

5 Elektronik - Operationsverstärkerschaltungen

5.1 Funktion des Operationsverstärkers

Die Arbeitsweise von Operationsverstärkern wird von ihrer äußeren Beschaltung bestimmt, während der innere Aufbau in weitem Maß für das Verständnis seiner Anwendungen unerheblich ist. Er wird je nach äußerer Beschaltung entweder in linearen Anwendungen als Verstärker für Spannungen und Ströme verwendet (siehe Kap. 2) oder in nichtlinearen Anwendungen als Schalter (siehe Kap. 3), wobei dieser sowohl für Gleichsignale als auch für Wechselsignale Verwendung findet. Für Wechselsignale hoher Frequenz sind jedoch gewisse Einschränkungen zu beachten.

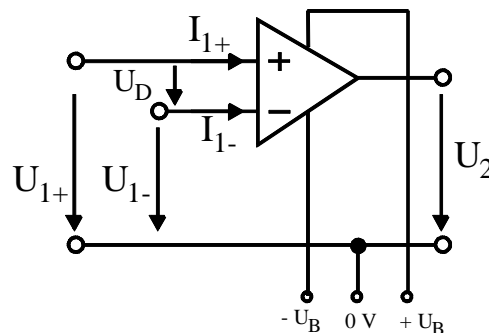


Abb. 5.1

Der Operationsverstärker (kurz OP) weist die in Abb. 5.1 gezeigten Anschlüsse auf.

Zur Versorgung der inneren Elektronik des OP sind an die bestimmungsgemäßen Anschlüsse die positive Versorgungsspannung ($+U_B$, „Betriebsspannung“) und die negative Versorgungsspannung ($-U_B$) anzuschließen. Die Größe dieser Spannung ist vom jeweiligen OP-Typ abhängig und wird im entsprechenden Datenblatt angegeben (z.B. $\pm 12\text{ V}$, $\pm 15\text{ V}$). Die Null Volt-Anschlüsse für Versorgungsspannung, Ein- und Ausgangsspannung sind miteinander verbunden.

Die Eingangsklemmen werden invertierender (-) Eingang, bzw. nicht-invertierender (+) Eingang genannt, was sich aus folgender prinzipiellen Funktion des OP erklärt:

$$U_2 = V_0 \cdot (U_{1+} - U_{1-}) = V_0 \cdot U_D \quad (5.1)$$

V_0 ist die offene Verstärkung, d.h. Verstärkung des unbeschalteten OP.
(im Gegensatz zur Verstärkung mit Gegenkopplung)

Der OP verstärkt die unmittelbar an seinen Eingängen anliegende Differenzspannung U_D um den Verstärkungsfaktor V_0 .

Die Verstärkung V_0 beträgt im realen Fall ca. $10^4 - 10^7$, für idealisierte (und in der Praxis ausreichend genaue) Überlegungen kann sie jedoch als unendlich groß angesehen werden.

Wenn nun als U_{1+} eine positive Gleichspannung (gegenüber 0 V) und als U_{1-} die Spannung 0 V angelegt wird, dann ergibt sich eine positive Eingangsdifferenzspannung U_D . Diese wird vom OP mit V_0 verstärkt an den Ausgang gelegt (U_2), wie folgendes Zahlenbeispiel zeigt:

Beispiel: $U_{1+} = 1 \text{ V}$, $U_{1-} = 0 \text{ V}$, $V_0 = 10^6$ --> $U_2 = 10^6 \cdot 1 = 1000000 \text{ V} = 1 \text{ MV} (??)$

Der OP würde also an seinem Ausgang eine Spannung von 1 Mio. Volt erzeugen, was natürlich nicht möglich ist, wie folgenden Überlegung zeigt:

Abb. 2 zeigt vereinfacht, dass im Inneren des OP der Ausgang über Transistoren (vereinfacht als steuerbare Stromquellen anzusehen) mit $+U_B$, bzw. $-U_B$ verbunden ist. Somit kann U_2 in positiver Richtung maximal $+U_B$ minus ca. 2 V als Spannungsabfall am Transistor aufweisen, bzw. in negativer Richtung maximal einen Wert, welcher um den Transistorspannungsabfall von ca. 2 V positiver ist als $-U_B$.

Beispiel: $+U_B = +15 \text{ V}$ --> $U_{2,max} = 15 - 2 = 13 \text{ V}$
 $-U_B = -15 \text{ V}$ $U_{2,min} = -15 - (-2) = -13 \text{ V}$.

$U_{2,max}$ und $U_{2,min}$ müssen nicht notwendigerweise betragsmäßig gleich groß sein.

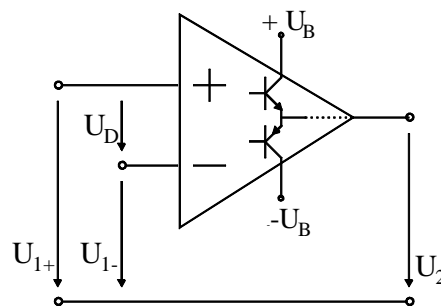


Abb. 5.2

Daraus ergibt sich, dass der OP die Eingangsdifferenzspannung U_D um den Faktor V verstärkt an den Ausgang (U_2) liefert (und dies in einem linearen Verhältnis zwischen U_D und U_2 ; linearer Bereich des OP), dies jedoch nur soweit es ihm von der ihn versorgenden Betriebsspannung ermöglicht wird. Sobald also U_D so groß ist, dass U_2 den maximalen Wert in positiver oder negativer Richtung erreicht, kann U_2 nicht weiter steigen (die Transistoren sind bereits voll durchgesteuert).

Abb. 5.3 zeigt diese Begrenzung für folgende Werte: $+U_B = +15 \text{ V}$, $-U_B = -15 \text{ V}$, $V_0 = 10^6$

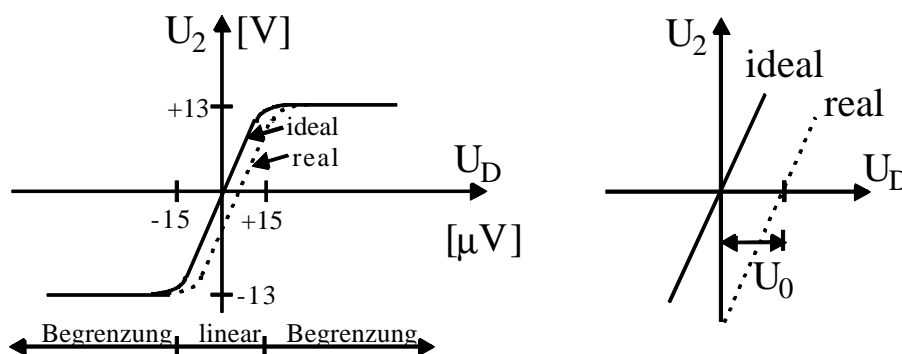


Abb. 5.3

Es wird deutlich, dass bereits bei einer sehr kleinen Eingangs-Differenzspannung U_D von lediglich ca. $10 \mu\text{V}$ ($= 10 \cdot 10^{-6} \text{ V}$) der OP an den Anschlag getrieben wird.

Für Anwendungen als linearer Verstärker (d.h. zum Erzeugen einer zur Eingangsspannung U_D proportionalen Ausgangsspannung) ist der OP ohne äußere Zusatzbeschaltung nicht verwendbar.

Kleinste Eingangsspannungen, wie z.B. durch elektrostatische Aufladung der Luft, führen bereits zum „Endausschlag“ des OP (Übersteuerung). Für das lineare, definierte Verstärken von Spannungen ist also der OP von außen mit einer geeigneten Beschaltung zu versehen (z.B. Gegenkopplung mit Ohm'schen Widerständen)

Ohne äußere Beschaltung mittels Gegenkopplung ist der OP nur in nichtlinearer Anwendung als Komparator einsetzbar (siehe später)

Wechselspannungen:

Die Ausführungen bezüglich Linearität gelten natürlich ebenso für Wechselspannungen, welche bei Übersteuerung sowohl im positiven als auch im negativen Bereich auf den Maximalwert begrenzt werden.

Darüberhinaus ist für hohe Frequenzen eine Abnahme der Verstärkung und eine Phasenverschiebung festzustellen.

Offsetspannung:

Wie die Detailansicht der Abb. 5.3 zeigt, verläuft die Kennlinie nur für idealisierte Betrachtungen durch den Koordinaten-Nullpunkt, während in Realität die sogenannte Offsetspannung U_0 berücksichtigt werden muss.

Erklärung:

Der OP weist zwei separate Eingänge (+,-) auf, die im Inneren zwei verschiedenen Verstärkerstufen zugeführt werden. Nichtideale Eigenschaften des OP (z.B. Bauteiltoleranzen, nicht exakt identische Eigenschaften der beiden Stufen) führen nun dazu, dass bei Anlegen der Spannung $U_D = 0 \text{ V}$ der OP am Ausgang eine von Null verschiedene Spannung U_2 erzeugt (siehe Abb. 5.3 rechts). Die Offsetspannung U_0 ist nun jene Spannung, welche als Differenzspannung U_D am Eingang des OP anzulegen ist, um U_2 auf Null zu bringen.

5.2 Lineare Anwendungen

Gegenkopplung

Wie bereits in Kap. 5.1 erläutert, ist der OP als linearer Verstärker nur dann einsetzbar, wenn er außen in Form einer Gegenkopplung beschaltet wird. Gegenkopplung bedeutet, dass ein Teil der Ausgangsspannung an den invertierenden (-) Eingang rückgeführt wird, und dort somit die verursachende Eingangsdifferenzspannung U_D verringert.

Im Unterschied dazu wird bei einer Mitkopplung (s. Kap. 5.3) ein Teil der Ausgangsspannung des OP auf den nicht-invertierenden (+) Eingang rückgeführt.

5.2.1 Nicht-invertierender Verstärker

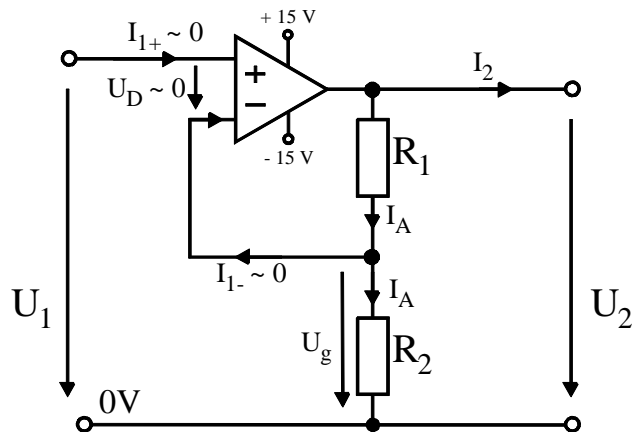


Abb. 5.4

Wirkungsweise

Aufgrund des inneren OP-Aufbaus (unendlich hoher Eingangswiderstand) können die Eingangsströme I_{1+} , I_{1-} mit Null angesetzt werden.

Der Ausgangsstrom der Schaltung (I_2) ist im Leerlauf Null (d.h., wenn keine weiteren Verbraucher, bzw. wenn Verbraucher mit unendlich hohem Eingangswiderstand an U_2 angeschlossen sind).

Gegenkopplung:

Die folgenden Betrachtungen gelten für den ersten, unmittelbar dem Einschalten der Eingangsspannung U_1 ($=U_{1+}$) folgenden Zeitabschnitt. Der OP weist eine begrenzte Reaktionsgeschwindigkeit auf, d.h., die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung (dU_2/dt) ist aufgrund der Innenschaltung des OP limitiert (z.B. $5 \text{ V}/\mu\text{s}$).

1. Zeitpunkt:

Es sei z.B. die Eingangsspannung U_1 ($=U_{1+}$, nicht-invertierend) ein positiver Gleichspannungswert von $+5 \text{ V}$, und U_{1-} gleich 0 V . Der OP verstärkt diese positive Eingangsdifferenzspannung $U_D = +5 \text{ V}$ mit der Verstärkung $V = \infty$. Im ersten Augenblick wird nun U_2 auf einen positiven Wert ansteigen, und entsprechend dem Spannungsteiler-Verhältnis der beiden Widerstände R_1 , R_2 wird auch die Gegenkopplungsspannung U_g ansteigen:

$$\frac{U_g}{R_2} = \frac{U_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

$$U_g = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_2 \quad (5.3)$$

Da $U_g = U_{1-}$ ist, wird die Spannung U_D mit diesem Anstieg von U_g wie folgt kleiner:

$$U_D = U_{1+} - U_{1-} = U_{1+} - U_g \tag{5.4}$$

2. Zeitpunkt:

Somit steigt U_2 um einen gegenüber dem vorigen Zeitpunkt kleineren Wert an, was durch den Spannungsteiler R_1, R_2 auch für U_g gilt, so dass U_D ebenfalls geringer wird.

3. Zeitpunkt:

Der selbe Vorgang wiederholt sich nun mit einer wiederum kleineren Spannung U_D .

Die geschilderten Vorgänge setzen sich solange fort, bis die Ausgangsspannung U_2 des OP gerade so groß geworden ist, dass die Eingangsdifferenzspannung U_D durch die von U_2 verursachte Gegenkopplungsspannung U_g zu Null geworden ist (bei unendlich hoher Verstärkung V_0 des OP; bei realen Werten für V_0 wird U_D einen von Null verschiedenen, aber sehr kleinen Wert annehmen).

$$U_2 = V_0 \cdot U_D = V_0 \cdot (U_1 - U_g) = V_0 \cdot \left(U_1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_2 \right) \tag{5.5}$$

Dieser „Einschwingvorgang“ der Gegenkopplung wurde zeitlich gedehnt geschildert und ist in Realität wenige μs nach dem Zuschalten von U_1 ($=U_{1+}$) abgeschlossen.

Resümee:

Bei Beschaltung des OP in Form einer Gegenkopplung kann unmittelbar nach dem Einschalten mit $U_D \approx 0 V$ gerechnet werden. Daraus folgt (z.B. durch Ansetzen der Kirchhoff'schen Maschengleichung für den Eingangskreis: $U_1 - U_g - U_D = 0$, mit $U_D = 0$), dass die Eingangsspannung U_1 gleich der Gegenkopplungsspannung U_g ist.

Für den als nicht-invertierender Verstärker beschalteten OP gilt somit folgender Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung U_2 und Eingangsspannung U_1 :

$$U_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot U_1$$

(5.6)

Der Eingangsstrom I_1 in dieser Schaltung ist gleich dem OP-Eingangsstrom I_{1+} und somit näherungsweise gleich Null, so dass der Eingangswiderstand des nicht-invertierenden Verstärkers als unendlich hoch betrachtet werden kann.

5.2.2 Spannungsfolger (Impedanzwandler)

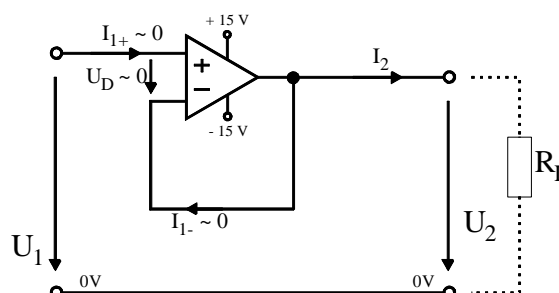


Abb. 5.5

Ein Vergleich der Abb. 5.5 mit Abb. 5.4 zeigt, dass der Spannungsfolger lediglich einen Sonderfall des nicht-invertierenden Verstärkers mit $R_1 \rightarrow 0$, $R_2 \rightarrow \infty$ darstellt.

Daraus folgt für den Zusammenhang zwischen U_2 und U_1

$$U_2 = \left(1 + \frac{0}{\infty}\right) \cdot U_1 \tag{5.7}$$

$$U_2 = U_1 \tag{5.8}$$

Es „folgt“ also die Ausgangsspannung U_2 direkt und mit selbem Vorzeichen der Eingangsspannung U_1 .

Der Sinn der Schaltung erklärt sich aus der zweiten Bezeichnung „Impedanzwandler“, denn sie weist einen sehr hohen (für „ideale“ OP’s: unendlich hohen) Eingangswiderstand und einen sehr kleinen (für „ideale“ OP’s: Null Ohm) Ausgangswiderstand auf. Dadurch wird z.B. eine dem OP vorgeschaltete Schaltung nicht belastet, da von ihr kein Strom in Richtung der hochohmigen OP-Schaltung abfließt.

Die Energie zur Versorgung der Last R_L ($P = U_2 I_2$) wird über die OP-Versorgung zugeführt.

5.2.3 Invertierender Verstärker

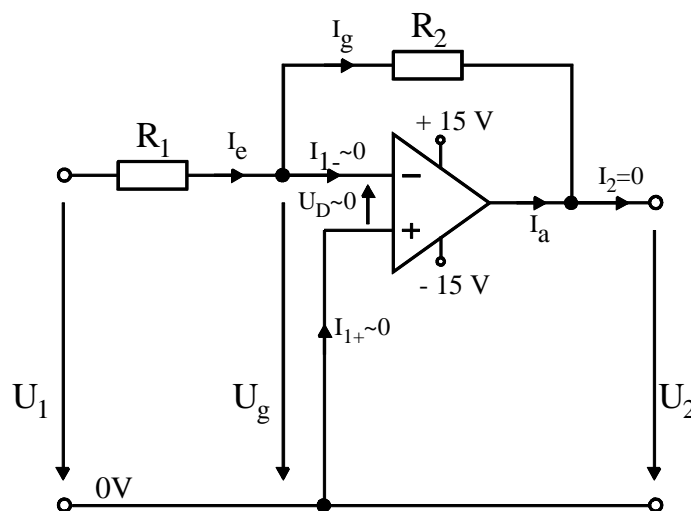


Abb. 5.6

Hier wird wiederum eine Gegenkopplung angewendet, d.h. Rückkopplung des Ausgangs auf den invertierenden (-) Eingang.

Wirkungsweise

Aufgrund seines inneren Aufbaus (unendlich hoher Eingangswiderstand) können die Eingangsströme I_{1+} , I_{1-} mit Null angesetzt werden.

Der Ausgangsstrom der Schaltung (I_2) ist im Leerlauf Null (d.h., wenn keine weiteren Verbraucher an U_2 , bzw. wenn Verbraucher mit unendlich hohem Eingangswiderstand angeschlossen sind).

Gegenkopplung:

Die folgenden Betrachtungen gelten für den ersten, unmittelbar auf das Einschalten der Eingangsspannung U_1 folgenden Zeitabschnitt.

1. Zeitpunkt:

Es sei z.B. die Eingangsspannung U_1 ein positiver Gleichspannungswert von +5 Volt, während U_{1+} durch die Verbindung zur Masse (0 V) immer Null Volt beträgt, so dass im ersten Zeitpunkt U_D gleich -5V ist.. Der OP verstärkt nun diese negative U_D mit $V_0 = \infty$. Im ersten Augenblick wird nun U_2 auf einen negativen Wert ansteigen, d.h., dass nun folgender Ersatzstromkreis vorliegt:

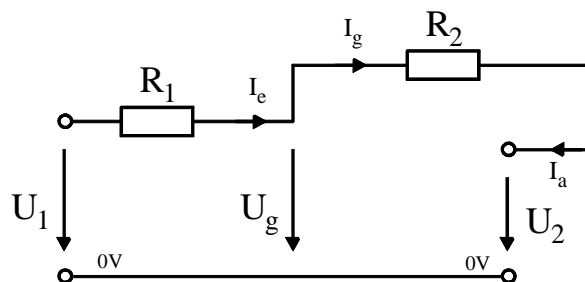


Abb. 5.7

Da nun U_1 positiv ist und U_2 negativ wird, verschiebt sich auch die Gegenkopplungsspannung U_g ($= U_{1-}$ des OP) mit negativer werdender U_2 in negative Richtung (entsprechend dem Spannungsteiler-Verhältnis der beiden Widerstände R_1 , R_2).

Durch die negativer werdende OP-Eingangsspannung U_{1-} ($= U_g$) wird U_D kleiner, so dass auch der Anstieg von U_2 ($=V_0 U_D$) kleiner wird.

Dieser Vorgang wiederholt sich nun solange, bis die Ausgangsspannung U_2 des OP gerade so groß geworden ist, dass die Eingangsdifferenzspannung U_D durch die von U_2 verursachte Gegenkopplungsspannung U_g zu Null geworden ist (bei unendlich hoher Verstärkung V_0 des OP), bzw. bei realen Werten für V_0 wird U_D einen von Null verschiedenen, aber sehr kleinen Wert annehmen.

Anmerkung: Für negative Eingangsspannungen ergeben sich negative Werte für die Ströme entsprechend dem Stromzählpfeilsystem von Abb. 5.7, d.h. der Strom (positive Ladungsträger) fließt physikalisch entgegengesetzt zur Richtung der Strompfeile.

Dieser ganze „Einschwingvorgang“ der Gegenkopplung wurde zeitlich gedehnt geschildert und ist in der Realität unmittelbar nach dem Einschalten der Eingangsspannung U_1 abgeschlossen.

Resümee

Bei Beschaltung des OP mit einer Gegenkopplung kann unmittelbar nach dem Einschalten mit $U_D \approx 0 \text{ V}$, also mit $U_g \approx 0 \text{ V}$ gerechnet werden.

Durch Anwendung der Kirchhoff'schen Knotenregel erhält man folgende Beziehung:

$$I_1 = I_g$$

$$\frac{U_1 - U_g}{R_1} = \frac{-(U_2 - U_g)}{R_2}, \text{ mit } U_g = 0 \text{ V}$$

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{-U_2}{R_2}$$

Für den als invertierender Verstärker beschalteten OP gilt somit folgender Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung U_2 und Eingangsspannung U_1 :

$$\boxed{U_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_1} \quad (5.5)$$

U_1 wird also mit dem Faktor R_2/R_1 verstärkt und invertiert, das bedeutet für Gleichspannungen eine Vorzeichenumkehr, bzw. für Wechselspannungen eine Phasenverschiebung von 180° .

Der Eingangsstrom I_1 in diese Schaltung ist, wie die Abb. 5.6 zeigt, im Gegensatz zum nicht-invertierenden Verstärker nicht gleich dem OP-Eingangsstrom ($I_{1.}$) sondern gleich dem über die Gegenkopplung fließenden Strom I_g und somit auch nicht näherungsweise gleich Null. Folglich ist der Eingangswiderstand des invertierenden Verstärkers nicht unendlich hoch.

Linearität

Man sieht bei den bisherigen Schaltungen, dass die Ausgangsspannung U_2 jeweils durch die äußere Beschaltung mit Widerständen bestimmt in einem linearen (proportionalen) Verhältnis zur Eingangsspannung U_1 steht. Dies gilt jedoch immer nur für den Fall, dass der OP nicht übersteuert wird, also U_2 sich immer zwischen $U_{a,\max}$ und $U_{a,\min}$ bewegt.

Beispiel: Invertierender Verstärker, $U_1 = 2 \text{ V}$, Scheitelwert, Sinus,
 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

$$\rightarrow U_2 = \frac{10}{1} \times U_1 = 20 \text{ V, Scheitelwert, Sinus (siehe Abb. 5.8)}$$

Es ergibt sich ein sinusförmiger, zu $u_1(t)$ proportionaler Verlauf von $u_2(t)$ lediglich in jenen Zeitintervallen, in welchen der OP nicht übersteuert wird, während in den übrigen Bereichen die Sinus-Spannung „abgekappt“ wird.

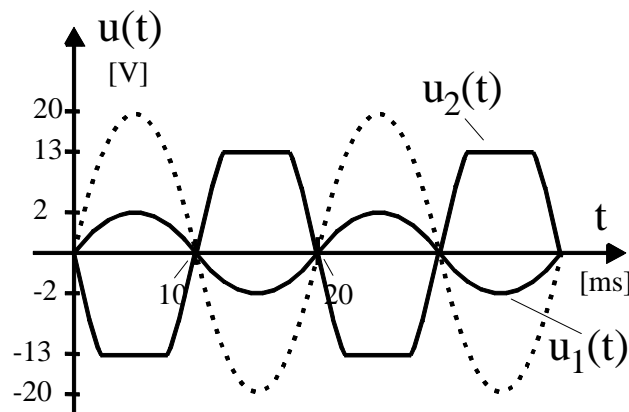


Abb. 5.8

Bei Übersteuerung des OP verliert jede linear angewendete OP-Schaltung ihre Linearität!

5.3 Nichtlineare Anwendungen

5.3.1 Komparator

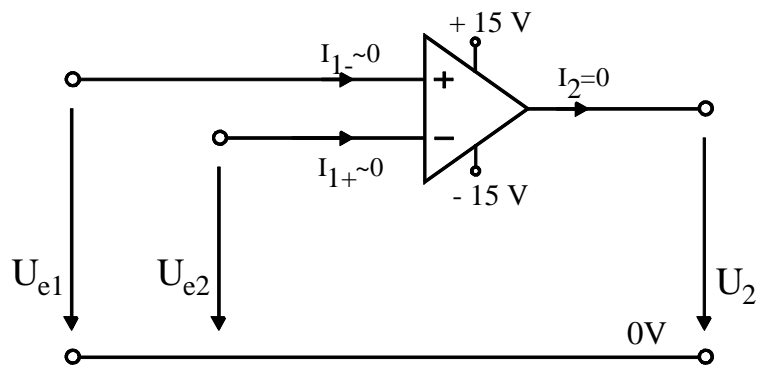


Abb. 5.9

Wie bereits in Kap. 5.1 angeführt, kann der unbeschaltete OP nicht als linearer Verstärker verwendet werden. Die einzige Anwendung des OP ohne äußere Beschaltung stellt der Vergleich zweier Spannungen dar („Komparator“).

In dieser Schaltung erzeugt der OP am Ausgang - abhängig vom Vorzeichen der Eingangsdifferenzspannung U_D und somit abhängig davon, ob U_{e1} größer oder kleiner als U_{e2} ist - entweder die maximale Spannung $U_{2,max} = U_B - 2 \text{ V}$, oder die minimale Spannung $U_{2,min} = -U_B - (-2 \text{ V})$.

$$U_2 = U_{2,max} = +U_B - 2 V \dots \text{für } U_{e1} > U_{e2} \quad (5.6)$$

$$U_2 = U_{2,min} = -U_B + 2 V \dots \text{für } U_{e1} < U_{e2} \quad (5.7)$$

Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5.10 graphisch dargestellt.

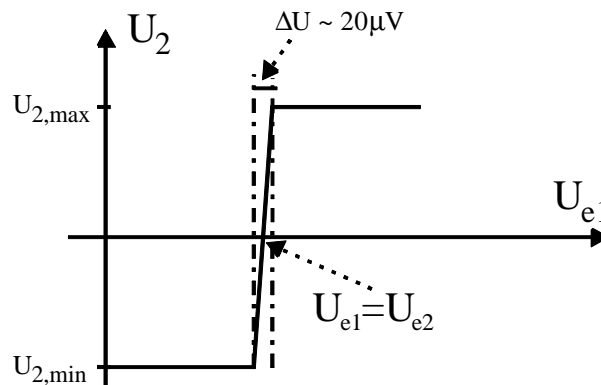


Abb. 5.10

5.3.2 Schmitt-Trigger (Schwellwert-Schalter)

Die Schaltung als Schmitt-Trigger ist derzeit nicht Inhalt und Lernstoff der Laborübungen und dient hier lediglich zur Abrundung des Themas.

Die äußere Beschaltung zeigt große Ähnlichkeit mit jener des nicht-invertierenden Verstärkers, mit dem wichtigen Unterschied, dass die Rückführung des Ausgangssignals zum nicht-invertierenden (+) -Eingang hin erfolgt (Prinzip der Mitkopplung).

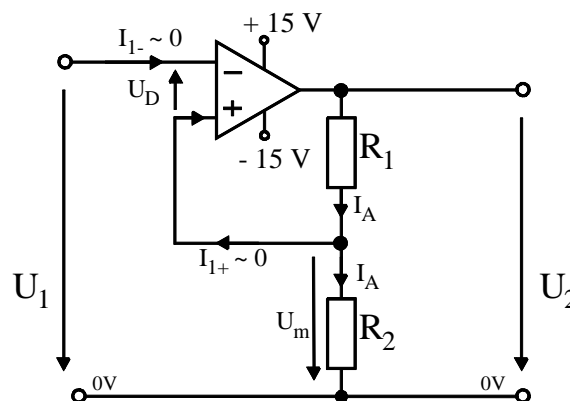


Abb. 5.11

Beachte: $U_D \neq 0 V$ (wie die folgenden Erklärungen zeigen).

Wirkungsweise

Der OP an sich hat wiederum einen unendlich hohen Eingangswiderstand, so dass die Eingangsströme mit Null angesetzt werden können ($I_{1+} = I_{1-} = 0$).

Wie beim nicht-invertierenden Verstärker kann somit das Spannungsteiler-Verhältnis der Widerstände R_1, R_2 aufgestellt werden:

Mitkopplung:Negativer Schwellwert:

Es sei z.B. die Eingangsspannung U_1 ($= U_{1-}$, invertierend) ein positiver Gleichspannungswert von +5 Volt, und U_{1+} gleich Null Volt. Der OP verstärkt nun diese negative Eingangsspannungsdifferenz $U_D = -5$ V mit der Verstärkung $V_0 = \infty$. Im ersten Augenblick wird nun U_2 auf einen negativen Wert ansteigen und entsprechend dem Spannungsteiler-Verhältnis der beiden Widerstände R_1 , R_2 wird auch die Mitkopplungsspannung U_m ansteigen:

$$U_m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_2 \quad (5.8)$$

Da $U_m = U_{1+}$ ist, wird U_D jedoch mit diesem Anstieg von U_m vergrößert:

$$U_D = U_{1+} - U_{1-} = U_m - U_{1-}$$

Das bedeutet, dass der OP seine Ursache, i.e. die Spannung U_D , vergrößert, und dadurch eine größere Spannung U_2 erzeugen will (im Gegensatz zum nicht-invertierenden Verstärker, welcher U_D bis auf Null verkleinert). Aus Kap. 5.1 ist bereits bekannt, dass U_2 betragsmäßig begrenzt ist, und bei der kleinsten Abweichung der Spannung U_D von Null - je nach Polarität - den maximalen oder den minimalen Wert annimmt. Der OP nimmt also bei positiver Eingangsspannung U_1 ($= U_{1-}$) sofort den minimalen Wert ($-U_B + 2V$), z.B. -13 V, an. Daraus ergibt sich für U_m ein von den Widerständen R_1 , R_2 abhängiger, ebenfalls negativer Wert.

$$U_{m,\min} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{2,\min} \quad (5.9)$$

Solange nun U_1 positiver ist als dieser negative Wert von U_m („negativer Schwellwert“), ist $U_D < 0$ V und $U_2 = U_{2,\min}$, bzw. $U_m = U_{m,\min}$.

Positiver Schwellwert:

Wenn nun U_1 negativer wird als der genannte negative Wert von U_m , dann wird $U_D > 0$ V, und U_2 springt sofort auf den maximalen Wert ($+U_B - 2$ V), bzw. U_m daraus resultierend ebenfalls auf einen maximalen, positiven Wert

$$U_{m,\max} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{2,\max} \quad (5.10)$$

Solange nun U_1 negativer ist als dieser positive Wert von U_m („positiver Schwellwert“), ist $U_D > 0$ V und $U_2 = U_{2,\max}$, bzw. $U_m = U_{m,\max}$.

Im folgenden Beispiel sind diese Ausführungen exemplarisch für eine sinusförmige Eingangsspannung U_1 skizziert. Dabei ist die sehr hohe Übergangsgeschwindigkeit, welche durch den OP-Typ bestimmt wird, durch Doppelpfeile dargestellt.

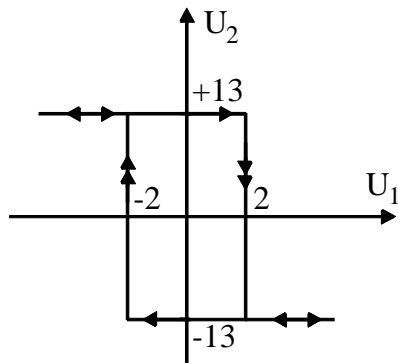


Abb. 5.12

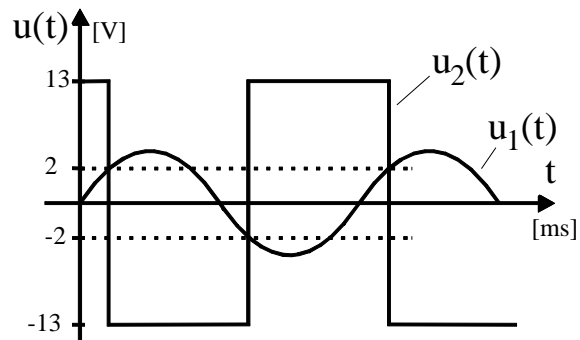


Abb. 5.13

Beispiel (Abb.5.12 und 5.13):
5.5kΩ,

$U_1 = 2 \text{ V, eff, Sinus}$

$U_{2,max} = +13 \text{ V, } R_1 =$

$U_{2,min} = -13 \text{ V, } R_2 = 1 \text{ k}\Omega$

$$U_{m,max} = \frac{1}{5.5 + 1} \cdot 13 = +2\text{V}$$

$$U_{m,min} = \frac{1}{5.5 + 1} \cdot (-13) = -2\text{V}$$

Im Unterschied zum Komparator, welcher für positive und für negative Richtung ein und denselben Schwellwert aufweist, sind diese beim Schmitt-Trigger unterschiedlich. Es besteht eine Schalthysterese zwischen positivem und negativem Schwellwert (siehe Abb. 5.10, Abb. 5.12).

5.3.3 Astabiler Multivibrator

Die Schaltung als astabiler Multivibrator ist derzeit nicht Inhalt und Lernstoff der Laborübungen und dient hier lediglich zur Abrundung des Themas.

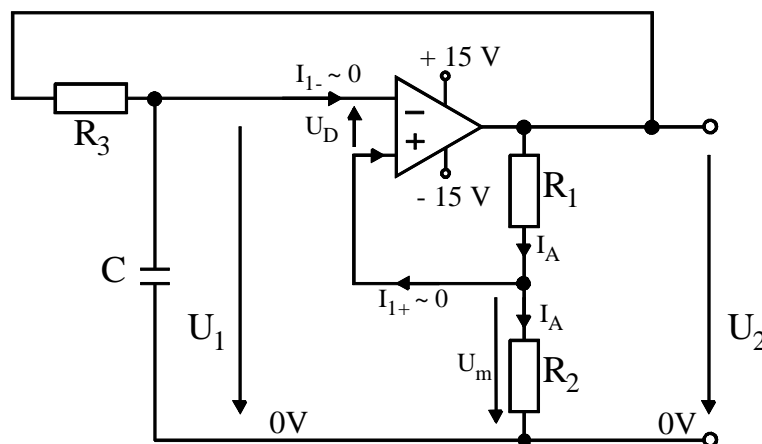


Abb. 5.14

Die Schaltung des astabilen Multivibrators ist ein Schmitt-Trigger, dessen Ausgangsspannung über einen RC- Tiefpass wieder auf den Eingang rückgeführt wird (Abb. 5.14).

Zur Erläuterung sei Abb. 5.15 betrachtet:

Das bereits bekannte Kippen der Ausgangsspannung ist strichpunktiert dargestellt, wie es für einen reinen Schmitt-Trigger auftreten würde, wobei für die Anschaulichkeit dieselben Kippspannung (+2 V, -2 V) wie in Abb. 5.13 gewählt wurde.

Wenn man vom Schmitt-Trigger ausgeht, dann würde die Ausgangsspannung des OP immer dann auf -13 V springen, wenn U_1 größer wird als +2 V, bzw. auf +13 V, wenn U_1 kleiner als -2 V wird.

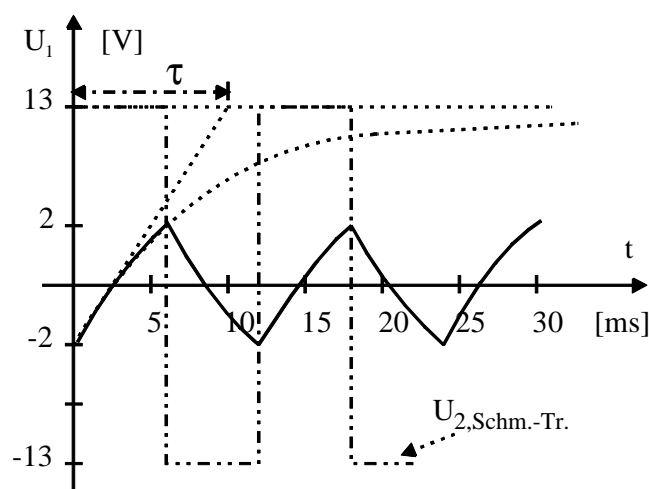


Abb. 5.15

Nun ist jedoch die Wirkung des Kondensators C zu berücksichtigen, welcher über den Widerstand R_3 von der Ausgangsspannung U_2 des OP aufgeladen. In Abb. 5.16 ist dieses Detail der Aufladung eines Kondensators über einen Widerstand nochmals gezeichnet (mit denselben Spannungsbezeichnungen wie in Abb. 5.14), für welches bekanntermaßen gilt:

$$U_C = U_1 = U_2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5.11)$$

mit

$$\tau = R_3 \cdot C \quad (5.12)$$

Daraus wird deutlich, dass sich die Kondensatorspannung (d.h. die Eingangsspannung U_1 des Multivibrators) gemäß einer e-Funktion an die vorne anliegende, rechteckförmige Spannung (d.h. Ausgangsspannung U_2 des OP) annähert (Abb. 5.17).

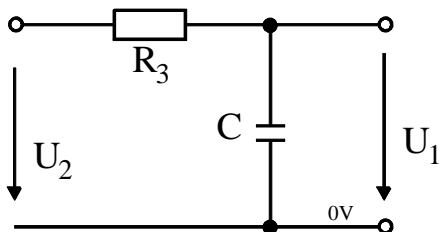


Abb. 5.16

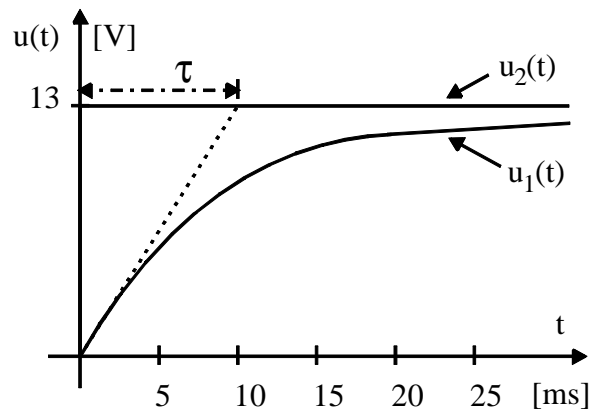


Abb. 5.17

Der Ladevorgang in der Abb. 5.17 ist im Spannungsverlauf des Multivibrators (Abb. 5.15) deutlich wiederzuerkennen. Bei einem gerade aktuellen Wert der OP-Ausgangsspannung U_2 von +12 V steigt die Eingangsspannung U_1 ausgehend von -2 V gemäß einer e-Funktion mit dem Endwert +12 V an (punktierter Verlauf), und sobald U_1 den Wert der positiven Kippspannung (in diesem Beispiel +2 V) erreicht, springt U_2 auf -12 V. Nun gelangt diese negative Spannung an den Tiefpass (R_3, C), so dass sich der Kondensator C unmittelbar auf den Wert -12 V umzuladen beginnt, und die Spannung U_1 gemäß einer e-Funktion mit dem Endwert -12 V absinkt, bis sie den Wert der negativen Kippspannung (-2 V) erreicht hat und sich das Spiel wiederum umkehrt.

Der astabile Multivibrator weist keinen stabilen Zustand auf, er erzeugt vielmehr eine Dauerschwingung mit dem in Abb. 5.15 gezeigten Verlauf, wobei der Wert des Umschaltpunktes (im gezeigten Beispiel +2 V, -2 V) von den Werten des Widerstandsteilers R_1, R_2 abhängt, die Frequenz wird weiters auch von den Werten R_3 und C bestimmt wird ($\tau = R_3 C$).