

Operationsverstärker (E 20)

Ziel des Versuches

In der physikalischen Messtechnik erfolgt die Verarbeitung elektrischer Signale (messen, steuern, regeln, verstärken) mit Hilfe elektronischer Schaltungen meist auf der Basis von Schaltungen mit Operationsverstärkern. In diesem Versuch werden Grundkenntnisse über den Operationsverstärker erworben und einige grundlegende Schaltungen realisiert und getestet.

Notwendige Vorkenntnisse

Transistor, Kennlinienfeld, Arbeitspunkt, Emitterschaltung, Differenzverstärker

Theoretische Grundlagen

Ein Operationsverstärker (OPV) ist ein mehrstufiger, hochverstärkender, galvanisch gekoppelter Differenzverstärker. Er kann sowohl Gleichspannung als auch Wechselspannung verstärken. Der OPV hat einen positiven (nichtinvertierenden) und einen negativen (invertierenden) Eingang. Die Differenz der beiden Eingangsspannungen wird mit dem Leerlaufverstärkungsfaktor multipliziert am Ausgang ausgegeben. Da die Leerlaufverstärkung eines OPV sehr hoch ist, wird diese über eine Gegenkopplung (phaseninvertierte Rückkopplung eines Teils des Ausgangssignals zum Eingang) angepasst. Über eine entsprechende Beschaltung kann man mit einem OPV neben den Grundschaltungen, wie Addierer, Subtrahierer, Differenzierer, Integrierer und Logarithmierer, auch Filterschaltungen oder komplette Regler aufbauen. Operationsverstärker haben als Eingangsstufe immer einen Differenzverstärker. Identische Transistoren vorausgesetzt, werden so Arbeitspunktschwankungen vollständig kompensiert. Danach kommt eine zweite Verstärkerstufe, eine Kurzschlussicherung und am Ausgang ein Gegentaktverstärker.

Der gegengekoppelte Verstärker

Die Gegenkopplung ist eine negative Rückkopplung. Dabei wird ein Teil der Ausgangsspannung U_A so auf den Eingang rückgekoppelt, dass eine Abschwächung des Eingangssignals U_E eintritt. Entsprechend der Abb. 1 ergibt sich:

$$U_A = A (U_E - B \cdot U_A)$$

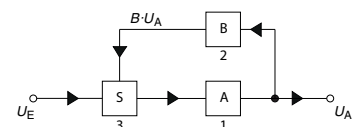


Abbildung 1: Gegengekoppelter Verstärker
1 – Verstärker mit Verstärkungsfaktor A
2 – Gegenkopplungsnetzwerk mit Gegenkopplungsfaktor B
3 – Subtraktionsnetzwerk

und daraus die Gesamtverstärkung

$$V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{A}{1 + AB} = \frac{\frac{1}{B}}{1 + \frac{1}{AB}} \quad .$$

Geht der Verstärkungsfaktor $A \rightarrow \infty$ folgt $V = 1/B$. Die Gesamtverstärkung wird allein durch das Gegenkopplungsnetzwerk bestimmt.

Die Eigenschaften eines idealen OPV sind:

1. Die Eingangswiderstände sind unendlich groß, damit sind die Eingangsströme gleich Null.
2. Die Leerlaufverstärkung A ist unendlich groß und der Ausgangswiderstand ist sehr klein.
3. Der OPV ist im Grunde ein Regler, der über die Gegenkopplung versucht die Eingangsspannungsdifferenz zu minimieren.

Die Eigenschaft 3 resultiert aus der Eigenschaft 2: Der OPV verstärkt die Eingangsspannungsdifferenz U_D zwischen seinen beiden Eingängen, sodass $U_A = U_D (U_E, U_A) \cdot A$ gilt. Für $A \rightarrow \infty$ gilt dann jedoch $U_D = U_A/A \rightarrow 0$ (siehe Abb. 2).

Anschaulich gesprochen: Wenn eine große Eingangsspannungsdifferenz anliegt, erzeugt der OPV eine große Ausgangsspannung, sodass über die Gegenkopplung die Eingangsspannungsdifferenz zu Null kompensiert wird.

Auf Grund dieser Eigenschaften kann der OPV als „black box“ betrachtet werden, d. h., die innere Schaltung ist nicht weiter von Interesse. Zur Berechnung von Schaltungen mit OPV reichen die Eigenschaften 1 und 3, die kirchhoffschen Gesetze sowie die Kennlinien der in der äußeren Beschaltung verwendeten Bauelemente.

Beim OPV besteht zwischen Eingangsspannung (Potentialdifferenz zwischen beiden Eingängen) und Ausgangsspannung ein funktionaler Zusammenhang, der von der äußeren Beschaltung abhängt.¹

Invertierender Verstärker

Der OPV als invertierender Verstärker wird mit Gegenkopplung betrieben. Dazu wird ein Teil der Ausgangsspannung über den Widerstand R auf den negativen Eingang des OPV zurückgeführt. Die Eingangsspannung U_E liegt über den Widerstand R_1 am negativen Eingang (U^-) des OPV an. Der positive Eingang (U^+) des OPV wird auf Masse gelegt. Aufgrund der negativen Rückkopplung und entsprechend der Eigenschaft 2 bzw. 3 wird dann U^- auf das Potential U^+ gezogen und es gilt: $U^- = U^+ = 0 \text{ V}$. Das ohmsche Gesetz verlangt für I_1 :

$$I_1 = \frac{U_E - U^-}{R_1} = \frac{U_E}{R_1}$$

und für

$$I_R = \frac{U^- - U_A}{R} = -\frac{U_A}{R} \quad .$$

Aufgrund der Eigenschaft 1 gilt für die Ströme $I_1 = I_R$, woraus für U_A folgt:

$$U_A = -U_E \frac{R}{R_1} \quad .$$

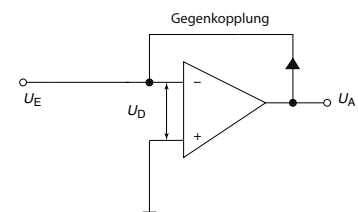


Abbildung 2: OPV

¹ Trotz unendlicher Leerlaufverstärkung ist der maximale Betrag der Ausgangsspannung durch die Betriebsspannung begrenzt.

Die Spannungsverstärkung v_U ist damit nur von der äußeren Beschaltung des OPV abhängig:

$$v_U = \left(\frac{U_A}{U_E} \right) = - \left(\frac{R}{R_1} \right) \quad (1)$$

Beim invertierenden Verstärker sind Ausgangs- und Eingangsspannung gegeneinander um 180° phasenverschoben. Der Eingangswiderstand der Schaltung des invertierenden Verstärkers beträgt $R_{\text{Eingang}} = R_1$.²

² Aus diesem Grund soll der leistungsfähigere Ausgang des Frequenzgenerators verwendet werden.

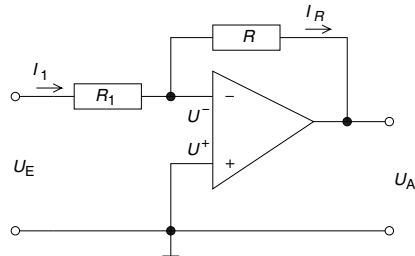


Abbildung 3: Schaltbild eines invertierenden Verstärkers

Nichtinvertierender Verstärker

Die nichtinvertierende Verstärkerschaltung ist eine Schaltung mit Reihen-Spannungs-Gegenkopplung. Beim nichtinvertierenden Verstärker liegt das Eingangssignal direkt am hochohmigen +Eingang. Das Ausgangssignal ist der Eingangsspannung proportional und gleichphasig. Die Spannungsverstärkung v_U ist größer oder gleich Eins:

$$v_U = \frac{R_1 + R}{R_1} = 1 + \frac{R}{R_1} \quad (2)$$

Für $R_1 = \infty$ und $R = 0$ erhält man einen sog. Spannungsfolger mit der Verstärkung Eins, der als Impedanzwandler eingesetzt wird.

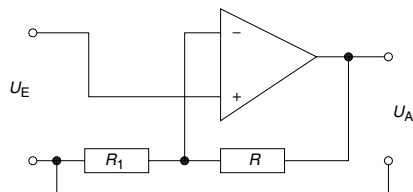


Abbildung 4: Schaltbild eines nichtinvertierenden Verstärkers

Addierer

Der Addierer ist eine spezielle Anwendung des invertierenden Verstärkers. Jede der Eingangsspannungen liefert einen Stromanteil, der am Widerstand R einen Spannungsabfall erzeugt.

$$U_A = - \sum_{i=1}^n \frac{R}{R_i} U_i \quad (3)$$

Differenzierer

Der Differenzierer ist ein invertierender Verstärker, bei dem R_1 durch einen Kondensator C ersetzt wird. Damit gilt für I_1

$$I_1 = C \frac{dU_E}{dt}$$

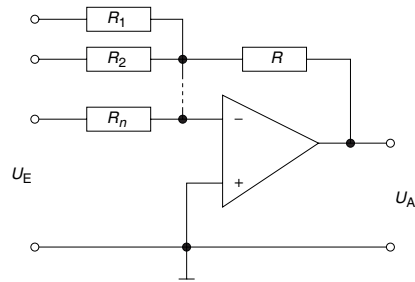


Abbildung 5: Schaltbild eines Addierers

und somit für die Ausgangsspannung:

$$U_A = -RC \frac{dU_E}{dt} \quad . \quad (4)$$

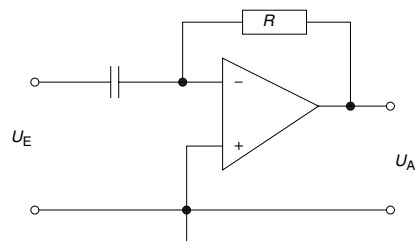


Abbildung 6: Schaltbild eines Differenzierers

Integrierer

Bei dem Integrierer in seiner einfachsten Ausführung gemäß Abb. 7 gilt für die Ausgangsspannung

$$U_A = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_E(t') dt' \quad . \quad (5)$$

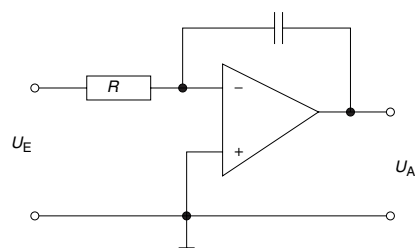


Abbildung 7: Schaltbild eines Integrierers

Logarithmierer

Ein Logarithmierer (Abb. 8) liefert eine Ausgangsspannung, die proportional zum Logarithmus der Eingangsspannung ist. Die dazu benötigten logarithmischen Kennlinien erzeugt man z. B. mit einer gegengekoppelten Diode in Flussrichtung ($I = I_S \exp(eU/kT)$). Rechnen Sie selbst!

$$U_A = \log\left(\frac{U_E}{R}\right) \quad (6)$$

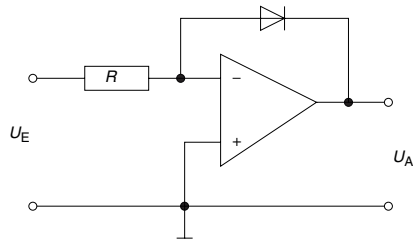


Abbildung 8: Schaltbild eines Logarithmierers

Versuchsaufbau und -durchführung

Für den Versuch stehen Ihnen ein Operationsverstärker, zwei Funktionsgeneratoren, ein CASSY-System, ein Steckbrett sowie diverse Widerstände und Kondensatoren zur Verfügung. Der OPV ist über eine bereitgestellte Spannungsquelle mit 12 V Wechselspannung zu versorgen. Die Funktionsgeneratoren dienen als Signalgeber und besitzen jeweils zwei Ausgänge mit unterschiedlicher Impedanz ($600\ \Omega$ und $50\ \Omega$). Nutzen Sie das Signal aus dem $50\ \Omega$ -Ausgang als Eingangssignal für die OPV-Schaltung (Warum?). Das Signal aus dem anderen Ausgang kann als Referenzsignal zur Aufzeichnung des Eingangssignals mit CASSY verwendet werden. Sowohl Ein- als auch Ausgangssignal sind mit dem CASSY-System aufzunehmen. Beachten Sie, dass der OPV im Betriebsmodus Amplifier zu betreiben ist.

Aufgabenstellung

1. Informieren Sie sich über die Grundlagen des Operationsverstärkers.
2. Bauen Sie einen invertierenden Verstärker gemäß Abb. 3 mit einer Verstärkung von 10, 100, 1000 auf und verstärken Sie Rechtecksignale. Beachten Sie dabei, dass die Ausgangsspannung die Versorgungsspannung nicht überschreiten kann. Wegen der Impedanz des Funktionsgeneratorausgangs sollte $R_1 = 4,7\ \text{k}\Omega$ gewählt werden. Beim OPV muss zuerst der sogenannte Offset korrigiert werden. Das ist erreicht, wenn z. B. bei (zur Null-Volt-Achse) symmetrischem Eingangssignal auch das Ausgangssignal symmetrisch ist.³
3. Bestimmen Sie für eine Verstärkung von 10 die Aussteuerungskennlinie $U_A = f(U_E)$ für $-1,5\ \text{V} \leq U_E \leq 1,5\ \text{V}$. Nutzen Sie zur Ermittlung der für die Kennlinie notwendigen Daten als Eingangssignal ein geeignetes periodisches Dreieckssignal.
4. Messen Sie mit Frequenzgenerator und Oszilloskop (Warum nicht mit CASSY?) den Frequenzgang im Bereich von 1 Hz bis 1 MHz bei Spannungsverstärkungen von 10 und 100. Bestimmen Sie Transitfrequenz, Grenzfrequenz und Bandbreite. Verwenden Sie für diese Messung ein sinusförmiges Eingangssignal.
5. Bauen Sie eine Additionsschaltung gemäß Abb. 5 mit der Verstärkung Eins auf. Verwenden Sie Eingangssignale aus zwei verschiedenen Funktionsgeneratoren. Nehmen Sie die Ein- und Ausgangssignale mittels CASSY für den Fall gleicher (ca. 100 Hz) und verschiedener (ca. 100 und 150 Hz) Frequenzen auf. (sinusförmiges Signal)

³ Die Arbeitskennlinie des OPV geht theoretisch durch den Nullpunkt. Beim realen OPV ist sie evtl. geringfügig verschoben, d. h., man muss eine kleine Spannungsdifferenz (Offset-Spannung) an die Eingänge legen, um die Ausgangsspannung auf Null zu bringen. Diese Offset-Spannung liegt im mV-Bereich und kann am OPV-Schaltbrett eingestellt werden.

6. Bauen Sie einen Differenzierer auf (Kondensator $0,1 \mu\text{F}$ und Widerstand $10 \text{k}\Omega$). Differenzieren Sie zuerst ein Dreieck- und anschließend ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von etwa 100Hz .
7. Bauen Sie eine Integrationsschaltung gemäß Abb. 7 auf (z. B. Kondensator mit $0,1 \mu\text{F}$; Widerstand mit $10 \text{k}\Omega$). Integrieren Sie Rechtecksignale mit einer Frequenz von etwa 100Hz bei drei unterschiedlichen Zeitkonstanten $\tau = RC$.
8. Ergänzen Sie die Integrationsschaltung dahingehend, dass ein (zur Null-Volt-Achse) symmetrisches Ausgangssignal erhalten wird.
9. Interpretieren und kommentieren Sie die Ergebnisse.