

ulm university universität  
**uulm**

# Grundpraktikum der Elektrotechnik

## Versuch 07: Operation John Ragazzini

Institut für Mikroelektronik  
Universität Ulm





# Grundpraktikum Elektrotechnik

## Versuch 07: Operation John Ragazzini

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der Operationsverstärker</b>	<b>2</b>
2.1	Realisierung von Operationsverstärkern . . . . .	2
2.2	Das Schaltungsbauteil . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Typische OP-Schaltungen</b>	<b>7</b>
3.1	Invertierender Verstärker . . . . .	7
3.2	Nicht invertierender Verstärker . . . . .	8
3.3	Addierer . . . . .	9
3.4	Subtrahierer . . . . .	9
3.5	Integrator . . . . .	10
3.6	Differenzierer . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Fragen und Aufgaben</b>	<b>12</b>
4.1	Fragen: . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Messungen</b>	<b>13</b>
5.1	Untersuchung von Spannungsfolgen . . . . .	13
5.2	Charakterisierung der Verstärkung . . . . .	14
5.3	Auswertung einer Addierer-Schaltung . . . . .	15
5.4	Auswertung einer Integrator-Schaltungen . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Evaluation</b>	<b>16</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch sollen Schaltungen untersucht werden, die so genannte Operationsverstärker (OPs) enthalten. Im Gegensatz zu passiven Bauelementen, wie z.B. Widerstände, Kondensatoren oder Spulen, ist ein OP ein aktives Bauelement. Durch geschickte Beschaltung kann man mit OPs die verschiedensten Operationen durchführen, weshalb OPs eine sehr wichtige Rolle in der Elektrotechnik einnehmen. Die wichtigsten Einsatzgebiete sind die NF-Technik, Analoge Rechentechnik, Steuer- und Regelungstechnik, Messtechnik etc..

In dieser Anleitung wird der Vollständigkeit halber zunächst kurz auf die Realisierung eines OPs eingegangen und anschließend ausführlich der ideale OP als Schaltungselement wiederholt. Nachfolgend werden verschiedene in diesem Versuch untersuchte Beschaltungen vorgestellt und zum Schluß wird auf die nicht-Idealitäten des Verwendeten OPs eingegangen.

## 2 Der Operationsverstärker

### 2.1 Realisierung von Operationsverstärkern

Dieses Kapitel ist zum besseren Verständnis von OPs und der Vollständigkeit halber in dieser Versuchsbeschreibung enthalten. Der Inhalt ist nicht Teil des Versuchs und wird nicht im Kolloquium abgeprüft.

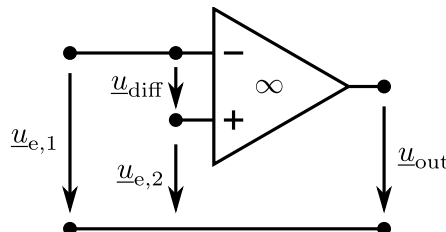


Abbildung 1: Idealer Operationsverstärker

Der ideale OP ist bereits aus der Vorlesung „Grundlagen der Elektrotechnik I“ als „magische Dreieck“, wie in Abbildung 1, bekannt. Die aus der Vorlesung bekannten OPs haben zwei Eingänge und einen Ausgang. Am Ausgang liegt die Differenz der beiden Eingangssignale multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor des OPs an.

In der Realität besteht ein OP aus einigen passiven (Widerstände, Kondensatoren) und aktiven (Transistoren) Bauteilen. Allen OPs gemein ist eine Differenzverstärker-Schaltung am Eingang, wie in Abbildung 2a beispielhaft dargestellt. Diese Schaltung besitzt zusätzlich zu den Signaleingängen  $u_{e,1}$  und  $u_{e,2}$  noch zwei Eingänge  $+U_b$  und  $-U_b$  für die positive und negative Versorgungsspannung.

Im allgemeinen werden um höhere Verstärkungsfaktoren zu erreichen und den Ausgangswiderstand zu reduzieren weitere Schaltungsstufen an den Ausgang gekoppelt, so dass sich hinter dem „magische Dreieck“ zum Beispiel eine Schaltung wie in Abbildung 2b verbirgt. Um bei einem Schaltungsentwurf nicht den gesamten OP Aufbau berücksichtigen zu müssen, wird dieser im allgemeinen auf ein abstraktes Bauteil mit den wichtigsten charakteristischen Eigenschaften reduziert, wobei je nach Bedarf mehr oder weniger nicht-ideales Verhalten in die Modellierung einfließt. Der ideale OP und einige nicht-Idealitäten werden im nächsten Kapitel wiederholt und näher erläutert.

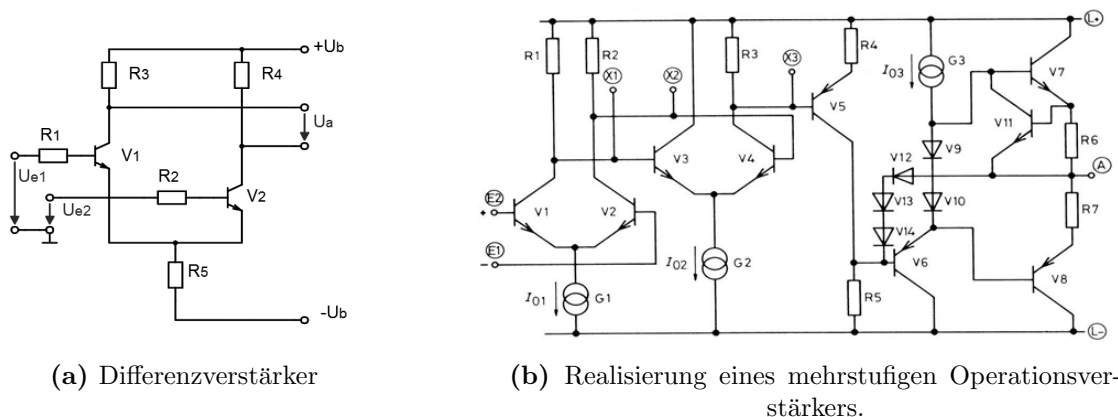


Abbildung 2: Aufbau eines Operationsverstärkers.

## 2.2 Das Schaltungsbauteil

In diesem Kapitel wird zunächst auf die idealen Eigenschaften des OPs für einfache Schaltungsanalysen eingegangen. Um tatsächlich eine Schaltung in Betrieb zu nehmen müssen jedoch die nicht-idealen Eigenschaften dem Datenblatt entnommen und bei der Dimensionierung der Schaltung berücksichtigt werden. Deshalb sind anschließend beispielhaft zwei Methoden zur Erweiterung des Schaltbildes vorgestellt. Diese erlauben die realen Bedingungen des OPs besser nachzubilden und somit das Verhalten der Schaltungen genauer zu untersuchen.

Tatsächlich reichen die beiden vorgestellten Methoden nicht aus um das Verhalten des in diesem Versuch verwendeten OPs genügend genau zu beschreiben. Daher wird in einem weiteren Unterkapitel auf das nicht-ideale Verhalten des in diesem Versuch verwendeten OP LM741 eingegangen.

### 2.2.1 Der ideale Operationsverstärker

Ein OP ist in der Regel ein Differenzverstärker, der die Differenz zweier Eingangssignale an den Eingängen  $\underline{u}_{e,1}$  und  $\underline{u}_{e,2}$  um den Verstärkungsfaktor  $A(\omega)$  verstärkt am Ausgang  $\underline{u}_{out}$  ausgibt:

$$\underline{u}_{out} = A(\omega) \cdot U_{diff} = A(\omega) \cdot (\underline{u}_{e,1} - \underline{u}_{e,2}) \quad (1)$$

Das aus der Vorlesung bereits bekannte, ideale Bauteil ist in Abbildung 1 abgebildet und die Eigenschaften für den unbeschalteten OP können wie folgt aufgelistet werden:

- 1.) Unendlich hohe Leerlaufverstärkung bei DC :  $A(\omega)|_{\omega=0} \rightarrow \infty$
- 2.) Unendlich hohe Transitfrequenz :  $A(\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} \rightarrow \infty$
- 3.) Unendlich große Eingangswiderstände :  $R_{in,1/2} \rightarrow \infty \Rightarrow \dot{i}_{in,1/2} = 0$
- 4.) Kein Ausgangswiderstand :  $R_{out} = 0 \Rightarrow \dot{i}_{out,max} \rightarrow \infty$
- 5.) Unendlich große Gleichtaktunterdrückung :  $\underline{u}_{out}|_{\underline{u}_{e,1}=\underline{u}_{e,2}} = 0$

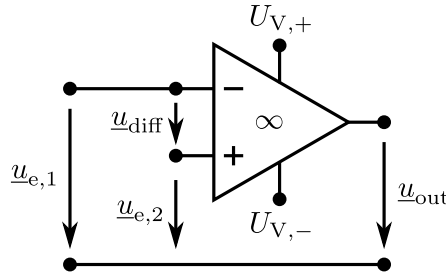
Die beiden ersten Eigenschaften bedeuten, dass die Verstärkung  $A(\omega)$  des OPs unabhängig von den Frequenzen der Eingangssignale immer unendlich groß ist. Die dritte Eigenschaft bedeutet, dass der Eingang des OPs keine Belastung für eine vorherige Schaltung darstellt, da kein Strom und damit auch keine Leistung aufgenommen wird und die vierte Eigenschaft besagt, dass ein OP jede Schaltung treiben, bzw. mit ausreichend Strom versorgen kann, so dass sich die entsprechende Ausgangsspannung aufbaut.

Während die zuvor genannten Eigenschaften bereits in der Vorlesung behandelt wurden, ist die letzte Eigenschaft neu und bedeutet, dass wenn die Eingänge des OPs auf gleichem Potential liegen, die Ausgangsspannung immer null ist. Dieses als Eigenschaft zu deklarieren erscheint zunächst überraschend. Da dies bei einem realen OP aber nicht gegeben ist, wird es hier explizit als ideale Eigenschaft aufgezählt.

### 2.2.2 Operationsverstärker mit begrenzter Spannungsversorgung

In der Realität besitzt ein OP natürlich eine begrenzte Versorgungsspannung. Da ein OP keinen Transformator enthält, ist somit auch die Ausgangsspannung begrenzt. Die maximale Ausgangsspannung wird durch die positive und die minimale durch die negative Versorgungsspannung begrenzt. Bei der Versorgungsspannung handelt es sich um Gleichspannung.

Um dieses Verhalten in dem Schaltbild wiederzugeben, werden zwei weitere Eingänge  $U_{V,+}$  und  $U_{V,-}$  für die Versorgungsspannung eingeführt. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3:** Operationsverstärker mit Spannungsversorgung

Dieses nicht-ideale Verhalten hat zur Folge, dass die idealen Eigenschaften aus Kapitel 2.2.1 nicht mehr uneingeschränkt gelten. Da eine begrenzte Versorgungsspannung keinen Einfluss auf die Ein-/Ausgangswiderstände oder die Gleichtaktunterdrückung hat, bleiben die Eigenschaften 3.) bis 5.) allerdings uneingeschränkt gültig.

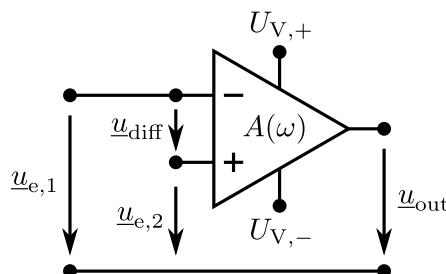
Aber eine unendlich große Verstärkung kann mit einer begrenzten Spannung nicht realisiert werden. Da die Ausgangsspannung bei positiver Eingangsspannungsdifferenz maximal auf dem Wert von  $U_{V,+}$  und bei negativer Eingangsspannungsdifferenz minimal auf dem Wert von  $U_{V,-}$  bleibt, ist der Verstärkungsfaktor  $A(\omega)$  somit endlich und sogar Eingangsabhängig.

### 2.2.3 Operationsverstärker mit frequenzabhängiger, endlicher Verstärkung

Selbst unter der Annahme, dass die Versorgungsspannung unendlich groß ist, kann der OP aufgrund der internen nicht-idealen Bauteile, einen endlichen und sogar frequenzabhängigen Verstärkungsfaktor aufweisen. Um dieses Verhalten zu modellieren wird üblicherweise eine frequenzabhängige Formel für die Verstärkung mit Ein- oder Mehr-Pol Verhalten verwendet.

Eine solche nicht-ideale Verstärkung kann z.B. durch eine DC Verstärkung  $A_0$  und eine Transitfrequenz  $\omega_0$ , der Frequenz, bei die Verstärkung betragsmäßig gerade noch eins ist ( $|A(\omega)| = 1$ ), modelliert werden und sieht wie folgt aus:

$$A(\omega) = \frac{A_0 \cdot \omega_0}{A_0 \cdot j\omega + \omega_0} \quad (2)$$



**Abbildung 4:** Operationsverstärker mit frequenzabhängiger Verstärkung und begrenzter Spannungsversorgung

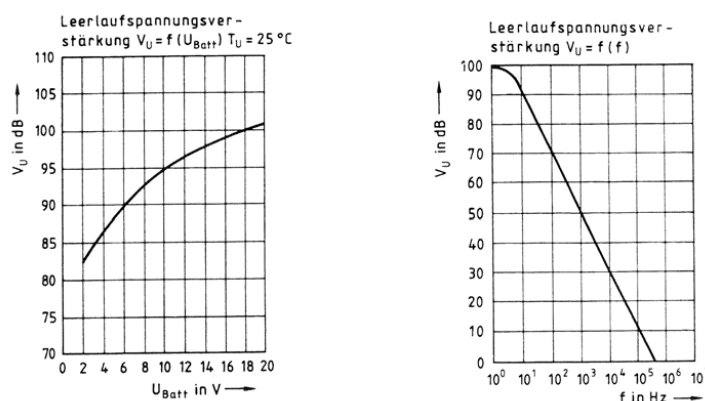
Für DC und sehr kleine Frequenzen hat die Verstärkung den Wert der DC-Verstärkung  $A(0) = A_0$  und für große Frequenzen nimmt die Verstärkung mit 20 dB pro Dekade ab.

Für sehr hohe  $A_0$  ist bei der Frequenz  $\omega = \omega_0$  ist die Verstärkung betragsmäßig nahezu eins. Es wird also weder verstärkt, noch gedämpft.

In das Schaltbild wird die Information, dass es sich bei der Verstärkung um eine Funktion der Frequenz handelt, durch hinzufügen von  $A(\omega)$  gekennzeichnet, wie in Abbildung 4 gezeigt. Die genaue Übertragungsfunktion ist jedoch nicht aus dem Bild ersichtlich.

### 2.2.4 Der Operationsverstärker LM741

In diesem Versuch wird der OP LM741 verwendet. Einige Parameter des OPs werden hier genauer vorgestellt. Weitere Informationen finden Sie ggf. in den Datenblättern im Internet.



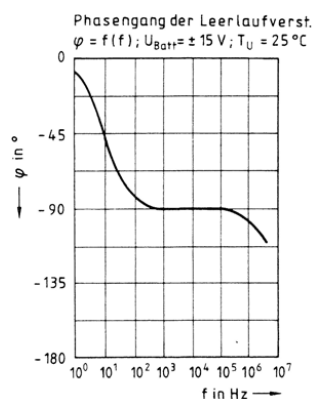
**Abbildung 5:** Leerlaufspannungsverstärkung

Die Verstärkung des unbeschalteten OPs kann Abbildung 5 entnommen werden. Wie man aus dem rechten Diagramm sieht, kann die frequenzabhängige Übertragung mit der Formel aus (2) für Werte

$$A_0 \approx 100\,000 \quad \text{und} \quad \omega_0 \approx 2\pi \cdot 0.2 \text{ MHz}$$

beschrieben werden. Die maximale DC Spannungsverstärkung ist jedoch abhängig von der Versorgungsspannung, wie aus dem linken Diagramm ersichtlich wird.

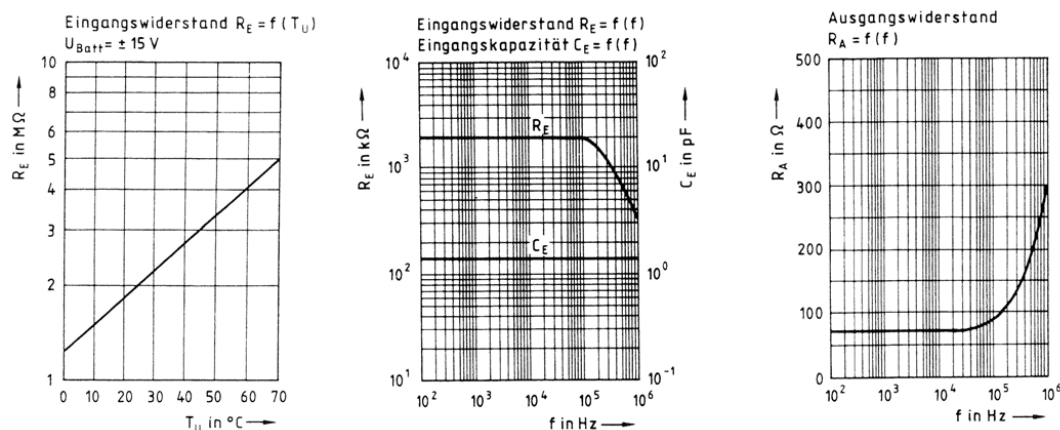
Zusätzlich zu dem Betrag der Verstärkung tritt noch eine frequenzabhängige Phasenverschiebung auf, die in Abbildung 6 gezeigt ist.



**Abbildung 6:** Phasengang



Auch die Eingangs- und Ausgangswiderstände des OPs sind sowohl temperatur- als auch frequenzabhängig, wie in den Diagrammen in Abbildung 7 abgebildet ist. Im linken Diagramm ist die Temperaturabhängigkeit des Eingangswiderstandes zu sehen. Die beiden rechten Diagramme zeigen die Frequenzabhängigkeit jeweils von Eingangs- und Ausgangswiderstand.



**Abbildung 7:** Nicht-idealität des Eingangs- und Ausgangswiderstand

Die aufgelisteten idealen Eigenschaften aus Kapitel 2.2.1 sind also bei weitem nicht erfüllt und es ergeben sich folgende Werte:

- 1.) Leerlaufverstärkung bei DC :  $A(\omega)|_{\omega=0} \approx 100\,000$
- 2.) Transitfrequenz :  $\omega_0 \approx 0.2 \text{ MHz}$
- 3.) Eingangswiderstände :  $R_{\text{in},1/2} \approx 2 \text{ M}\Omega \Rightarrow i_{\text{in},1/2} \neq 0$
- 4.) Ausgangswiderstand :  $R_{\text{out}} \approx 75 \Omega \Rightarrow I_{\text{out,max}} < \infty$
- 5.) Gleichtaktunterdrückung :  $\underline{u}_{\text{out}}|_{\underline{u}_{e,1}=\underline{u}_{e,2}} \neq 0$

Diese Werte sollten jedoch mit Vorsicht verwendet und die im Datenblatt angegebenen Rahmenbedingungen und Toleranzen berücksichtigt werden.

In 5.) ist gesagt, dass die Gleichtaktunterdrückung nicht ideal ist. Das bedeutet, dass auch bei anlegen gleicher Spannungen an den Eingängen des OPs, am Ausgang eine Spannung auftritt. Diese Spannung ist abhängig von dem Potential an den Eingängen.

Tatsächlich zeigt sich jedoch, dass zusätzlich zu dieser Gleichtaktverstärkung in der Regel noch ein Offset auftritt. Um trotzdem eine zuverlässige Messung durchführen zu können, muss zunächst eine so genannte Ruhepunkt- bzw. Nullpunkteinstellung durchgeführt werden um den Offset zu kompensieren.

Dazu gibt es zwei gängige Möglichkeiten:

- Anlegen einer Offsetspannung am Eingang, so dass die Ausgangsspannung praktisch zu Null kompensiert wird.
- Viele heute üblichen OPs (auch der LM741) besitzen zusätzliche Anschlüsse zum externen Nullpunktgleich.

In diesem Versuch muss vor jedem Versuch eine NullpunktKompensation durchgeführt werden.

### 3 Typische OP-Schaltungen

#### 3.1 Invertierender Verstärker

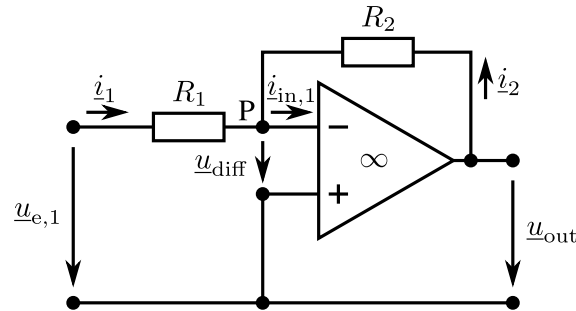


Abbildung 8: Invertierender Verstärker

Die wohl wichtigste OP-Schaltung ist der invertierende Verstärker. Die Ausgangsspannung des OPs wird über eine Rückkopplung zum invertierenden Eingang des OPs zurückgeführt (Gegenkopplung). Der nicht-invertierende Eingang des OPs wird auf Masse gelegt. Entsprechend der Knotenregel gilt für den Knoten P:

$$\dot{i}_{\text{in},1} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 = \frac{u_{e,1} - u_{\text{diff}}}{R_1} + \frac{u_{\text{out}} - u_{\text{diff}}}{R_2}$$

Für den idealen OP gilt:  $\dot{i}_{\text{in},1} = 0$  und  $A(\omega) = \infty$  d.h.  $u_{\text{diff}} = 0$ .

Daraus folgt:

$$\frac{u_{e,1}}{R_1} + \frac{u_{\text{out}}}{R_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{u_{\text{out}}}{u_{e,1}} = -\frac{R_2}{R_1} = A_B(\omega)$$

Die Betriebsverstärkung  $A_B(\omega)$  des idealen invertierenden Verstärkers ist also durch ein Widerstandsverhältnis gegeben und kann beliebig eingestellt werden. Bei realen Verstärkern gilt diese Aussage nur innerhalb gewisser Grenzen.

Jetzt kann auch die eigentliche Wirkungsweise des OPs verstanden werden. Der OP verändert die Ausgangsspannung solange, bis über die Rückkopplung, in diesem Fall  $R_2$ , beide Eingänge auf gleichem Potential liegen ( $u_{\text{diff}} = 0$ )!

Der Eingangswiderstand der Schaltung  $R_{\text{in},B}$  ergibt sich sofort, wenn man bedenkt, dass durch  $u_{\text{diff}} = 0$  der Knoten P auf Nullpotential liegt, es gilt also  $R_{\text{in},B} = R_1$ . Aufgrund der Tatsache, dass der Punkt P durch den OP auf Nullpotential gezogen wird, bezeichnet man diesen Punkt auch als virtuelle Masse.

### 3.2 Nicht invertierender Verstärker

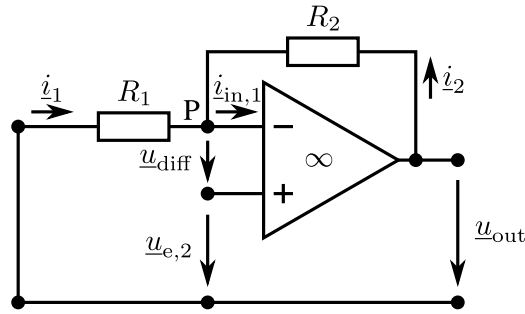


Abbildung 9: Nicht-invertierender Verstärker

Abbildung 9 zeigt einen nicht-invertierenden Verstärker. Die entsprechenden Ströme und Spannungen lassen sich wie folgt errechnen:

Für den idealen OP gilt  $i_{in,1} = 0$  und  $u_{diff} = 0$ . Daraus folgt für den Strom  $i_1$ :

$$i_1 = -\frac{u_{e,2}}{R_1} = -i_2$$

Aus der Beziehung der Ausgangsspannung und dem Ausgangsstrom lässt sich die Übertragungsfunktion der Schaltung und damit das Verstärkungsverhalten berechnen:

$$u_{out} = (R_1 + R_2) i_2 = (R_1 + R_2) \frac{u_{e,2}}{R_1} \Rightarrow \frac{u_{out}}{u_{e,2}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = A_B(\omega)$$

Eingangs- und Ausgangsspannung haben jetzt also die gleiche Phase. Im Vergleich zum invertierenden Verstärker ist hier stets  $A_B(\omega) \geq 1$ . Da beim idealen OP kein Eingangsstrom fließt, gilt für den Eingangswiderstand des nicht-invertierenden Verstärkers  $R_{in,B} = \infty$ . Den nicht-invertierenden Verstärker kann man also zum Beispiel für Elektromettermessungen einsetzen. Dies sind Messungen bei denen ein möglichst hoher Eingangswiderstand des Messgerätes gefordert wird um die Quelle nicht zu belasten. Daher ist auch die Bezeichnung „Elektrometer-Verstärker“ üblich.

### 3.3 Addierer

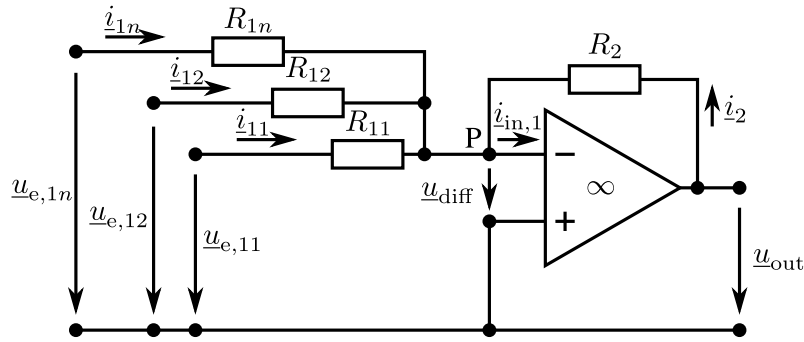


Abbildung 10: Addier-Schaltung

Die Ausgangsspannung kann unter der Bedingung  $u_{\text{diff}} = 0$  durch die Knotenregel am Knoten P hergeleitet werden:

$$i_2 = - \sum_{k=1}^n i_{1k} = - \sum_{k=1}^n \frac{u_{e,1k}}{R_{1k}} \Rightarrow u_{\text{out}} = R_2 i_2 = - \sum_{k=1}^n \frac{R_2}{R_{1k}} u_{e,1k}$$

### 3.4 Subtrahierer

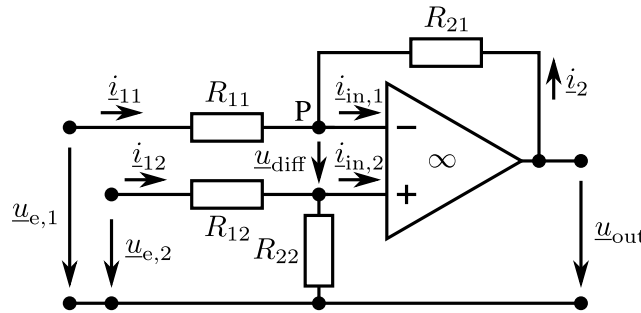


Abbildung 11: Subtrahier-Schaltung

Unter der Forderung, dass für den idealen Verstärker  $i_{\text{in},1} = i_{\text{in},2} = 0$  und  $u_{\text{diff}} = 0$  gilt, ergibt sich mit Hilfe des Potentials  $\varphi_P$  an dem Knoten P für die Ausgangsspannung:

$$\begin{aligned} u_{\text{out}} &= R_{21} i_2 + (\varphi_P - 0) = -R_{21} i_1 + \varphi_P \\ &= -R_{21} \frac{u_{e,1} - \varphi_P}{R_{11}} + \varphi_P = -\frac{R_{21}}{R_{11}} u_{e,1} + \left(1 + \frac{R_{21}}{R_{11}}\right) \varphi_P \\ &= -\frac{R_{21}}{R_{11}} u_{e,1} + \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}} \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}} u_{e,2} = -\frac{R_{21}}{R_{11}} u_{e,1} + \frac{R_{22}}{R_{11}} \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{12} + R_{22}} u_{e,2} \end{aligned}$$

Für den Fall  $R_{11} = R_{12} = R_1$  und  $R_{21} = R_{22} = R_2$  folgt daraus:

$$u_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1} (u_{e,1} - u_{e,2})$$

### 3.5 Integrator

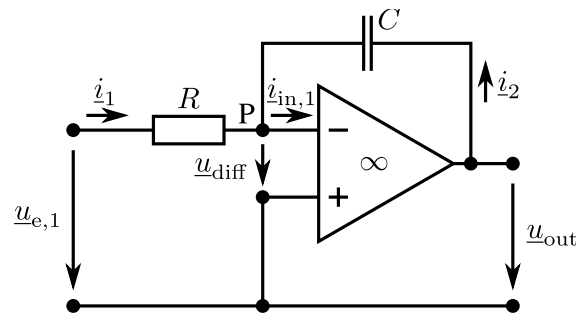


Abbildung 12: Integrierer-Schaltung

Eine besonders wichtige Anwendung des OPs in der Analogtechnik ist der Integrator. Zur Berechnung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion wenden wir die Knotenregel auf den Summationspunkt P an:

$$0 = i_{\text{in},1} = i_1 + i_2 = \frac{u_{e,1}}{R} + \frac{u_{\text{out}}}{\frac{1}{j\omega C}} \Rightarrow \frac{u_{\text{out}}}{u_{e,1}} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

Die Amplitude der Ausgangsspannung ist umgekehrt proportional zu  $\omega$ . Der Betrag der Übertragungsfunktion ergibt im Bode-Diagramm also eine Gerade mit der Steigung -20 dB/Dekade. Dieses Verhalten entspricht einer Integration im Zeitbereich.

Das Integrationsverhalten kann aber auch direkt im Zeitbereich hergeleitet werden. Dazu wird die Knotenregel am Knoten P im Zeitbereich aufgestellt:

$$0 = i_{\text{in},1}(t) = i_1(t) + i_2(t) = \frac{u_{e,1}(t)}{R} + C \frac{d}{dt} u_{\text{out}}(t)$$

Diese Differentialgleichung kann mit Hilfe der im Skript zur Vorlesung „Grundlagen der Elektrotechnik I“ gelöst werden und das Ergebnis ist:

$$u_{\text{out}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{e,1}(t) dt + u_{\text{out}}(0)$$

Das Ausgangssignal ist also das zeitliche Integral des Eingangssignals!

### 3.6 Differenzierer

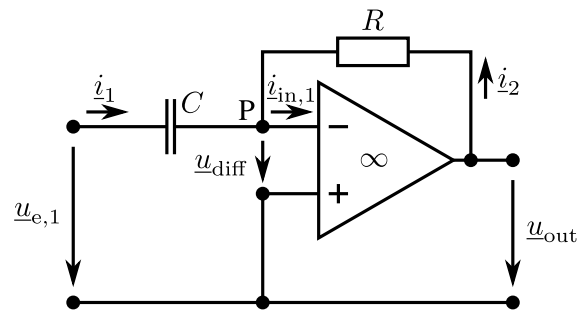


Abbildung 13: Differenzierer-Schaltung

Zur Berechnung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion wenden wir wieder die Knotenregel auf den Summationspunkt P an:

$$0 = i_{\text{in},1} = i_1 + i_2 = \frac{u_{e,1}}{\frac{1}{j\omega C}} + \frac{u_{\text{out}}}{R} \Rightarrow \frac{u_{\text{out}}}{u_{e,1}} = -j\omega RC$$

Die Amplitude der Ausgangsspannung ist proportional zu  $\omega$ . Der Betrag der Übertragungsfunktion des Differenzierers ist im Bode-Diagramm eine Gerade mit der Steigung +20 dB/Dekade. Dieses Verhalten entspricht einer Differentiation im Zeitbereich.

Die Herleitung der Differentiation anhand der Knotenregel am Knoten P im Zeitbereich sieht wie folgt aus:

$$0 = i_{\text{in},1}(t) = i_1(t) + i_2(t) = C \frac{d}{dt} u_{e,1}(t) + \frac{u_{\text{out}}(t)}{R} \Rightarrow u_{\text{out}}(t) = -RC \frac{d}{dt} u_{e,1}(t)$$

Dies bedeutet, dass die Ausgangsspannung die zeitliche Ableitung der Eingangsspannung darstellt.

## 4 Fragen und Aufgaben

Zur Vorbereitung auf den Versuch müssen folgende Fragen und Aufgaben schriftlich beantwortet bzw. gelöst werden und dem Praktikumsbetreuer vor Beginn des Versuchs vorgelegt werden.

### 4.1 Fragen:

1. Durch welche Eigenschaften ist der ideale Operationsverstärker gekennzeichnet?
2. Warum sind die idealen Eigenschaften in der Realität nicht zu erreichen?
3. Was ist beim OP die 'virtuelle Masse' und warum nennt man sie so?
4. Was versteht man unter Ruhe- bzw. Nullpunkteinstellung und warum ist diese notwendig?
5. Welche Bedeutung hat der Term  $u_{\text{out}}(0)$  in der Gleichung für die Ausgangsspannung beim Integrator?
6. Weshalb werden alle Signale auf dem Oszilloskop stets im Betriebsmodus 'DC' betrachtet?
7. Überlegen Sie sich wie man mit dem Netzgerät -15V, 0V und +15V erzeugen kann. (Das Gerät besitzt mehrere Kanäle) Zeichnen sie eine mögliche Verkabelung auf.

## 5 Messungen

### Allgemeines zum Schaltungsaufbau

- Damit die Schaltungen alle einwandfrei funktionieren, ist es eine notwendige Voraussetzung, dass die Masse aller Geräte miteinander verbunden ist. Die Masse der OP-Versorgungsspannung erzeugen Sie durch eine Mittelanzapfung (siehe vorbereitende Aufgaben). Die Masse des eingebauten Frequenzgenerators im Oszilloskop ist bereits intern mit der Masse der beiden Oszilloskop-Eingänge verbunden.
- Schalten Sie sämtliche Spannungen erst ein, wenn die Schaltung fertig aufgebaut und von ihrem Tutor kontrolliert ist.
- Den Ausgang des OPs nicht kurzschließen!
- Vor jedem Versuch muss eine Offsetkompensation (Nullpunktgleich) durchgeführt werden. Dies geschieht mit Hilfe des Potentiometers, welches sich im OP Gehäuse befindet.
  - Eingänge des OP's beide auf Masse legen.
  - Ausgangsspannung betrachten.
  - Mit Potentiometer die Ausgangsspannung auf  $\pm 0$  V einregeln.

### 5.1 Untersuchung von Spannungsfolgern

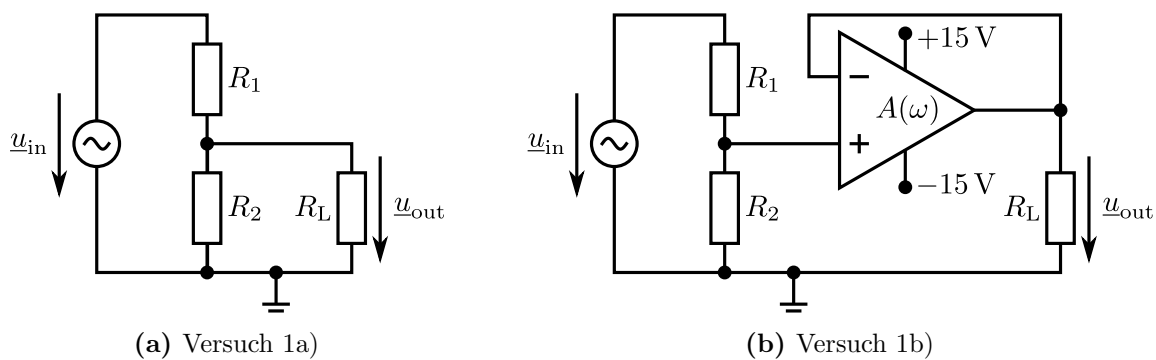


Abbildung 14: Spannungsfolger.

#### a) Belasteter Spannungsteiler

Bauen Sie zunächst die Schaltung nach Abbildung 14a auf. Die Eingangsspannung soll  $u_{\text{in}} = 5$  V DC und die Widerstände  $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$  sowie  $R_L = 220 \Omega$  betragen. Messen Sie mit dem Multimeter die über den Lastwiderstand abfallende Spannung  $u_{\text{out}}$ .

Erklären Sie das Ergebnis?



**1b) Belasteter Spannungsfolger**

Erweitern Sie nun den Aufbau um einen Spannungsfolger wie in Abbildung 14b. Der OP benötigt eine Betriebsspannung von  $\pm 15V$ .

Messen Sie wiederum die Spannung über dem Lastwiderstand mit dem Multimeter.

Erklären Sie das Ergebnis und geben Sie ein Beispiel an, wozu diese Schaltung verwendet werden könnte?

**5.2 Charakterisierung der Verstärkung**

Bauen Sie eine Schaltung nach Abbildung 8 mit  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  und einer Betriebsverstärkung von  $A_B = 10$  auf. Schalten Sie für diesen Versuch zusätzlich zwischen dem positiven Eingang des OPs und der Masse einen  $220\text{ k}\Omega$  Widerstand.

**2a) Abhängigkeit von der Eingangsamplitude**

Verwenden Sie als Eingangsspannung ein sinusförmiges Signal mit  $f = 1\text{ kHz}$  und Amplituden gemäß der unten stehenden Tabelle. Tragen Sie die gemessene Ausgangsamplitude in die Tabelle ein und berechnen Sie anschließend die Verstärkung.

$\underline{u}_{\text{in}}$ [Vpp]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\underline{u}_{\text{out}}$ [Vpp]										
$A_B = \underline{u}_{\text{out}}/\underline{u}_{\text{in}}$										
$20\text{ dB log}_{10}(A_B)$ [dB]										

Erklären Sie das Ergebnis insbesondere ab 3V Eingangsspannung? Wie könnte man das Problem lösen? Beschreiben Sie die Phasenbeziehung zwischen Ein- und Ausgangssignal. Führen Sie nun mithilfe der Matlab-GUI dieselbe Messung noch einmal durch und übernehmen Sie das Diagramm in ihre Auswertung.

**2b) Abhängigkeit von der Eingangsfrequenz**

Stellen Sie nun bei einer Eingangsspannung von  $\underline{u}_{\text{in}} = 2\text{ Vpp}$  verschiedene Frequenzen gemäß unten stehender Tabelle ein. Tragen Sie wiederum die gemessenen Amplituden der Ausgangsspannung in die Tabelle ein und berechnen Sie anschließend die Verstärkung.

$f$ [Hz]	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$\underline{u}_{\text{in}}$ [Vpp]	2	2	2	2	2	2
$\underline{u}_{\text{out}}$ [Vpp]						
$A_B = \underline{u}_{\text{out}}/\underline{u}_{\text{in}}$						
$20\text{ dB log}_{10}(A_B)$ [dB]						

Bei welcher Frequenz ist die Ausgangsspannung um 3 dB abgesunken und wie nennt man diese Frequenz?

Führen Sie mit Matlab einen automatischen Frequenzsweep durch und fügen Sie das resultierende Diagramm in die Auswertung ein.

### 5.3 Auswertung einer Addierer-Schaltung

Bauen Sie eine Schaltung gemäß Abbildung 10 mit lediglich zwei Eingängen auf. Verwenden Sie dazu  $R_{11} = 300 \Omega$ ,  $R_{12} = 200 \Omega$  und  $R_2 = 500 \Omega$ . Schalten Sie wiederum zusätzlich zwischen dem positiven Eingang des OPs und der Masse einen  $220 \text{ k}\Omega$  Widerstand.

Legen Sie nun eine Wechselspannung von  $\underline{u}_{e,1} = 2,5 \text{ Vpp}$  und einer Frequenz von  $1 \text{ kHz}$  an. Dazu soll eine Gleichspannung von  $\underline{u}_{e,2} = 2,5 \text{ V}$  addiert werden. Berechnen Sie die jeweiligen Verstärkungsfaktoren der einzelnen Eingangspfade. Messen Sie nun die Ausgangsspannung und vergleichen Sie die berechneten Ergebnisse mit den praktisch gemessenen.

### 5.4 Auswertung einer Integrator-Schaltungen

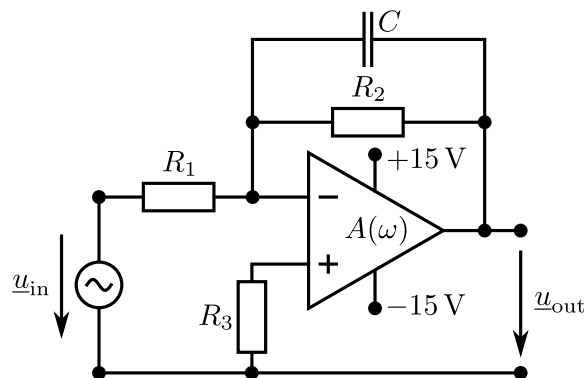


Abbildung 15: Integrator-Schaltung.

Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 15 auf.

Verwenden Sie dazu  $\underline{u}_{in} = 2 \text{ Vpp}$ ,  $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 220 \text{ k}\Omega$  und  $C = 1.5 \text{ nF}$ .

Stellen Sie verschiedene Frequenzen für die Eingangsspannung ein und beobachten Sie mit dem Oszilloskop was passiert.

- Ab wie viel Hz funktioniert die Integration ? (ab wann sieht die Ausgangsspannung wie erwartet aus?)
- Welche Phasenverschiebung liegt zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung und warum?
- Was passiert wenn man statt dem Sinus einen Dreieck oder ein Rechteck auf den Eingang des Integrators gibt und warum?

Nehmen Sie mit Matlab den Frequenzgang von  $100 \text{ Hz}$  -  $1 \text{ MHz}$  auf und fügen Sie das Diagramm in die Auswertung ein.

Machen Sie mit dem Oszilloskop einen Screenshot von der Integration einer Dreiecks- und einer Rechtecksspannung und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

Modifizieren Sie im Weiteren obige Schaltung folgendermaßen:

$\underline{u}_{in} = 2 \text{ Vpp}$ ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 0 \Omega$  und  $C = 1,5 \text{ nF}$ .

Nehmen Sie mit Matlab den Frequenzgang von  $10 \text{ Hz}$  -  $100 \text{ kHz}$  auf und fügen Sie das Diagramm in die Auswertung ein. Wozu kann diese Schaltung noch verwendet werden? Erklären Sie die Funktion der Schaltung.

## 6 Evaluation

Auf der Moodleseite gibt es zu jedem Versuch eine Umfrage zur Evaluation. Bitte helfen Sie die Qualität des Praktikums zu verbessern, indem Sie uns Rückmeldung geben wie Sie die Versuchsdurchführung empfunden haben!

Loggen Sie Sich beide einzeln vom Praktikumsrechner aus ein und beantworten Sie die Umfrage noch direkt nach der Versuchsdurchführung bevor Sie das Praktikum verlassen!