

Operationsverstärker

Dies ist ein neu eingeführter Versuch, die Anleitung befindet sich in den letzten Zügen der Optimierung. Bitte überprüfen Sie das TeachCenter in den ersten Semesterwochen regelmäßig nach einer neuen Version (→ Datum rechts oben).

Bitte einen USB-Stick zum Versuch mitbringen!

Stichworte zur Vorbereitung:

Eigenschaften des unbeschalteten Operationsverstärkers, Rückkopplung, parametrischer Verstärker, (nicht-)invertierender Verstärker, Impedanzwandler, Addierer, Subtrahierer, Differenzierer, Integrierer, Zeitverhalten durch äußere Beschaltung, Verstärkungs-Bandbreite-Produkt

1 Grundlagen

1.1 Funktionsprinzip eines Operationsverstärkers

Ein Operationsverstärker (OPV) ist ein gleichspannungsgekoppelter Differenzverstärker mit dem invertierenden (−) und dem nichtinvertierenden (+) Eingang sowie dem Ausgang, vergleiche Abbildung 1.

Bei der elektrischen Signalverarbeitung oder -übertragung tritt häufig die Notwendigkeit einer Signalverstärkung auf. Ein *idealer Verstärker* sollte dabei die folgenden Forderungen erfüllen, Abb. 1 (links):

- möglichst hohe Verstärkung ($V = U_A/U_E \rightarrow \infty$);
- möglichst hoher *Eingangswiderstand* ($R_E \rightarrow \infty$), damit eine Spannungsquelle, die an die Eingangsklemmen des Verstärkers angeschlossen wird, nicht belastet wird;
- möglichst kleiner *Ausgangswiderstand* ($R_A \rightarrow 0$), damit die Ausgangsspannung unabhängig vom Ausgangsstrom ist, also von der Belastung durch einen angeschlossenen Verbraucher;
- möglichst kleine *Einstellzeit* ($\tau \rightarrow 0$): Das bedeutet, dass das Ausgangssignal dem Eingangssignal möglichst verzögerungsfrei folgt, so dass hohe Frequenzen übertragen und verstärkt werden können; das entspricht der Forderung: Grenzfrequenz $f_{gr} \rightarrow \infty$;
- die Ausgangsspannung soll Null sein, wenn am Eingang keine Spannung liegt.

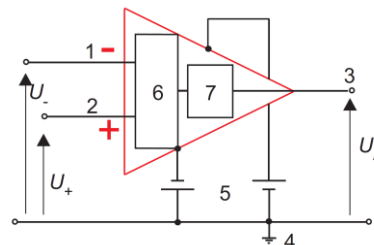
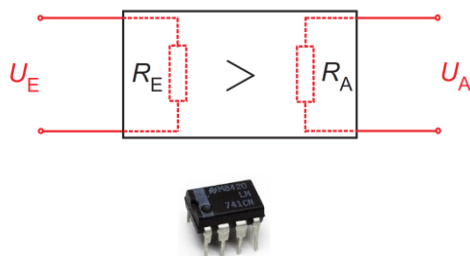


Abb. 1: Operationsverstärker. Links: schematische Darstellung zur Erklärung eines idealen Verstärkers und Foto eines OPV vom Typ 741 wie hier verwendet; rechts: Darstellung zur genaueren Funktionsweise. Abbildungen entnommen aus [1].

Mit den Operationsverstärkern ist es gelungen Verstärker zu entwickeln, die diesen idealen Eigenschaften sehr nahekommen. In der folgenden Tabelle 1 sind einige der wichtigsten Eigenschaften von Operationsverstärkern zusammengestellt: In Spalte 2 die Forderungen an den idealen Verstärker und in Spalte 3 die Werte eines typischen Operationsverstärkers (LM741).

Tabelle 1: Eigenschaften eines typischen Operationsverstärkers am Beispiel des LM741

	Ideal	LM741
Verstärkung V	∞	$2 \cdot 10^5$
Eingangswiderstand R_E / Ω	∞	$2 \cdot 10^6$
Ausgangswiderstand R_A / Ω	0	75
obere Grenzfrequenz f_{gr} / Hz	∞	$1,5 \cdot 10^6$

Bei diesen Verstärkern nutzt man nun nicht die sehr große Leerlaufverstärkung ($V_0 = 10^5$ bis 10^6) aus, sondern legt die Eigenschaften durch eine Rückkopplungsschaltung fest. Durch geeignete Wahl dieser Beschaltung (ohmscher Widerstand, Kondensator o. ä.) kann man den Verstärker nicht nur zum Verstärken mit von außen einstellbaren Verstärkungsfaktoren, sondern auch zu Operationen wie Summieren, Integrieren, Differenzieren, Logarithmieren usw. von Eingangsspannungen benutzen. Daraus leitet sich auch der Name Operationsverstärker ab (englisch: operational amplifier, abgekürzt: OpAmp). Die aus einer Vielzahl von Einzelbauelementen wie Dioden, Transistoren, ohmschen Widerständen und Kondensatoren aufgebauten Operationsverstärker werden heute ausschließlich in Form von integrierten Schaltungen (englisch: integrated circuit – IC) auf einem winzigen, gekapselten Siliziumkristall untergebracht. Nur die Anschlüsse für Eingang, Ausgang und Spannungsversorgung sind herausgeführt (vgl. Foto in Abb. 1 links). Im Folgenden wird auf die wesentlichen Baugruppen von einfachen Operationsverstärkern eingegangen.

Abbildung 1 rechts zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Verstärkers. Er besteht zunächst aus einem hochohmigen Differenzverstärker (6) mit zwei Eingängen (1: invertierender Eingang, 2: nichtinvertierender Eingang), durch den eine hohe Verstärkung des Eingangssignals erreicht wird. Meist folgt noch ein hier nicht gezeichneter Zwischenverstärker, bevor ein Impedanzwandler (7) für eine Transformation des hohen Eingangswiderstandes auf einen niedrigen Wert des Ausgangswiderstandes sorgt. Da es meist um die Verstärkung von Wechselstromgrößen geht, sind diese Widerstände im allgemeinen Scheinwiderstände oder Impedanzen. Die für den Betrieb nötige Spannungsversorgung (5), z. B. +15 V und –15 V mit gemeinsamem Bezugspunkt (4), ist hier mit eingezeichnet, wird jedoch sonst in Schaltskizzen fortgelassen und deshalb im Folgenden auch hier. Differenzverstärker sind so gebaut, dass die zu verstärkende Eingangsspannung U_E gleich der Differenz der an den beiden Eingängen liegenden Spannungen U_- und U_+ ist. Der mit „–“ bezeichnete Eingang heißt invertierend: Wenn er positiv gegen den nichtinvertierenden Eingang ist, erscheint am Ausgang eine negative Spannung. Mit dem Leerlaufverstärkungsfaktor V_0 gilt:

$$U_A = -V_0(U_- - U_+) = -V_0 U_E. \quad (1)$$

Differenzverstärker haben den Vorteil, dass Spannungen oder Störungen, die beide Eingänge in gleicher Weise beeinflussen, (praktisch) nicht verstärkt werden. Ein wichtiges Anwendungsbeispiel ist die Unterdrückung einer Temperaturdrift bei den Transistoren der beiden Eingangskanäle: So wird eine Temperaturabhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung dU_{BE}/dT ($I_B = \text{const.}$), die bei einem Einzeltransistor einige mV/K beträgt, in einer Differenzschaltung etwa um den Faktor 1000 auf wenige $\mu\text{V/K}$ reduziert.

Voraussetzung ist dabei gleiche Temperatur der beiden Eingangstransistoren, wie sie jedoch bei der heute üblichen Technik der integrierten Schaltung mit den extrem kleinen Abständen der Bauteile von wenigen μm auf dem gleichen Si-Kristallstück sehr gut erfüllt ist.

Der hier angedeutete innere Aufbau sorgt für die benötigte hohe Leerlaufverstärkung V_0 des Operationsverstärkers. Seine Eigenschaften in einer Schaltung werden jedoch nicht durch V_0 , sondern durch die Wahl einer geeigneten äußeren Beschaltung bestimmt.

1.2 Grundsaltungen

Im Folgenden werden einige Operationsverstärkerschaltungen betrachtet, mit denen mathematische Operationen in Simulationsschaltungen oder in Schaltungen der Mess- und Regeltechnik ausgeführt werden können. Die Beispiele verdeutlichen zugleich die grundsätzliche Wirkungsweise von Operationsverstärkern.

1.2.1 Invertierender Verstärker

Der nichtinvertierende Eingang ist bei der in Abbildung 2 dargestellten Schaltung auf Masse gelegt; der Ausgang ist über einen Widerstand R_2 auf den invertierenden Eingang rückgekoppelt. Da der invertierende Eingang und der Ausgang entgegengesetzte Polarität haben, spricht man von einer *Gegenkopplung*.

Bei der Berechnung von Netzwerken werden üblicherweise die Pfeilrichtungen für Ströme und Spannungen zu Beginn willkürlich festgelegt. Die Spannungen werden auf ein gemeinsames Bezugspotential, z. B. Masse bezogen. Die Gleichungsansätze müssen diesen Festlegungen entsprechen. Die tatsächlichen Richtungen ergeben sich dann aus den Vorzeichen der Rechenergebnisse. Nun zur Berechnung der Verknüpfung der Ausgangsspannung U_A mit der Signalspannung U_1 : Mit den in Abb. 2 angegebenen Pfeilrichtungen und dem Kirchhoff'schen Gesetz für den Punkt S folgt:

$$I_1 + I_2 - I_E = 0. \quad (2)$$

Aus dem Ohm'schen Gesetz folgt für die drei Ströme:

$$I_1 = (U_1 - U_E)/R_1 \quad (3)$$

$$I_2 = (U_A - U_E)/R_2 \quad (4)$$

$$I_E = U_E/R_E \quad (5)$$

Für den Verstärker gilt die Beziehung:

$$U_A = -V_0 U_E \text{ bzw. } U_E = -U_A/V_0. \quad (6)$$

Einsetzen dieser Gleichungen in das 1. Kirchhoff'sche Gesetz liefert:

$$\frac{U_1 + \frac{U_A}{V_0}}{R_1} + \frac{U_A + \frac{U_A}{V_0}}{R_2} + \frac{U_A}{V_0 R_E} = 0 \quad (7)$$

Da die Leerlaufverstärkung V_0 sehr groß ist, können alle Summanden mit V_0 im Nenner vernachlässigt werden. Es bleibt:

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_A}{R_2} = 0 \quad (8)$$

woraus sich für den invertierenden Verstärker ergibt:

$$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_1. \quad (9)$$

Wie diese Rechnung zeigt, tritt bei dieser Schaltung am Ausgang die mit einem Faktor $V = -R_2/R_1$ multiplizierte Signalspannung U_1 auf. Dieser Faktor V ist die Verstärkung des Netzwerkes. Sie hängt – wie man sieht – nur von der äußeren Beschaltung, aber nicht von der „inneren“ Verstärkung V_0 des Verstärkers selbst ab. Voraussetzung ist dabei lediglich, dass diese Leerlaufverstärkung groß genug ist: $V_0 \gg V$. Ferner fällt auf, dass die eigentliche Eingangsspannung U_E , das ist die Spannung zwischen den Differenzeingängen „-“ und „+“, nicht explizit auftritt. Der Grund ist ihre Kleinheit, es gilt nämlich:

$$U_E = -\frac{U_A}{V_0} = \frac{R_2 U_1}{R_1 V_0} \approx 0 \quad (10)$$

Durch die Gegenkopplung wird also der Punkt S – unabhängig von Signal und Ausgangsspannungen – immer auf dem Potential des nichtinvertierenden Eingangs, in diesem Beispiel auf Massepotential gehalten. Dadurch sind Ein- und Ausgang völlig voneinander getrennt. Insbesondere wird die Spannungsquelle U_1 nur mit dem Widerstand R_1 belastet.

Diese und alle weiteren Schaltungen lassen sich daher leicht verstehen, wenn man immer beachtet, dass aufgrund der Gegenkopplung praktisch keine Spannung zwischen den beiden Eingängen auftritt, und damit auch der Strom I_E verschwindet. Bei allen weiteren Betrachtungen wird daher stets $U_E = 0$ und $I_E = 0$ gesetzt. Ferner soll, wie allgemein üblich, die Signalspannung (hier: U_1) als Eingangsspannung bezeichnet werden.

Der *Impedanzwandler* im Operationsverstärker sorgt dafür, dass der Ausgang niederohmig ist. Die Ausgangsspannung U_A ist daher in weiten Grenzen von der Belastung unabhängig. Die dafür benötigte Leistung wird von einer im Abb. 2 nicht mehr eingezeichneten Spannungsversorgung geliefert.

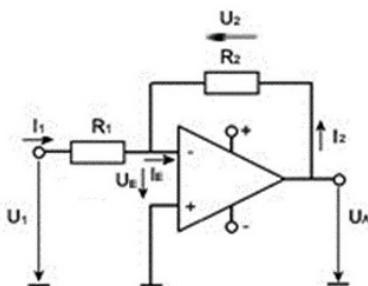


Abb. 2 Invertierender Verstärker, entnommen aus [2].

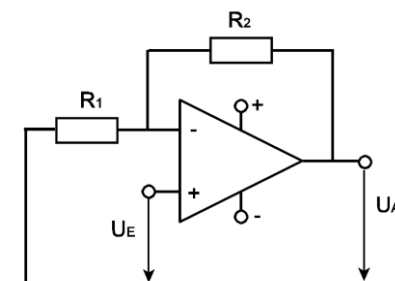


Abb. 3 Nichtinvertierender Verstärker, entnommen aus [2].

1.2.2 Frequenzgang, Grenzfrequenz und Verstärkungs-Bandbreite Produkt

Gemäß Gl. (9) sollte der Verstärkungsfaktor V ausschließlich durch das Verhältnis der Widerstände R_1 und R_2 gegeben und unabhängig von der Signalfrequenz sein. In der Realität zeigt ein OPV jedoch ein frequenzabhängiges Verstärkungsverhalten. Der Verlauf des realen Verstärkungsfaktors V_r (Index r) als Funktion der Frequenz f eines sinusförmigen Eingangssignals heißt *Frequenzgang* oder *Amplitudenübertragungsfunktion*.

Eine durch die Widerstände R_1 und R_2 vorgegebene *Sollverstärkung* (Index s) um den Faktor $V_s = -\frac{R_2}{R_1}$ (vgl. Gl 9) wird nur im Bereich kleiner Frequenzen erreicht. Dort ist $V_r = V_s$. Mit zunehmender Frequenz nimmt V_r ab. Der OPV verhält sich näherungsweise wie ein passiver Tiefpass mit einem Frequenzgang

$$V_r(f) = V_s \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}} \quad (11)$$

Dabei ist f_g die *Grenzfrequenz*, bei der V_r auf den Wert abgenommen hat. Dies entspricht einer Abnahme um 3 dB (zu „dB“ siehe Anhang), weshalb f_g auch *3 dB-Grenzfrequenz* heißt. Für eine höhere Sollverstärkung V_s ist die zugehörige 3 dB-Grenzfrequenz f_g niedriger, für eine niedrigere Sollverstärkung höher, sodass das sogenannte *Verstärkungs-Bandbreite Produkt*

$$f_T = V_s f_g \quad (12)$$

konstant bleibt.

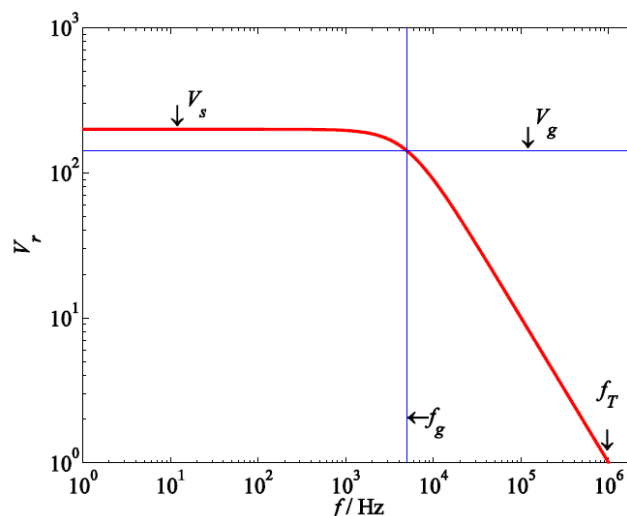


Abb. 4 Frequenzabhängigkeit des realen Verstärkungsfaktors V_r eines einstufigen OPV (*Frequenzgang* oder *Amplitudenübertragungsfunktion*). Im gezeigten Beispiel ist $V_s = 200$ die Sollverstärkung, $f_g = 5$ kHz die zugehörige 3 dB-Grenzfrequenz, $V_g = V_s/\sqrt{2}$ die Verstärkung bei der Grenzfrequenz und f_T die Transitfrequenz. Abb. entnommen aus [3].

Erhöht man bei gleichbleibenden Widerständen R_1 und R_2 die Frequenz des Eingangssignals deutlich über die 3 dB-Grenzfrequenz hinaus, so sinkt der reale Verstärkungsfaktor V_r um

denselben Faktor, um den die Frequenz f zunimmt. In einer doppelt-logarithmischen Auftragung von V_r über f ergibt sich dann Wert von -6 dB/Oktave^1 bzw. -20 dB/Dekade^2 .

Bei der Frequenz f_T ist V_r auf den Wert 1 abgesunken, d. h. es findet keine Verstärkung mehr statt. Diese Frequenz heißt *Transitfrequenz* des OPV. Ihr Wert ist gleich dem Verstärkungs-Bandbreite Produkt gem. Gl. (12).

1.2.3 Nichtinvertierender Verstärker

Die Schaltung des nichtinvertierenden OPV, 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 $U_- \approx U_+ = U_E$ 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 OPV:

$$V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (13)$$

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.

1.2.4 Addierer, Subtrahierer

Abb. 5 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 (+).

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 $I_1 + I_2 = -I_R$:

$$U_1 + U_2 - 2U_+ \approx U_+ - U_A \text{ bzw.}$$

$$U_A \approx 3U_+ - (U_1 + U_2) \quad (14)$$

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

$$U_A \approx U_3 - (U_1 + U_2) \quad (15)$$

Der Verstärker arbeitet in der Beschaltung Abb. 5 bei geeigneter Wahl der Widerstände R_1 , R_2 u. R_3 als Addierer bzw. Subtrahierer.

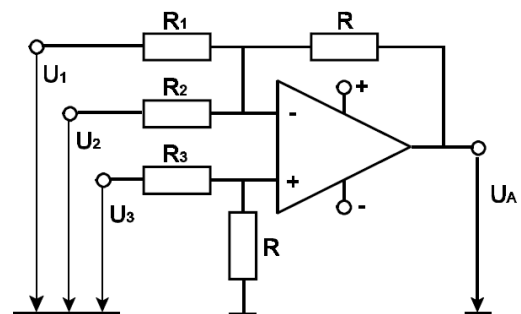


Abb. 5 Addierer bzw. Subtrahierer, entnommen aus [2].

¹ Eine *Oktave* entspricht einem Frequenzintervall $[f_1, f_2]$ für das gilt: $f_1 : f_2 = 1:2$.

² Eine *Dekade* entspricht einem Frequenzintervall $[f_1, f_2]$ für das gilt: $f_1 : f_2 = 1:10$.

1.2.5 Differenzierer

In der Schaltung, Abb. 6, 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.

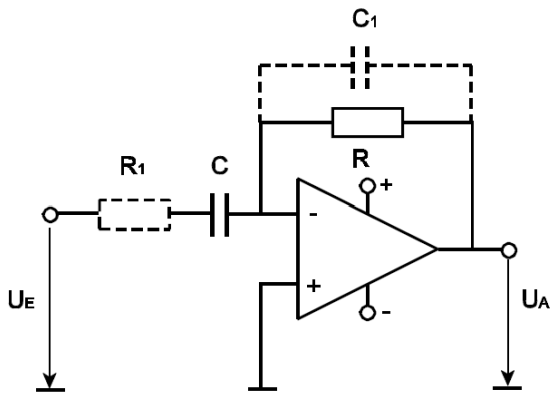


Abb. 6 Differenzierer, entnommen aus [2].

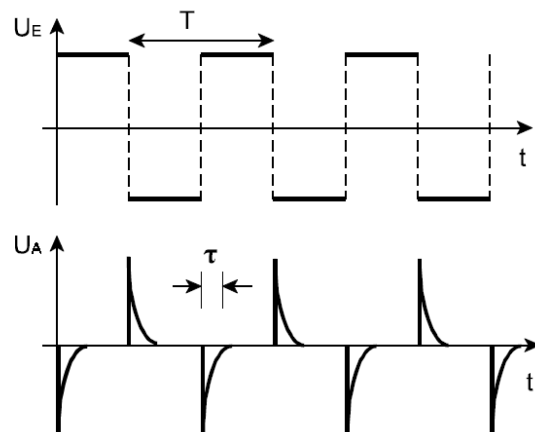


Abb. 7: Zeitverhalten der Ausgangsspannung $U_A(t)$ beim Differenzierer für eine Rechteckspannung $U_E(t)$ am Eingang, entn. aus [2].

Eine zeitlich variable Eingangsspannung U_E hat dagegen einen Lade- bzw. Entladestrom I_E des Kondensators zur Folge. Die zeitliche Ableitung der Beziehung $Q = C U_E$ liefert:

$$I_E = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_E}{dt} = -I_R = -\frac{U_A}{R} \text{ bzw. } U_A = -RC \frac{dU_E}{dt} \quad (16)$$

Die Ausgangsspannung U_A ist mit Gl. (16) proportional zur zeitlichen Änderung der Eingangsspannung U_E . Die Schaltung, Abb. 6, 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. 7. In ihr ist als Eingangsspannung $U_E(t)$ eines als Differenzierer geschalteten OPV eine Rechteckspannung der Grundfrequenz ν bzw. Periode T dargestellt. Die Rechteckspannung enthält viele Oberwellen der vielfachen Frequenz $n \cdot \nu$. 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. 7 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. 6, bewirkt, dass der Strom für hohe Frequenzen eingangsseitig begrenzt wird und der Betrag der maximalen Ausgangsspannung $U_{A,max}$ unterhalb der Grenzspannung bleibt. Für kleine Frequenzen ist $R_1 \ll RC = 1/\omega C$; die Schaltung arbeitet als Differenzierer. Für große Frequenzen ist umgekehrt $R_1 \gg RC$; 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 $R_1 C = R C_1$.

1.2.6 Integrierer

Abb. 7 zeigt die Schaltskizze des OPV 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:

$$U_A = -\frac{1}{R_1 C} \int U_E dt + \text{const.} \quad (17)$$

Die Schaltung, Abb. 8, 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 der Blindwiderstand der Kapazität $X_C = 1/\omega C \ll R$; der Widerstand R kann vernachlässigt werden. Umgekehrt ist für Wechselspannungen geringer Frequenz bzw. Gleichspannungen $X_C \gg R$; die Schaltung arbeitet dann als invertierender Verstärker der Verstärkung $V = -R/R_1$. Abb. 9 zeigt schematisch den frequenzabhängigen Einfluss des Widerstands R in der Schaltung des Integrierers, Abb. 8, 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 $U_E \cdot R/R_1$ 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.

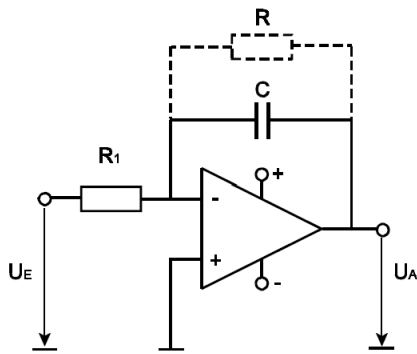


Abb. 8: Integrierer, entnommen aus [2].

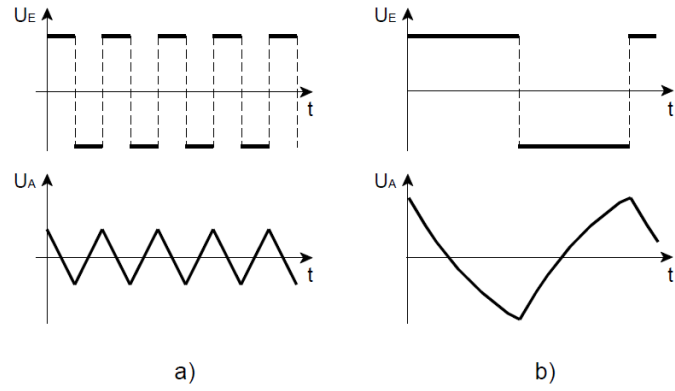


Abb. 9: Eingangssignal U_E der Rechteckspannung und **Ausgangssignal U_A** des Integrierers, Schaltung Abb.7: a) für große, b) für kleine Frequenzen schematisch, entnommen aus [2].

2 Aufgabenstellung

- Aufgabe:** Bauen Sie die Schaltung des Operationsverstärkers als Komparator auf und untersuchen Sie dessen Funktionsweise.
 - Aufgabe:** Bestimmen Sie in der Schaltung des invertierenden OPV die Verstärkung V sowie die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangssignal für verschiedene Rückkopplungswiderstände R_2 .
 - Aufgabe:** Bestimmen Sie die Funktionsweise des nichtinvertierenden OPV für verschiedene Kombinationen der Widerstände R_1 und R_2 .
 - Aufgabe:** Untersuchen Sie die Funktion des OPV als Differenzierer für verschiedene Kombinationen R , C und R_1 bei Wechselspannungen verschiedener Frequenzen.
 - Aufgabe:** Untersuchen Sie die Funktionsweise des OPV in der Schaltung als Integrierer für verschiedene Eingangssignale und Kombinationen der Widerstände/Kondensatoren.
- Anmerkung:** Vergleichen Sie Kapitel 4 für die weiteren Details zu den einzelnen Aufgabenstellungen.

3 Versuchsaufbau

3.1 Steckbrett

Die 9 Punkte innerhalb der großen Quadrate (siehe Abb. 10) sind miteinander elektrisch leitend verbunden, will man also zwei Punkte miteinander elektrisch verbinden, kann man diese einfach an zwei verschiedene Punkte desselben Quadrates anschließen. In der unten folgenden Skizze sieht man symbolisch eines dieser Quadrate rot eingerahmt (insgesamt gibt es also 16 solcher Quadrate am Steckbrett)

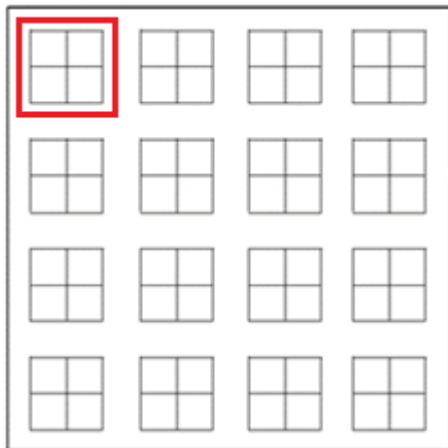


Abb. 10 Das Steckbrett, die 9 Kontakte innerhalb der großen Quadrate (siehe rot eingerahmtes Quadrat als Beispiel) sind miteinander elektrisch leitend verbunden, es gibt insgesamt 16 solcher Quadrate am Steckbrett

2.1 Erklärung der Beschaltung der Spannungsquelle

Um eine **Versorgungsspannung** von $\pm 15\text{ V}$ zur Verfügung stellen zu können, müssen die zwei Kanäle des Spannungsversorgungsgerätes in Serie geschaltet werden. Dies wird

gemacht, in dem man den ,+' Anschluss vom Master mit dem ,-' Anschluss vom Slave verbindet (schwarzes Kabel). An einem dieser beiden Stecker kann der **Ground** – die **0 V** Referenz abgegriffen werden, siehe zweites schwarzes Kabel. Am ,-' Anschluss vom Master hat man die **-15 V** und am ,+' Anschluss vom Slave die **+15 V**. In den nachfolgenden Skizzen zur Versuchsdurchführung sieht man zur besseren Übersichtlichkeit die **+15 V** immer in rot gekennzeichnet und die **-15 V** in blau.



Abb. 11: Die Serienschaltung der beiden Spannungsquellen, das schwarze Kabel zwischen ,+' Master und ,-' Slave verbindet die beiden Spannungsquellen in Serie.

Außerdem wird in den nachfolgenden Skizzen der Ground / 0 V durch folgendes Symbol dargestellt:



Abb. 12: Das Ground-Symbol, in den nachfolgenden Schaltplänen werden Verbindungen auf 0 V / Ground durch dieses Symbol gekennzeichnet

4 Versuchsdurchführung

4.1 Komparator

Mit dem Komparator beginnen Sie den praktischen Versuchsteil, um die Funktion des OPV als Differenzverstärker zu untersuchen. Abb. 15 zeigt den generellen Versuchsaufbau, bestehend zunächst aus einem Steckbrett, auf dem die verschiedenen Schaltungen des Versuchs durch geeignete Positionierung der Schaltungselemente (OPV 741 grundsätzlich mittig rechts) sowie ihrer Verbindungen durch Kurzschlussstecker oder Kabel realisiert werden können. Zur Gleichspannungsversorgung dient ein Netzgerät NG ($\pm 15\text{ V}$ gegen Masse = 0 V), zur Versorgung der Verstärkereingänge mit Wechselspannungen variabler Frequenz und Signalform dient ein Funktionsgenerator FG, zur Aufzeichnung der Eingangs- bzw. Ausgangsspannung des OPV wird ein Zweikanal-Oszilloskop OS angeschlossen. DC Spannungen können auch mit Digitalmultimetern (DMM) gemessen werden (speziell Poti 1).

!!Wichtig: Achten Sie darauf, dass die Versorgungsspannungen (+15 V und -15V) korrekt am OPV angeschlossen sind!! Benutzen Sie hierzu am Netzgerät die ganz linke Buchse (-) und ganz rechte Buchse (+) und verbinden Sie „Master und Slave“ über die beiden mittleren Buchsen, die dann als „Masse“ für die Schaltung dienen. Stellen Sie beide auf 15 V ein. Überprüfen Sie die Spannungen mit einem Multimeter, bevor Sie den OPV beschalten

!!Generell: Jede Schaltung erst nach dem Okay eines Betreuers einschalten!!

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 und grün für sonstige Signalspannungen.

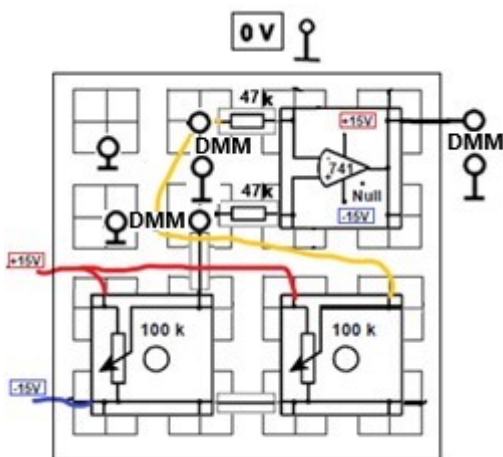


Abb. 13: Schaltung des Komparators mit zwei Potentiometern (DMM steht für digitales Multimeter), entnommen aus [2].

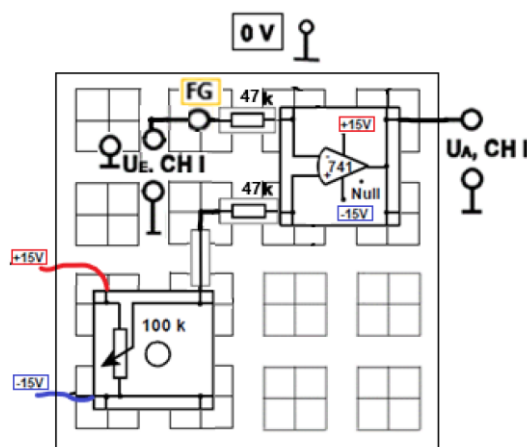


Abb. 14: Schaltung des Komparators mit einem Potentiometer und Funktionsgenerator am zweiten Eingang, entnommen aus [2].

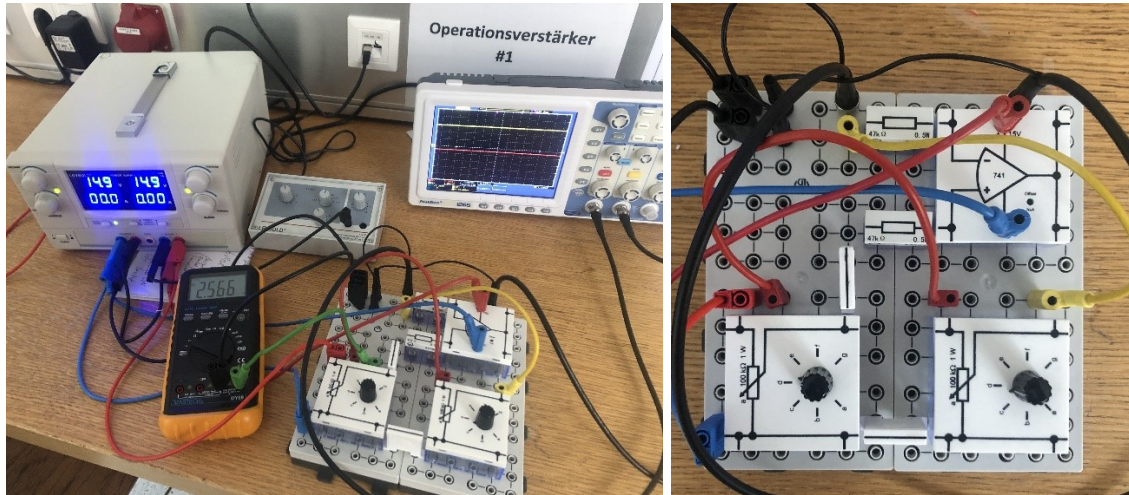


Abb. 15: Genereller Versuchsaufbau (hier 1. Schaltung: Komparator auf Steckbrett mit 2 Potentiometern) mit Netzgerät NG (± 15 V), Funktionsgenerator FG und Oszilloskop OS. Abb. Der Versuch kann auch auf 2 Steckplatten aufgebaut werden (siehe Foto bzw. Skizze weiter oben).

Das Oszilloskop und das digitale Multimeter sind die Messinstrumente 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, wenn Sie nicht schon den Versuch „Oszilloskop“ durchgeführt haben.

Für den ersten Versuch bauen Sie den Komparator gemäß Abb. 13 auf. Variieren Sie die Einstellungen der beiden als Spannungsteiler zwischen $+15$ V und -15 V geschalteten Potentiometer P_1 und P_2 für die über 47 k Ω Widerstände angeschlossenen Eingänge (-) und (+) des OPV. Prüfen Sie für mindestens 5 verschiedene Einstellungen der Potentiometer anhand der mit dem Multimeter die beiden Eingangsspannungen sowie die Ausgangsspannung nach, um zu sehen ob bzw. inwieweit die Schaltung als Komparator funktioniert. **Für die Auswertung:** sind die Ausgangsspannungen wie erwartet?

Schließen Sie anstelle des auf dem Schaltbrett in Abb. 13 unten rechts gezeigten Potentiometers P_2 für den invertierenden Eingang des OPV den Signalausgang des Funktionsgenerators FG an (Masseleitung an Erde bzw. Null, schwarz). Abb. 14 zeigt den Schaltplan für diesen Versuch. Verwenden Sie nun das Oszilloskop zum Messen der Eingangs- und Ausgangsspannung!

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 OPV angeschlossenen Kanal II des OS die Ausgangsspannung des OPV für das Eingangssignal des FG: $U_{25} = 3$ V Sinus, $\nu = 1$ kHz. Stellen Sie das Potentiometer P_1 zunächst auf einen mittleren Wert ein (am besten mit DMM messen und protokollieren). Welche Form hat die Ausgangsspannung des OP? Was ändert sich bei der Variation des Potentiometers P_1 ? Zeichnen Sie ein Oszillogramm auf und begründen Sie Ihre Beobachtungen.

4.2 Invertierender OPV

Abb. 16 zeigt schematisch die Beschaltung des OPV als invertierenden Verstärker. Die Verbindungen zum Netzgerät und Oszilloskop bzw. an dessen Stelle verwendeten DMM sind der Übersichtlichkeit wegen weggelassen bzw. nur angedeutet. Falls nötig, können DC Spannungen (Offset, Verstärkung) mit DMM genauer gemessen werden.

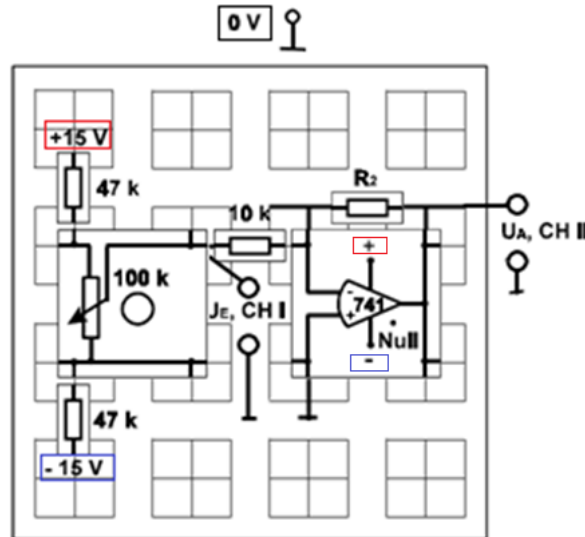


Abb. 16: Schaltung des invertierenden Operationsverstärkers mit Spannungsteiler zur Variation der Gleichspannung des Eingangs. Abb. entnommen aus [2].

Bauen Sie die Schaltung mit $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$ auf und stellen Sie mit dem $100 \text{ k}\Omega$ - Potentiometer die Eingangsspannung U_E am Multimeter auf 0 V ein. Überprüfen Sie, ob auch die Ausgangsspannung $U_A = 0 \text{ V}$ beträgt. (Gegebenenfalls muss mit einem Schraubendreher der Trimmer (Null) im OPV-Modul so verstellt werden, dass $U_A = 0 \text{ V}$ wird.)

Bestimmen Sie mit Rückkopplungswiderständen $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ und $100 \text{ k}\Omega$ für Eingangs-Spannungen $U_E = -1,5 \text{ V}$; $-1,0 \text{ V}$; $-0,5 \text{ V}$; ca. 0 V ; $0,5 \text{ V}$; $1,0 \text{ V}$; $1,5 \text{ V}$ die Ausgangs-Spannungen U_A , messen Sie die Spannungen am besten mittels Multimeter. Stellen Sie eine Wertetabelle auf und bestimmen Sie die jeweilige Verstärkung des OPV. Welche Beziehung besteht generell zwischen U_E und U_A (Gl. 2))?

Für die Auswertung: Bestimmen Sie sowohl die theoretischen als auch die experimentellen Verstärkungsfaktoren und zeigen Sie anhand dessen, ob (Gl. 2) gültig ist.

Trennen Sie den Abgriff des Potentiometers vom $10 \text{ k}\Omega$ - Widerstand des invertierenden Verstärkereingangs und legen Sie an ihn mit dem Funktionsgenerator eine sinusförmige Wechselspannung $U_{ES} = 1 \text{ V}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$ 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. 17 zeigt schematisch die Schaltung des nichtinvertierenden Verstärkers auf dem Schaltbrett. Wie zuvor sind die Verbindungen der Versorgungs- Spannungen und der Masseleitungen weggelassen, die Oszilloskopanschlüsse nur angedeutet.

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

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 OPV mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und messen Sie mit dem Oszilloskop die Ausgangsspannung für die Widerstandswerte: $R_2 = 0 \Omega$; $0,47 \text{ k}\Omega$; $1,5 \text{ k}\Omega$; $2,2 \text{ k}\Omega$; $4,7 \text{ k}\Omega$; $10 \text{ k}\Omega$;

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. **Für die Auswertung:** Welcher Zusammenhang besteht zwischen V und R_2/R_1 ? Vergleichen Sie diesen mit Gl. (13), in dem Sie einen linearen Fit machen (bestimmen Sie die Steigung und Konstante des linearen Fits und bestimmen Sie anhand dessen, ob die Übereinstimmung mit Gl. (13) gegeben ist).

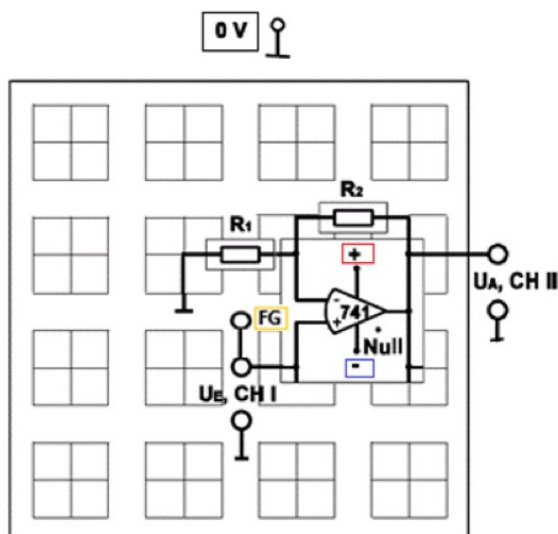


Abb. 17: Schaltung des nichtinvertierenden OPV, entnommen aus [2].

4.4 Differenzierer

Abb. 18 zeigt die Ausgangsschaltung des Operationsverstärkers als Differenzierer wie zuvor schematisch. Bauen Sie die Schaltung mit $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ und $R_I = 0 \text{ }\Omega$ auf. Legen Sie eine Sinus-Wechselspannung mit $U_{ESS} = 0,1 \text{ V}$, $\nu = 500 \text{ Hz}$ an den Eingang (vergleiche Abb. 19). Beschreiben Sie das Ausgangssignal U_A .

Bauen Sie die Schaltung entsprechend auf $R = 10 \text{ k}\Omega$, $R_I = 1 \text{ k}\Omega$ 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 auf. 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 $\nu = 20 \text{ kHz}$. Welche Form hat die Ausgangsspannung nun?

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

Entfernen Sie die Überbrückung des Widerstands R_I und vergleichen Sie die Ergebnisse für Sinus-, Dreieck- und Rechteckspannungen am Eingang (funktioniert der Differenzierer wie man es mathematisch erwarten würde?).

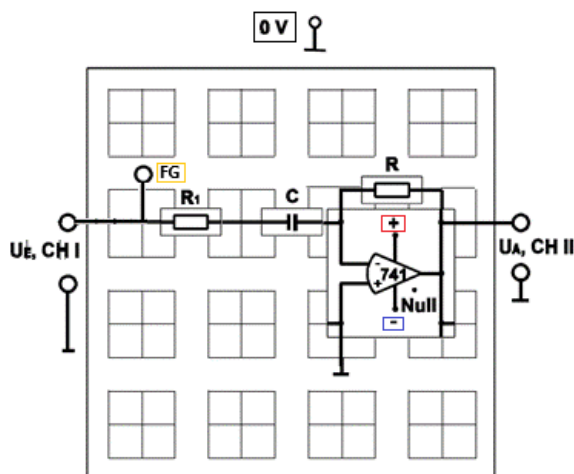


Abb. 18: Schaltung eines Differenzierers, mit Entkopplungswiderstand R_I entnommen aus [2].

4.5 Integrierer

Bauen Sie die Schaltung entsprechend Abb. 19 mit $C = 10 \text{ nF}$, $R = 1 \text{ M}\Omega$ und $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ 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)).

Beobachten Sie U_A , wenn R herausgenommen wird. Wie verändert sich das Oszillogramm?

Fügen Sie $R = 1 \text{ M}\Omega$ wieder ein und ersetzen Sie den Kondensator $C = 10 \text{ nF}$ durch einen mit $C = 2,2 \text{ nF}$. 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 ?

Stellen Sie nun das Eingangssignal auf $U_{\text{ESS}} = 2 \text{ V}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$ Sinus um. Zeichnen Sie das Oszillogramm von U_E und U_A . Vergleichen Sie den Zusammenhang von U_E und U_A mit Gl. (7). Vergleichen Sie auch hier die Ergebnisse für Sinus-, Dreieck- und Rechtecksignale (sind die Ergebnisse wie man sie mathematisch erwarten würde).

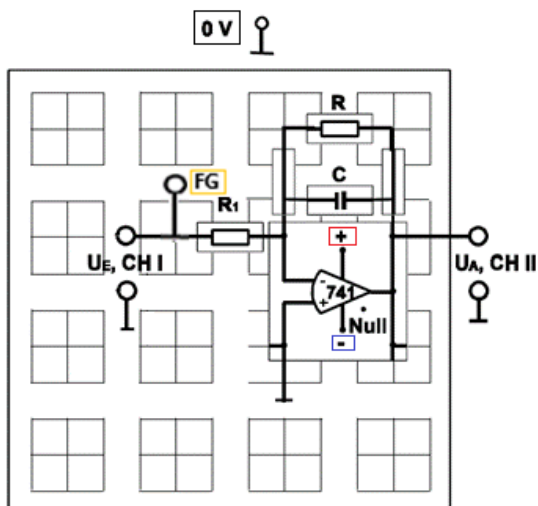


Abb. 19: Schaltung des Operationsverstärkers als Integrierer, entnommen aus [2].

5 Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Welche Eigenschaften hat ein unbeschalteter Operationsverstärker (OPV)?
- 2) Wie verhält sich ein idealer OPV?
- 3) Auf welche Weise kann ein OPV für Rechenzwecke genutzt werden?
- 4) Beschreiben Sie die Schaltung eines invertierenden bzw. nichtinvertierenden OPV und geben Sie die jeweilige Verstärkung $V = U_A/U_E$ an.
- 5) Skizzieren Sie die prinzipielle Schaltung des OPV als Addierer sowie Subtrahierer.
- 6) Beschreiben Sie die prinzipielle Schaltung und Wirkungsweise eines OPV als Differenzierer sowie Integrierer.
- 7) Wie kann durch geeignete Beschaltung eines OPV als Differenzierer bzw. Integrierer die „Übersteuerung“ des Ausgangssignals bei hohen bzw. niedrigen Frequenzen der Eingangsspannung vermieden werden?
- 8) Welche Anwendungsbeispiele von OPVs kennen Sie?
- 9) Was bewirkt die Offsetspannung?
- 10) Erklären Sie die Schaltung in Abbildung xx (Sie sollten alle Schaltungen aus der Anleitung erklären können).

6 Hinweise zur Protokollerstellung

Für das Protokoll können die Schaltbilder aus der Versuchsanleitung unter Angabe der Quelle verwendet werden. Die Zusammenfassung der Grundlagen ist selbst zu formulieren, Abbildungen können mit Quellenangabe kopiert werden, 2-3 Seiten sind vollkommen ausreichend. Unsicherheiten, Toleranzen und Unsicherheitsfortpflanzung bitte immer angeben.

7 Literatur

- [1] H.J. Eichler, Das neue physikalische Grundpraktikum, 2. Auflage, 2006, Seiten 326 ff.
- [2] Universität Duisburg Essen, Praktikumsanleitung Operationsverstärker, abgerufen am 29. August 2023, [Link](#).
- [3] Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - Fakultät V- Institut für Physik, Modul Grundpraktikum Physik – Teil II, Operationsverstärker, abgerufen am 29. August 2023, [Link](#).

Anhang: Dezibel

In der Messtechnik, insbesondere in der Elektrotechnik und Akustik, wird häufig eine logarithmische Größe V_L für das Verhältnis $V = U_2/U_1$ zweier Spannungen U_2 und U_1 verwendet. Die Größe V_L wird in Dezibel (dB) angegeben; sie hängt mit dem linearen Verhältnis V wie folgt zusammen:

$$V_L = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} \text{ dB} = 20 \cdot \log V \text{ dB} \quad (18)$$

Einige häufige dB-Werte finden Sie in Tabelle 2.

Tabelle 2: Häufig benutzte dB-Angaben.

V	V_L/dB
$1/2$	-6
$1/\sqrt{2}$	-3
1	0
2	6
10	20
20	40
1000	60