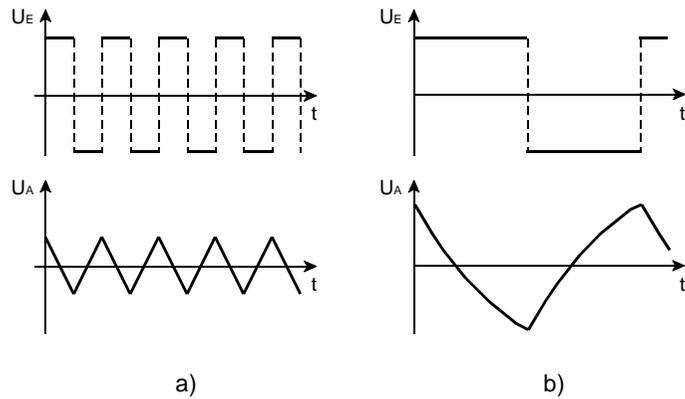


Abb. 8: Eingangssignal U_E der Rechteckspannung und Ausgangssignal U_A des Integrierers, Schaltung Abb.7: a) für große, b) für kleine Frequenzen schematisch

Abb.8 zeigt schematisch den frequenzabhängigen Einfluss des Widerstands R in der Schaltung des Integrierers, Abb. 7, auf den Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A . Für a) hohe Frequenzen der Rechteckspannung $U_E(t)$ ist die maximale Ladung $Q = C U_A$ des Kondensators und damit die Ausgangsspannung U_A klein gegenüber einer Maximalspannung $U_E R/R_1$ und nahezu proportional zum zeitlichen Integral der Spannung U_E . Dagegen ist b) für niedrige Frequenzen die Ausgangsspannung U_A deutlich nichtlinear vom zeitlichen Integral der Spannung U_E abhängig.

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bauen Sie die Schaltung des Operationsverstärkers als Komparator auf und untersuchen Sie dessen Funktionsweise.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie in der Schaltung des invertierenden OP die Verstärkung V sowie die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangssignal für verschiedene Rückkopplungswiderstände R_2 .
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Funktionsweise des nichtinvertierenden OP für verschiedene Kombinationen der Widerstände R_1 und R_2

- 4. Aufgabe:** Untersuchen Sie die Funktion des OP als Differenzierer für verschiedene Kombinationen R, C, R_1, C_1 bei Wechselspannungen verschiedener Frequenzen.
- 5. Aufgabe:** Untersuchen Sie die Funktionsweise des OP in der Schaltung als Integrierer für verschiedene Eingangssignale und Kombinationen der Widerstände/Kondensatoren.

4. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

4.1 Komparator

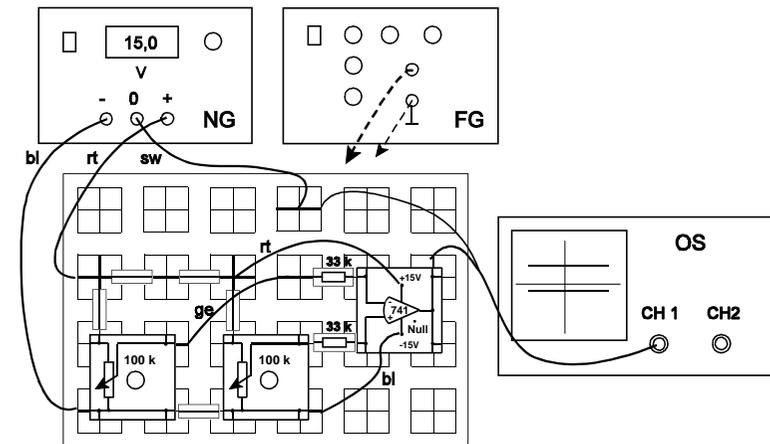


Abb. 9: Genereller Versuchsaufbau (hier 1. Schaltung: Komparator auf Steckbrett) mit Netzgerät NG ($\pm 15V$), Funktionsgenerator FG und Oszilloskop OS

Abb. 9 zeigt den generellen Versuchsaufbau, bestehend zunächst aus einem Steckbrett, auf dem die verschiedenen Schaltungen des Versuchs durch geeignete Positionierung der Schaltungselemente (OP 741 grundsätzlich mittig rechts) sowie ihrer Verbindungen durch Kurzschlussstecker oder Kabel realisiert werden können. (Das Steckbrett zeigt hier speziell die Schaltung des OP als Komparator). Zur Gleichspannungsversorgung dient ein Netzgerät NG ($\pm 15V$ gegen Masse = 0), zur Versorgung der Verstärkereingänge mit Wechselspannungen variabler Frequenz und Signalform dient ein Funktionsgenerator FG, zur Aufzeichnung der Eingangs- bzw. Ausgangsspannung des OP wird ein Zweikanal-Oszilloskop OS

angeschlossen.

Benutzen Sie zur Verbindung der Bauelemente auf dem Steckbrett mit Kabeln (der Übersichtlichkeit halber!) möglichst kurze Laborkabel mit entsprechend kodierter Farbe der Isolierung: Rot für Versorgungsspannung + 15 V, schwarz für 0 V, blau für - 15 V, gelb für sonstige Signalspannungen. In Abb. 9 sind solche Kabel entsprechend mit rt, sw, bl, ge gekennzeichnet.

Das Oszilloskop ist das Messinstrument des vorliegenden Versuches. Machen Sie sich mit der Bedienung eines Oszilloskops zur möglichst genauen Bestimmung z.B. der Frequenz, der Spitzenspannungen V_S (Amplitude) bzw. V_{SS} (doppelte Amplitude) sowie zur Funktion der Triggerung eines Wechselspannungssignals unbedingt vertraut.

Variieren Sie die Einstellungen der beiden als Spannungsteiler zwischen + und - 15V geschalteten Potentiometer P_1 und P_2 für die über 33k-Widerstände angeschlossenen Eingänge (-) und (+) des OP. Prüfen Sie für mindestens 5 verschiedene Einstellungen der Potentiometer anhand der mit dem Oszilloskop bestimmten Eingangs- sowie Ausgangsspannung nach, ob bzw. inwieweit die Schaltung als Komparator funktioniert.

Schließen Sie anstelle des auf dem Schaltbrett in Abb. 9 unten mittig gezeigten Potentiometers P_2 für den nicht invertierenden Eingang des OP den Signalausgang des Funktionsgenerators FG an (Masseleitung an Erde bzw. Null, schwarz). Bestimmen Sie mit dem an den Signaleingang der Schaltung bzw. an den Signalausgang des Funktionsgenerators angeschlossenen Kanal I des OS die Eingangsspannung und mit dem an den Signalausgang des OP angeschlossenen Kanal II des OS die Ausgangsspannung des OP für das Eingangssignal des FG: $U_{2S} = 3V$ Sinus, $\nu = 1$ kHz. Stellen Sie das Potentiometer P_1 zunächst auf einen mittleren Wert ein.

Welche Form hat die Ausgangsspannung des OP? Was ändert sich bei der Variation des Potentiometers P_1 ? Begründen Sie Ihre Beobachtung.

4.2 Invertierender OP

Abb. 10 zeigt schematisch die Beschaltung des OP als invertierenden Verstärker. Die Verbindungen zum Netzgerät und Oszilloskop sind der Übersichtlichkeit weg gelassen bzw. nur angedeutet..

Bauen Sie die Schaltung mit $R_2 = 33$ k auf und stellen sie mit dem 100 k - Potentiometer die Eingangsspannung U_E am Oszilloskop auf 0 V ein. Überprüfen Sie, ob auch die Ausgangsspannung $U_A = 0$ V beträgt. (Gegebenfalls muss mit einem Schraubendreher der Trimmer (Null) im OP-Modul so verstellt werden, dass

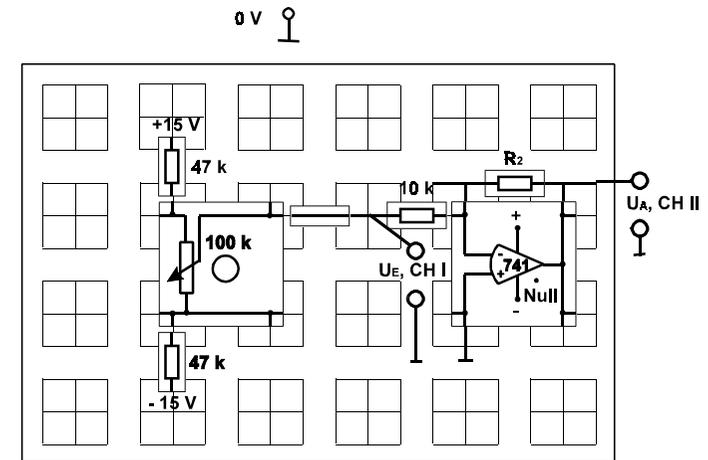


Abb 10: Schaltung des invertierenden Operationsverstärkers mit Spannungsteiler zur Variation der Gleichspannung des Eingangs

$U_A = 0$ V wird.)

Bestimmen Sie mit Rückkopplungswiderständen $R_2 = 33$ k, 10 k und 15 k für Eingangsspannungen $U_E = -1,5$ V; -1,0 V; -0,5 V; ca. 0 V; 0,5 V; 1,0 V; 1,5 V die Ausgangsspannungen U_A . Stellen Sie eine Wertetabelle auf und bestimmen Sie die jeweilige Verstärkung des OP. Welche Beziehung besteht generell zwischen U_E und U_A (Gl. 2))?

Trennen Sie den Abgriff des Potentiometers vom 10k-Widerstand des invertierenden Verstärkereingangs und legen Sie an ihn mit dem Funktionsgenerator eine Wechselspannung $U_{ES} = 1V$, $\nu = 1$ kHz an. Bestimmen Sie U_E und U_A mit dem Oszilloskop. Welche Phasenlage hat U_A bezogen auf U_E ?

4.3 Nichtinvertierender Verstärker

Abb. 11 zeigt schematisch die Schaltung des nichtinvertierenden Verstärkers auf dem Schaltbrett. Wie zuvor sind der Übersichtlichkeit halber die Verbindungen der Versorgungsspannungen und der Masseleitungen weggelassen, die Oszilloskopanschlüsse nur angedeutet.

Bauen Sie die Schaltung zunächst mit den Widerständen $R_1 = R_2 = 10$ k auf. Legen Sie mit dem Funktionsgenerator eine Spannung mit dem (Spitze-Spitze)Wert $U_{ESS} = 4$ V, $\nu = 200$ Hz an den Eingang. Vergleichen Sie mit dem Oszilloskop die Spannungen U_E und U_A . Welche Phasenlage haben U_E und U_A zueinander?

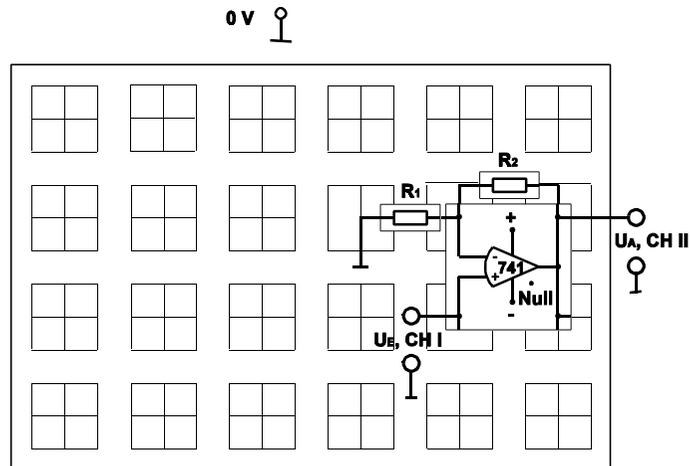


Abb. 11: Schaltung des nichtinvertierenden Operationsverstärkers

Verändern Sie die Frequenz der Eingangsspannung und prüfen Sie, ob sich die Phasenlage von U_E zu U_A ändert. Beschreiben Sie die Funktion der Widerstände R_1 und R_2 .

Ändern Sie die Eingangsspannung auf $U_{ESS} = 1\text{ V}$, $\nu = 1\text{ kHz}$. Beschalten Sie den OP mit $R_1 = 1\text{ k}$ und messen Sie mit dem Oszilloskop die Ausgangsspannung für die Widerstandswerte:

$R_2 = 0; 0,1\text{ k}; 0,47\text{ k}; 1,5\text{ k}; 2,2\text{ k}; 4,7\text{ k}; 10\text{ k}; 15\text{ k}$.

Wiederholen Sie die Messreihe mit den Widerständen $R_1 = 3,3\text{ k}$ und 10 k .

Berechnen Sie die jeweilige Spannungsverstärkung V . Tragen Sie V als Funktion des Verhältnisses R_2/R_1 getrennt für den jeweiligen Widerstand R_1 auf. Welcher Zusammenhang besteht zwischen V und R_2/R_1 ? Vergleichen Sie diesen mit Gl. (3).

4.4 Differenzierer

Abb. 12 zeigt die Ausgangsschaltung des Operationsverstärkers als Differenzierer wie zuvor schematisch. Bauen Sie die Schaltung mit $R = 10\text{ k}$ und $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ auf. Legen Sie mit dem 100 k - Potentiometer verschiedene Gleichspannungen an den Eingang. Messen Sie mit dem Oszilloskop die Ausgangsspannung. Begründen Sie das Messergebnis.

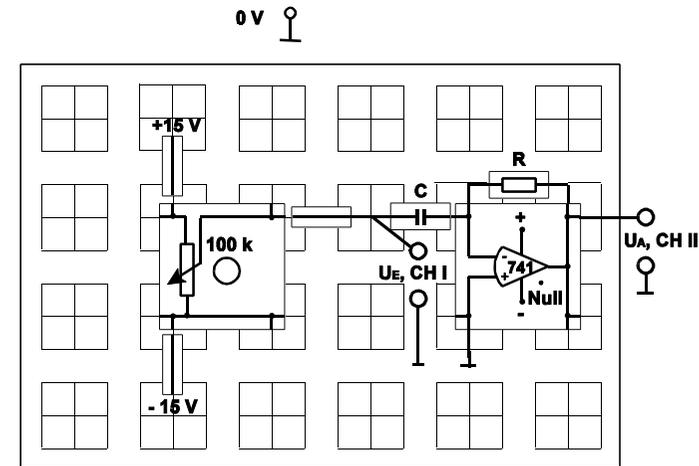


Abb. 12: Schaltung des Operationsverstärkers als Differenzierer mit Spannungsteiler zur Variation der Eingangsgleichspannung

Trennen Sie die Verbindung von Gleichspannungsquelle und Eingang und legen Sie anstelle eine Sinus-Wechselspannung mit $U_{ESS} = 0,1\text{ V}$, $\nu = 500\text{ Hz}$ an den Eingang. Beschreiben Sie das Ausgangssignal U_A .

Überbrücken Sie den Widerstand R mit einem Kondensator $C_1 = 10\text{ nF}$. Wie hat sich der Kurvenzug der Ausgangsspannung geändert? Beschreiben Sie die Phasenlage von U_A bezogen auf U_E . Vergleichen Sie die Funktion des Differenzierers mit Gl. (6).

Entfernen Sie den 10 nF - Kondensator wieder und ersetzen Sie $R = 10\text{ k}$ durch $R = 1\text{ k}$. Legen Sie eine Dreiecksspannung $U_{ESS} = 8\text{ V}$, $\nu = 100\text{ Hz}$ an. Zeichnen Sie das Oszillogramm der Eingangs- und Ausgangsspannung. Erhöhen Sie die Frequenz der Eingangsspannung auf 500 Hz . Wie ändert sich U_A ?

Bauen Sie die Schaltung entsprechend Abb. 13 mit $R = 10\text{ k}$, $R_1 = 1\text{ k}$ und $C = 10\text{ nF}$ um und legen Sie eine rechteckförmige Eingangsspannung $U_{ESS} = 2\text{ V}$, $\nu = 500\text{ Hz}$ an.

Zeichnen Sie das Oszillogramm von U_E und U_A . Begründen Sie den Verlauf von U_A (Gl. (6)).

Erhöhen Sie die Frequenz des Eingangssignals auf 5 kHz und beschreiben Sie die Änderung des Ausgangssignals. Erhöhen Sie die Frequenz auf $\nu = 100\text{ kHz}$. Welche Form hat die Ausgangsspannung nun?

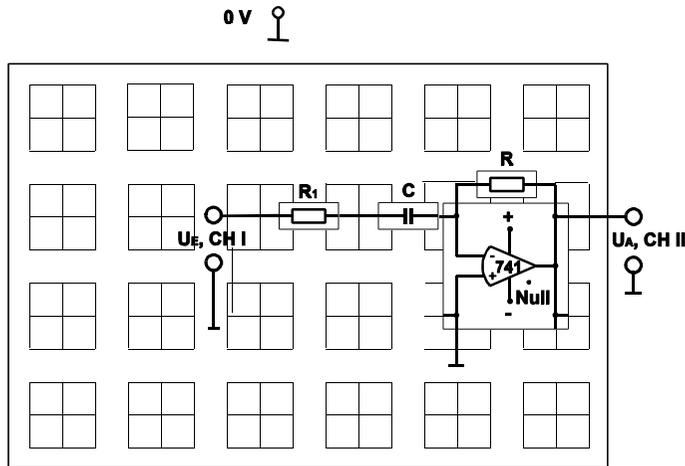


Abb. 13: Geänderte Schaltung des Differenzierers mit Entkopplungswiderstand R_1

Stellen Sie wieder eine Frequenz $\nu = 500 \text{ Hz}$ ein und überbrücken Sie den Widerstand R_1 . Beschreiben und begründen Sie die Änderung des Oszillogramms der Ausgangsspannung.

4.5 Integrierer

Bauen Sie die Schaltung entsprechend Abb. 14 mit $C = 10 \text{ nF}$, $R = 1 \text{ M}$ und $R_1 = 10 \text{ k}$ auf. Legen Sie mit dem Funktionsgenerator eine rechteckförmige Wechselspannung mit $U_{\text{ESS}} = 2 \text{ V}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$ an den Eingang des Integrierers.

Zeichnen Sie das Oszillogramm von U_E und U_A . Begründen Sie den Verlauf von U_A (Gl. (7)).

Ändern Sie die Schaltung, Abb. 14, indem Sie den Kondensator $C = 10 \text{ nF}$ durch einen mit $C = 2,2 \text{ nF}$ ersetzen. Reduzieren Sie außerdem die Amplitude des Rechteck-Eingangssignals auf $U_{\text{ESS}} = 200 \text{ mV}$ und die Frequenz auf $\nu = 100 \text{ Hz}$. Welchen Kurvenverlauf hat die Ausgangsspannung U_A nun? Welche Aufgabe hat der zu C parallel geschaltete Widerstand R ?

Bauen Sie wieder die ursprüngliche Schaltung Abb. 14 ($C = 10 \text{ nF}$, $U_{\text{ESS}} = 2 \text{ V}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$) auf. Beobachten Sie U_A , wenn R herausgenommen wird. Wie verändert sich das Oszillogramm?

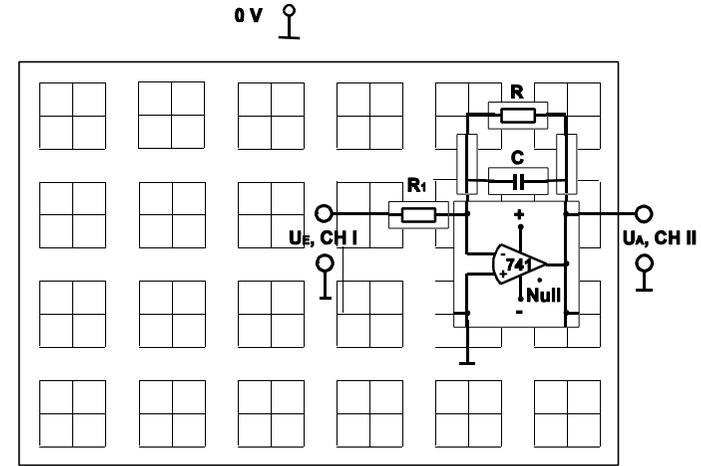


Abb. 14: Schaltung des Operationsverstärkers als Integrierer

Ändern Sie abermals die Schaltung, indem Sie wieder $C = 2,2 \text{ nF}$ wählen und das Eingangssignal auf $U_{\text{ESS}} = 2 \text{ V}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$ Sinus umstellen. Zeichnen Sie das Oszillogramm von U_E und U_A . Vergleichen Sie den Zusammenhang von U_E und U_A mit Gl. (7).

5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Welche Eigenschaften hat ein unbeschalteter Operationsverstärker (OP) ?
- 2) Auf welche Weise kann ein OP für Rechenzwecke genutzt werden?
- 3) Beschreiben Sie die Schaltung eines invertierenden bzw. nichtinvertierenden OP und geben Sie die jeweilige Verstärkung $V = U_A/U_E$ an.
- 4) Skizzieren Sie die prinzipielle Schaltung des OP als Addierer sowie Subtrahierer.
- 5) Beschreiben Sie die prinzipielle Schaltung und Wirkungsweise eines OP als Differenzierer sowie Integrierer.
- 6) Wie kann durch geeignete Beschaltung eines OP als Differenzierer bzw. Integrierer die „Übersteuerung“ des Ausgangssignals bei hohen bzw. niedrigen Frequenzen der Eingangsspannung vermieden werden?