

Fortgeschrittenenpraktikum

## **V51 - Operationsverstärker**

Leander Flottau	Jannis Vornholt
leander.flottau@udo.edu	jannis.vornholt@udo.edu

November 20, 2023

TU Dortmund University – Department of Physics

# Contents

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Schaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .	3
2.1.1	Invertierter Linearverstärker . . . . .	3
2.1.2	Umkehrintegrator . . . . .	4
2.1.3	invertierter Differentiator . . . . .	5
2.1.4	Schmitt-Trigger . . . . .	6
2.1.5	Signalgenerator . . . . .	6
2.1.6	Signalgenerator mit variierenden Amplituden . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>
	<b>References</b>	<b>12</b>

# 1 Ziel

Bei diesem Versuch werden die Eigenschaften von Operationsverstärkern untersucht. Dafür werden Operationsverstärker in verschiedene Schaltungen eingebaut und ihre Funktionsweise getestet.

## 2 Theorie

Operationsverstärker sind Differenzverstärker, die Ausgangsspannung  $U_A$  ist proportional zu der Differenz der beiden Eingangsspannungen  $U_P$ ,  $U_N$

$$U_A = V \cdot (U_P - U_N).$$

Somit ist die Ausgangsspannung in der Phase der am nicht-invertierten Eingang (+) anliegenden Spannung  $U_P$  und gegenphasig zur am invertierten Eingang (-) anliegenden Spannung  $U_N$ . Das Proportionale Verhältnis der Ausgangsspannung gegenüber der Differenz der beiden Eingangsspannungen, besteht nur im Bereich

$$-U_S < U_A < U_S,$$

wobei  $U_S$  die angelegte Betriebsspannung ist. Außerhalb dieses Bereiches entspricht die Ausgangsspannung  $\pm U_S$ .

Der ideale Operationsverstärker hat eine Leerlaufverstärkung von  $V = \infty$ . Zudem sind die Eingangswiderstände  $r_p$  und  $r_n$  ebenfalls unendlich groß und der Ausgangswiderstand  $r_a = 0$ . Die Übertragungsbandbreite reicht dabei von 0 bis  $\infty$ .

Diese Bedingungen lassen sich bei einem realen Operationsverstärker nicht umsetzen. Dies führt zu einer Leerlaufverstärkung von  $V \propto 10^4 - 10^6$  und einer Übertragungsbandbreite von 10 Hz bis 10 kHz. Zusätzlich entsteht eine geringe Gleichtaktverstärkung, so wie eine Offsetspannung, wenn beide Eingangsspannungen 0 betragen. Diese Offsetspannung ist als

$$U_0 = U_P - U_N$$

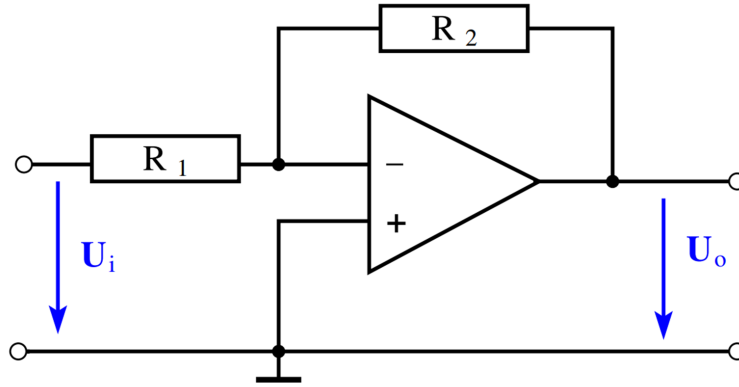
definiert, wobei die Eingangsspannungen so gewählt sind, dass  $U_A = 0$ .

### 2.1 Schaltungen mit Operationsverstärkern

#### 2.1.1 Invertierter Linearverstärker

In Abbildung 1 ist ein invertierter Linearverstärker gezeigt. Bei diesem wird die Ausgangsspannung über den Widerstand  $R_2$  in den invertierten Eingang des Operationsverstärkers gegeben. Dadurch kommt es bei einer Zunahme der Ausgangsspannung zu einer Abnahme der Eingangsspannung. Diese Gegenkopplung wirkt einer Ausgangsspannung im gesättigten Bereich entgegen.

Aus der Proportionalität der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung ergibt sich



**Figure 1:** Schematische Darstellung eines invertierenden Verstärkers [1].

$$U_N = -\frac{U_A}{V}. \quad (1)$$

Mit der Annahme  $I_N = 0$ , folgt aus der Knotenregel für den Knoten vor dem invertierten Eingang

$$\frac{U_N - U_1}{U_A - U_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_N}. \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung von Formel 1 und 2, so wie der Näherung  $V \gg 1$  ergibt sich

$$\frac{1}{V'} = \frac{1}{V} + \frac{R_1}{R_N}. \quad (3)$$

Gut zu sehen ist, dass die Verstärkung bei  $\frac{R_N}{R_1} \ll V$  nahezu nur noch von dem Verhältnis der Widerstände abhängt. Diese Gegenkopplung verringert damit die starken schwankungen von  $V$  und erhöht so die Stabilität des Verstärkers.

### 2.1.2 Umkehrintegrator

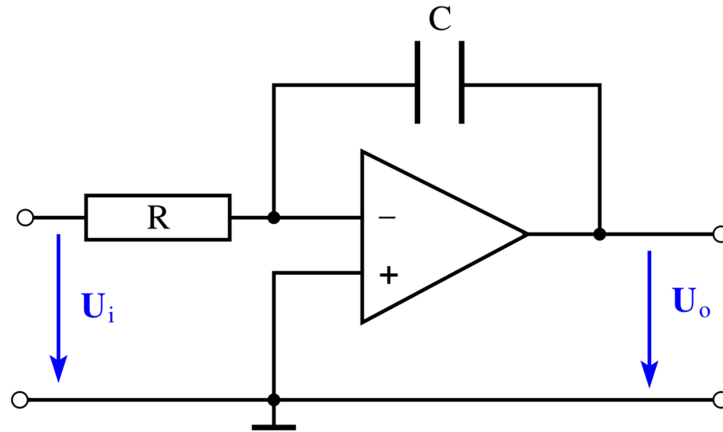
Tauscht man den Widerstand in der Rückkopplung des invertierten Linearverstärker durch einen Kondensator, so erhält man einen Umkehrintegrator. Dieser ist in Abbildung 2 dargestellt.

Durch die Knotenregel und der Näherung  $I_N = 0$ , ergibt sich für den Knoten vor dem invertierten Eingang

$$I_1 + I_C = 0. \quad (4)$$

Weiterhin gilt

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad (5)$$



**Figure 2:** Schematische Darstellung eines Umkehrintegrators [1].

so wie

$$\int I_C dt = CU_A. \quad (6)$$

Daraus berechnet sich die Ausgangsspannung zu

$$U_A = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt. \quad (7)$$

Für eine sinusförmige Eingangsspannung  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$  folgt nun

$$U_A = -\frac{U_0}{RC\omega} \cos(\omega t). \quad (8)$$

### 2.1.3 invertierter Differentiator

Werden nun der Widerstand und der Kondensator des Umkehrintegrators vertauscht, so entsteht der invertierte Differentiator, abgebildet in Abbildung 3.

Für den Knoten vor dem invertierten Eingang ergibt sich dann

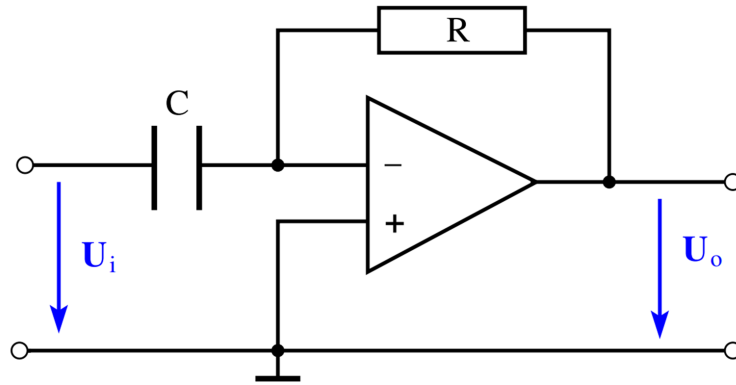
$$I_1 + I_A = 0,$$

mit den Strömen

$$I_1 = \dot{Q} = C \cdot \dot{U}_1$$

$$I_A = \frac{U_A}{R}.$$

Damit hängt die Ausgangsspannung von der zeitlichen Ableitung der Eingangsspannung ab



**Figure 3:** Schematische Darstellung eines invertierten Differentiators [1].

$$U_A = -RC \cdot \dot{U}_1.$$

Für eine Eingangsspannung  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$  ergibt sich dann die Ausgangsspannung

$$U_A = -RCU_0\omega \cdot \cos(\omega t), \quad (9)$$

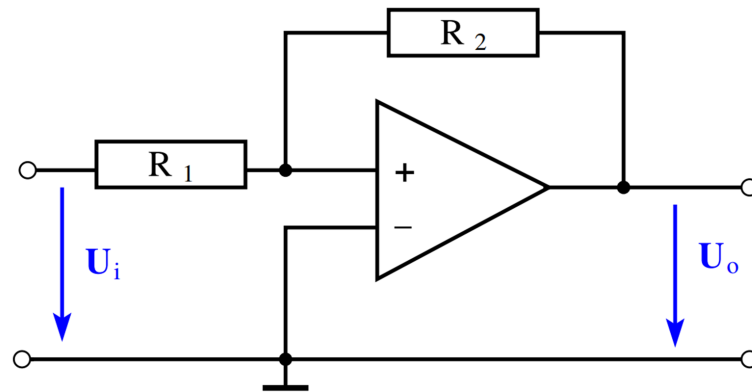
welche proportional zur Frequenz ist.

#### 2.1.4 Schmitt-Trigger

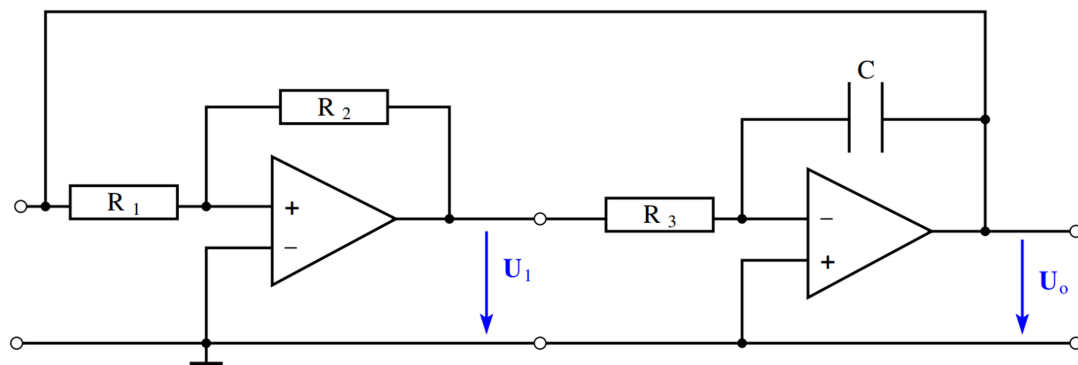
Bei dem Schmitt-Trigger, gezeigt in Abbildung 4, wird das Ausgangssignal über einen Widerstand in den nicht invertierten Eingang des Operationsverstärkers gegeben. Dadurch wird das Eingangssignal verstärkt, wodurch der Schmitt-Trigger einem Schalter ähnelt. Übersteigt die Spannungsdifferenz an den Eingängen einen bestimmten Schwellenwert, so springt die Ausgangsspannung schlagartig auf  $\pm U_S$ . Daraus ergibt sich für die Ausgangsspannung eine Rechtecksspannung. Die Schwellenwerte sind gegeben durch  $-\frac{R_1}{R_P}U_S$  und  $\frac{R_1}{R_P}U_S$ .

#### 2.1.5 Signalgenerator

Die Kombination aus Schmitt-Trigger und Integrator ist in Abbildung 5 dargestellt und entspricht einem Signalgenerator, welcher spontan anfängt zu schwingen. Die Rechtecksspannung am Ausgang des Schmitt-Triggers wird durch den Integrator integriert, was zu einer Dreiecksspannung am Ausgang des Integrators führt. Diese Dreiecksspannung wird wiederum als Eingangsspannung für den Schmitt-Trigger genutzt. Die Frequenz des schwingenden Systems ergibt sich zu  $\nu_{Dreieck} = \frac{R_2}{4CR_1R_3}$  und die Amplitude entspricht dem Wert  $A = U_{\max} \frac{R_4}{R_2}$ .



**Figure 4:** Schematische Darstellung eines Schmitt-Triggers [1].



**Figure 5:** Schematische Darstellung eines Signalgenerators [1].

### 2.1.6 Signalgenerator mit variierenden Amplituden

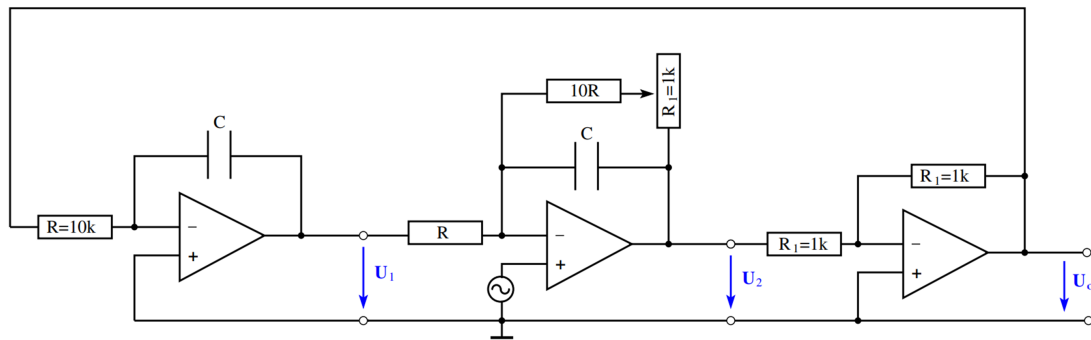
Durch den in Abbildung 6 gezeigten Aufbau kann durch eine Rechtecksspannung als Eingangsspannung, eine gedämpfte Schwingung erzeugt werden. Diese Gedämpfte Schwingung hat die Periodendauer

$$T = 2\pi RC \quad (10)$$

und eine Zerfallszeit von

$$\tau = \frac{20RC}{|\nu|}, \quad (11)$$

dabei gilt  $-1 \leq \nu \leq 1$  ist eine Konstante.



**Figure 6:** Schematische Darstellung eines Signalgenerators mit variierender Amplitude [1].

## 3 Durchführung

Die in Kapitel 2 dargestellten Schaltungen, werden nach Vorbild ihrer jeweiligen Abbildungen aufgebaut und getestet.

- Bei dem invertierten Linearverstärker wird eine Sinusspannung eingegeben und anschließend für verschiedene Frequenzen die Amplitude, so wie die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung gemessen. Dies wird für drei verschiedene Verhältnisse zwischen  $R_1$  und  $R_2$  durchgeführt.
- Beim Integrator, so wie Differentiator werden ebenfalls die Amplituden der Ausgangsspannung bei verschiedenen Frequenzen einer eingehenden Sinusspannung untersucht. Zusätzlich werden über einen Signalgenerator Dreiecks- und Rechtecksspannungen als Eingangsspannung genutzt und das Verhalten der Ausgangsspannung mit Hilfe eines Oszilloskops untersucht.



- Beim Schmitt-Trigger wird der Schwellenwert gesucht. Dafür wird die Eingangsspannung so lange erhöht, bis die Ausgangsspannung ihr Vorzeichen wechselt. Zudem wird der Schwellenwert mit Hilfe einer Dreiecksspannung ermittelt. Dafür wird eine Dreiecksspannung als Eingangsspannung angelegt, die deutlich größer als der Schwellenwert ist. Durch ein Oszilloskop kann dann der Schwellenwert abgelesen werden.
- Beim Signalgenerator werden sowohl die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers, so wie die des Integrators, auf einem Oszilloskop abgebildet und verglichen.
- Bei der gedämpften harmonischen Schwingung werden die Eingangs- und Ausgangsspannung auf dem Oszilloskop dargestellt und untersucht.

## **4 Auswertung**

## 5 Diskussion

## References

- [1] TU Dortmund. *V51 Circuits with operational amplifiers*. 2023.