

V51

Schaltungen mit Operationsverstärkern

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.01.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Grundlegende Schaltungen	4
2.1.1. Invertierender Linearverstärker	4
2.1.2. Integrator	5
2.1.3. Differenzierer	6
2.1.4. Schmitt-Trigger	6
2.1.5. Generator	7
3. Durchführung	8
4. Auswertung	9
5. Diskussion	9
Literatur	9
A. Anhang	10
A.1. Originaldaten	10

1. Zielsetzung

In diesem Versuch werden Anwendungen eines Operationsverstärkers untersucht. Dazu werden verschiedene Schaltungen mit Operationsverstärkern aufgebaut und ihre elektrotechnischen Eigenschaften geprüft. Kenngrößen und Zusammenhänge werden vermessen und mit den Erwartungen eines idealen Operationsverstärkers verglichen.

2. Theorie

Der Operationsverstärker (*OP*, *OpAmp*) ist ein wichtiges Bauteil zur Verstärkung von Spannungssignalen. Dem Aufbau eines OpAmp's liegt ein Differenzverstärker zur Grunde, weshalb auch die Differenz zweier anliegender Spannungssignale verstärkt wird. Der invertierende Eingang wird mit einem „-“ gekennzeichnet, der nicht-Invertierende mit einem „+“. Ein idealer OpAmp hat eine unendliche Leerlaufverstärkung, wohingegen der reale Operationsverstärker einen Verstärkungsfaktor V von etwa 10^4 bis 10^7 aufweist. Der OpAmp wird mit zwei Betriebsspannungen $\pm U_B$ versorgt, wodurch die Amplitude des Ausgangssignals

$$U_a = V(U_+ - U_-) \quad (1)$$

in den Bereich $-U_B < U_a < U_B$ eingeschränkt ist. Dies kann auch anhand der Übertragungskennlinie eines idealen OpAmp's in Abbildung 1 gesehen werden. Überschreitet die

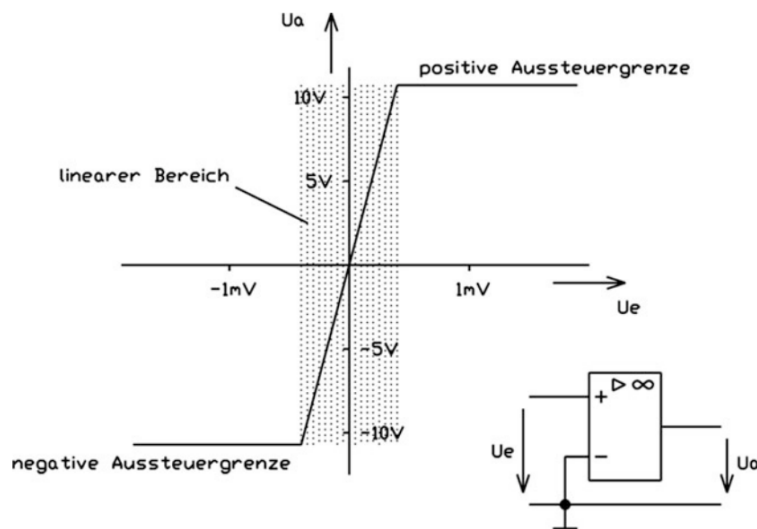


Abbildung 1: Übertragungskennlinie eines idealen Operationsverstärkers [1].

Verstärkung bei einem realen OpAmp die Betriebsspannung, so erreicht das Signal ein Plateau einige Volt (milli Volt) unter der Betriebsspannung. Die Kennlinie eines realen Verstärkers kann außerdem um einen Offset U_{offset} verschoben sein.

Beim idealen Operationsverstärker ist der Eingangswiderstand unendlich groß und der Ausgangswiderstand 0Ω . Ein realer OpAmp hat typischerweise einen Eingangswiderstand

von $R_e > 1 \text{ M}\Omega$ und einen Ausgangswiderstand von etwa $R_a = 10 \Omega - 1000 \Omega$. Ebenso hat der ideale OpAmp eine unendliche Übertragungsbandbreite, wohingegen der reale Operationsverstärker eine Grenzfrequenz zwischen 10 Hz und 10 kHz hat. Die Bandbreite wird bei Operationsverstärkern mit dem konstanten Verstärkung-Bandbreite-Produkt angegeben. Des Weiteren tritt auch eine Gleichtaktverstärkung auf, also wenn gleiche Spannungssignale anliegen. Da dieses Verhalten unerwünscht ist, wird die Kenngröße der Gleichtaktunterdrückung G

$$G = \frac{V_0}{V_{\text{GI}}} \quad (2)$$

als Verhältnis der Leerlaufverstärkung V_0 und der Gleichtaktverstärkung V_{GI} angegeben.

2.1. Grundlegende Schaltungen

Durch Rückkopplung des Ausgangssignals auf den Eingang (Feedback) kann ein Operationsverstärker in vielen Schaltungen mit unterschiedlichen Funktionen verwendet werden. Eine positive Rückkopplung verstärkt dabei das Eingangssignal, während negatives Feedback dem Eingangssignal entgegen wirkt. Durch zweiteres kann eine Stabilisierung des Betriebs des OpAmp's erreicht werden.

2.1.1. Invertierender Linearverstärker

Bei einem invertierenden Verstärker wird eine Rückkopplung des Ausgangssignals auf den invertierenden Eingang (Gegenkopplung) gegeben. Nach Gleichung 1 gilt mit $U_0 \equiv U_a$

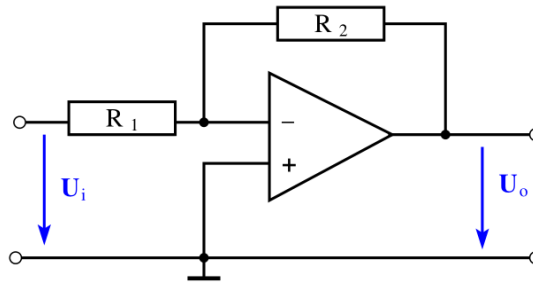


Abbildung 2: Schaltplan eines invertierenden Linearverstärkers [3].

$$U_i = -\frac{U_a}{V}.$$

Mit der Kirchhoffschen Knotenregel gilt für den Knoten vor dem invertierenden Eingang

$$\frac{U_i - U_1}{U_a - U_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Daraus folgt für die Verstärkung

$$\begin{aligned}\frac{1}{V'} &= -\frac{U_1}{U_a} = \frac{1/V R_1}{+ R_2} \left(1 + \frac{1}{V}\right) \\ V' &= \frac{R_2}{R_1} \left(= \frac{U_a}{U_e}\right),\end{aligned}\quad (3)$$

da $V \gg 1$ ist. Die Bandbreite des Verstärkers wird um den Faktor

$$g := \frac{V}{V'} \quad (4)$$

erhöht.

2.1.2. Integrator

Der Schaltplan eines Integrators ist in Abbildung 3 gegeben. Hier gilt für den Knotenpunkt

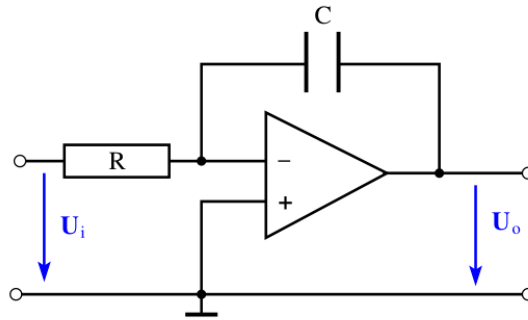


Abbildung 3: Schaltplan eines Integrators [3].

$$I_1 + I_C = 0$$

und mit

$$I_1 = \frac{U_1}{R}$$

und

$$\int I_C dt = Q = C U_a$$

für die Ausgangsspannung

$$U_a = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt. \quad (5)$$

Für eine Wechselspannung $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$ ist also

$$U_a = \frac{U_0}{\omega RC} \cos(\omega t). \quad (6)$$

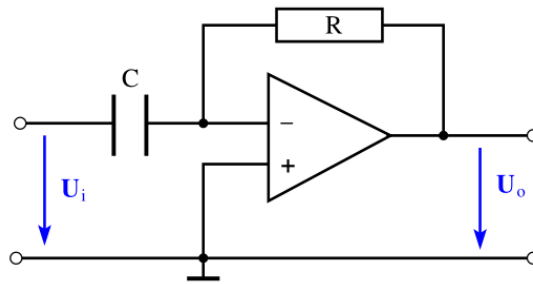


Abbildung 4: Schaltplan eines Differenzierers [3].

2.1.3. Differenzierer

Beim Differenzierer (Abbildung 4) sind Widerstand und Kondensator getauscht. Analog zum Integrator folgt mit

$$\begin{aligned} I_1 &= \dot{Q} = C\dot{U}_1 \\ U_a &= -RC \cdot \dot{U}_1 . \end{aligned} \quad (7)$$

Also mit einer Wechselspannung

$$U_a = -\omega RC U_0 \cdot \cos(\omega t) . \quad (8)$$

2.1.4. Schmitt-Trigger

Bei der Schaltung für den Schmitt-Trigger (Abbildung 5) wird nun eine Rückkopplung auf den nicht-invertierenden Eingang gegeben. Dadurch springt das Signal des Verstärkers schaltartig auf seinen maximalen Wert $(-)U_B$, wenn eine gewisse Schwellenspannung überschritten (unterschritten) wird. Der Schmitt-Trigger fungiert also als Schalter. Die Schwellenspannung ist dabei durch

$$U_{\pm} = \pm \frac{R_1}{R_2} U_B \quad (9)$$

gegeben.

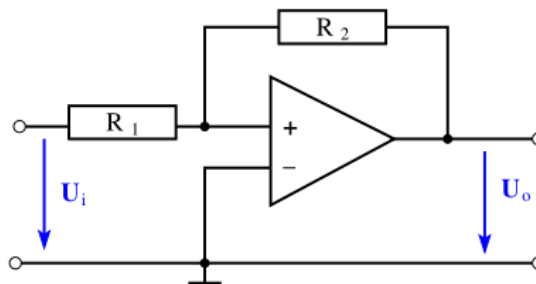
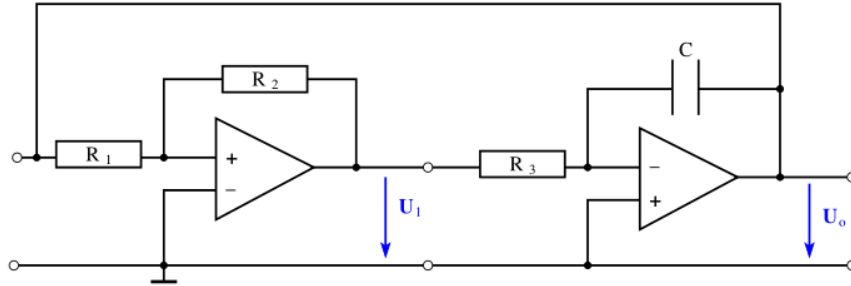


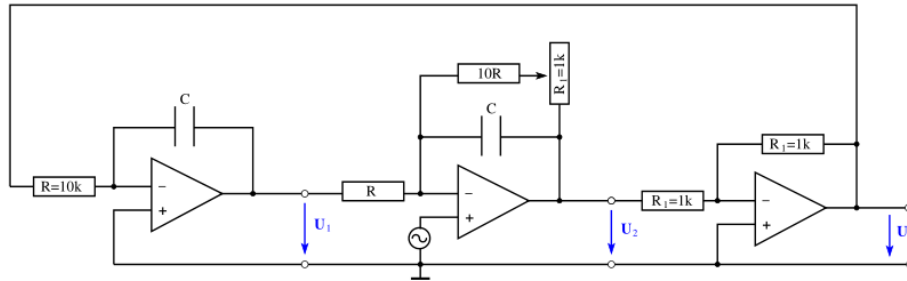
Abbildung 5: Schaltplan eines Schmitt-Triggers [3].

2.1.5. Generator

Zuletzt werden die Schaltungen eines Generators (Abbildung 6a) und eines Generators mit variierender Amplitude (Abbildung 7b) betrachtet. Der Generator besteht aus



(a) Generator.



(b) Generator mit variierender Amplitude.

Abbildung 6: Schaltplan eines Generators und eines Generators mit variierender Amplitude [3].

einem Schmitt-Trigger und einem Integrator. Der Schmitt-Trigger schaltet bei jedem überschreiten oder unterschreiten des Schwellenwertes U_{\pm} zwischen $\pm U_B$. Es liegt also eine Rechteckspannung an seinem Ausgang an. Am Ausgang des Integrators liegt dann eine Dreieckspannung an, die wieder auf den Eingang des Schmitt-Triggers rückgekoppelt wird. Die Frequenz des Generators ist durch

$$\nu_a = \frac{R_2}{4CR_1R_3} \quad (10)$$

und die Amplitude durch

$$U_0 = U_{\max} \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

gegeben.

Die Ausgangsspannung des Generators mit variierender Amplitude wird über die Differentialgleichung einer gedämpften Schwingung

$$\frac{d^2U_a}{dt^2} - \frac{\eta}{10RC} \frac{dU_a}{dt} + \frac{1}{(RC)^2} U_a = 0 \quad (12)$$

beschrieben. Die Konstante $-1 \leq \eta \leq 1$ ist dabei über R_1 einstellbar. Für $\eta < 0$ kann eine gedämpfte Schwingung gemessen werden, für $\eta > 0$ oszilliert das System. Die Schwingungsdauer ist dabei

$$T = 2\pi RC \quad (13)$$

und die Zerfallskonstante lautet

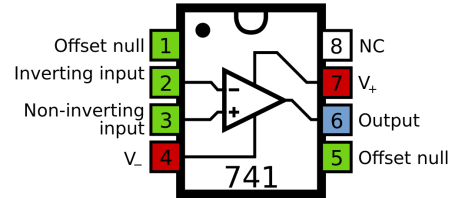
$$\tau = \frac{20RC}{|\eta|}. \quad (14)$$

3. Durchführung

Für die Durchführung des Versuches stehen ein Frequenzgenerator, ein Oszilloskop, eine Stromquelle, ein Steckbrett und LM741 Operationsverstärker, sowie diverse Widerstände und Kondensatoren zur Verfügung. Die verschiedenen Bauteile und die Pinbelegung des LM741 OpAmp's sind in Abbildung 7 zu sehen.



(a) Verfügbare Bauteile des Versuchsaufbaus [3].



(b) Pinbelegung des LM741 Operationsverstärkers [2].

Abbildung 7: Bestandteile des Versuchsaufbaus.

Zuerst wird die Schaltung des invertierenden Linearverstärkers nach Abbildung 2 aufgebaut. Es werden zuerst Widerstände $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ verwendet. Die Frequenzabhängigkeit der Amplitude und der Phase zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung werden über mehrere Größenordnungen der Frequenz gemessen ($1 \text{ kHz} - 100 \text{ kHz}$). Die Messung wird für zwei weitere Konfigurationen der Widerstände wiederholt.

Anschließend wird der Integrator nach Abbildung 3 mit $R = 10 \text{ k}\Omega$ und $C = 100 \text{ nF}$ aufgebaut. Wieder wird die Ausgangsspannung als Funktion der Frequenz gemessen. Außerdem wird die Form des Ausgangssignals für eine Rechteck- und Dreiecksspannung (und Sinusspannung) mithilfe des Oszilloskops gespeichert. Analoge Messungen werden für den Differenzierer nach Abbildung 4 mit $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 22 \text{ nF}$ vorgenommen. Der Schmitt-Trigger (Abbildung 5) wird mit $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ aufgebaut. Durch stetiges Erhöhen der Spannung oder mithilfe einer Dreiecksspannung wird die Schwellenspannung der Schaltung mehrfach bestimmt und gemittelt. Des Weiteren werden Messdaten der Eingangs- und Ausgangsspannung mithilfe des Oszilloskops gespeichert. Der Generator aus Abbildung 6a wird mit $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ und

$C = 1 \mu\text{F}$ aufgebaut. Es werden U_1 und U_a mit dem Oszilloskop gespeichert um anschließend die Frequenz und Amplitude des Generators bestimmen zu können.

Zuletzt wird der Generator mit variierender Amplitude (Abbildung 7b) mit $C = 22 \text{ nF}$ oder $C = 100 \text{ nF}$ aufgebaut. Die Dämpfung der Amplitude und die Schwingungsdauer werden mit dem Oszilloskop gemessen.

4. Auswertung

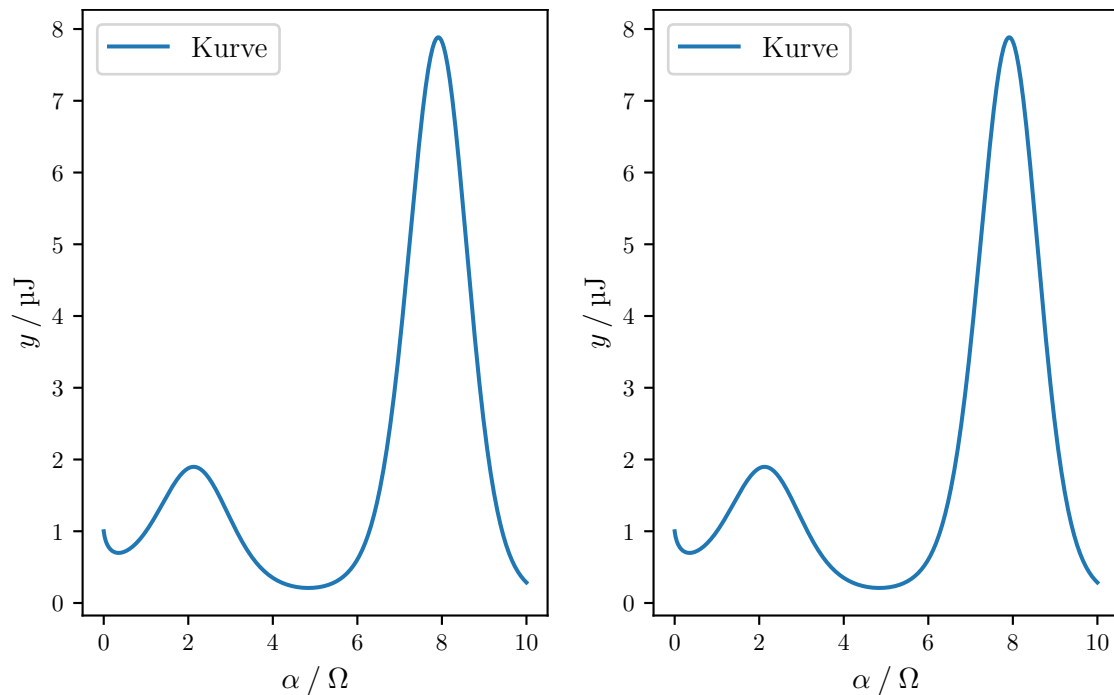


Abbildung 8: Plot.

Siehe Abbildung 8!

5. Diskussion

Literatur

- [1] Joachim Federau. *Operationsverstärker*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 9783658163730. DOI: 10.1007/978-3-658-16373-0.
- [2] Inductiveload. *LM741 Pinout Square*. Wikimedia. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LM741_Pinout_Square.svg (besucht am 14.01.2024).
- [3] *V51 - Schaltungen mit Operationsverstärkern*. TU Dortmund.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

