

Benutzte Quellen

- Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Crokol, Universität – Karlsruhe
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites>
- <http://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Ref/LPSA/Bode/BodeHow.html>
- <http://sound.westhost.com/project22.htm>

Benutzte Bezeichnungen

- Aufschrift der Thema, die zum ersten Mal erscheint
- Aufschrift der Thema, die schon bekannt ist

Verstärker und Komparatoren

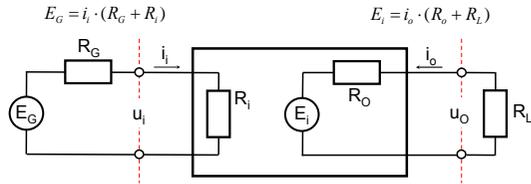
Lernziel:

- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
 - Welche sind die Kenngrößen der Verstärker?;
 - Welche Typen Rückkopplungen kennen Sie?;
 - Wie beeinflussen die Rückkopplungen die Kenngrößen?;
 - Welche sind die Funktionsprinzipien der OV?;
 - Welche sind die Grundanwendungen des OV?;
 - Was ist der Unterschied zwischen OV und Komparator?

Verstärker und Komparatoren

- **Kenngrößen der Verstärker**
- Rückkopplung
- Operationsverstärker mit Gegenkopplung
 - Invertierender
 - Nichtinvertierender
 - Filter
- Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

Analoge Schaltungen (Verstärker)



- $R_G \gg R_i$ (Stromgenerator) $R_o \gg R_L$
- $R_G \ll R_i$ (Spannungsgenerator) $R_o \ll R_L$
- $R_G \sim R_i$ (Leistungsgenerator) $R_o \sim R_L$

Kenngrößen

- Eingangswiderstand $R_i(R_E) = \frac{u_i}{i_i}$
- Ausgangswiderstand $R_o(R_A) = \frac{u_o}{i_o}$
- Spannungsverstärkung $K_u = \frac{u_o}{u_i}$
 $R_L = \infty \Rightarrow i_o = 0 \Rightarrow u_o = E_I \Rightarrow E_I = K_{u0} \cdot u_i$
 $R_L \neq 0 \Rightarrow K_u = K_{u0} \frac{R_L}{R_o + R_L}$
 $K_{u(NORM)} = \frac{K_u}{K_{u(1000Hz)}}$
- Stromverstärkung $K_i = \frac{i_o}{i_i}$
- Leistungsverstärkung $K_p = \frac{P_o}{P_i}$

Logarithmisches Verstärkungsmaß

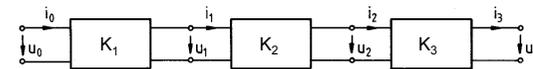
- Zur Kennzeichnung verwendet man die dimensionslose Einheit Bel (B). Gebräuchlich ist das Dezibel (dB).

$K_p, dB = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} \Rightarrow$ Definition

$K_u, dB = 20 \lg \frac{U_o}{U_i}$ bei $R_o = R_i$ $K_i, dB = 20 \lg \frac{i_o}{i_i}$ bei $R_o = R_i$

- Es ist so bequem in dB zu arbeiten, dass in der Praxis jede Größe ohne Dimension wird wie die Spannung (20lg) dargestellt.

Logarithmisches Verstärkungsmaß



$K_{u1} = \frac{u_1}{u_0}; K_{u2} = \frac{u_2}{u_1}; K_{u3} = \frac{u_3}{u_2}; K_u = \frac{u_3}{u_0} = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}$
 $\lg K_u = \lg(K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}) = \lg K_{u1} + \lg K_{u2} + \lg K_{u3}$

$K_{i1} = \dots$

$K_{p1} = \dots$

Kenngrößen

- Wirkungsgrad $\eta\%$

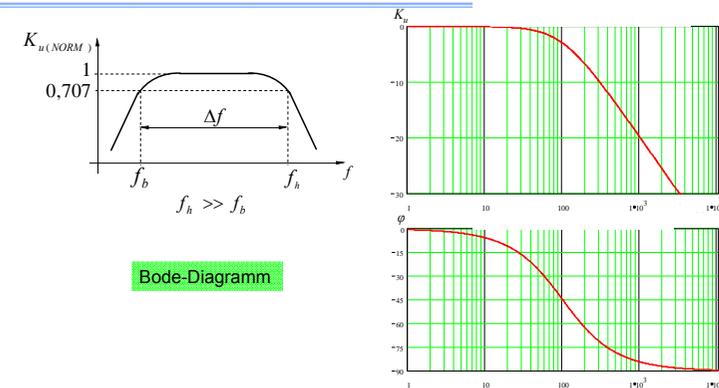
$$\eta = \frac{P_o}{P_i + P_{BAT}} \cdot 100, \text{ weil } P_i \ll P_{BAT}$$

- Klirfaktor $k\%$

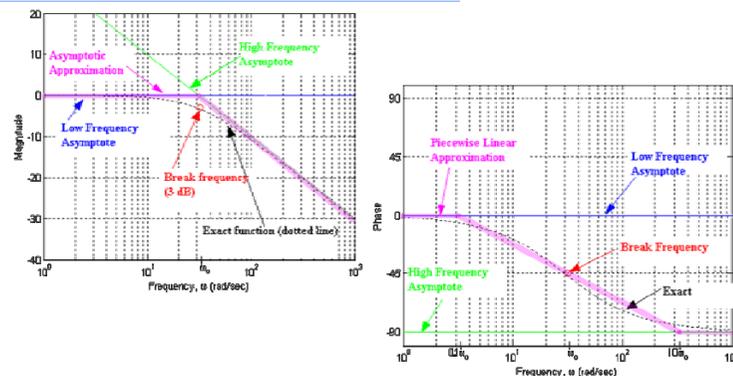
$$k = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_n^2}}{\sqrt{u_1^2}} \cdot 100$$

- Frequenzabhängigkeit
 - Amplitudengang
 - Phasengang

Amplitudengang, Phasengang



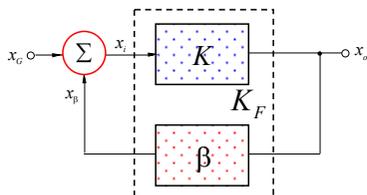
Amplitudengang, Phasengang



Verstärker und Komparatoren

- Kenngrößen der Verstärker
- Rückkopplung
 - Operationsverstärker mit Gegenkopplung
 - Invertierender
 - Nichtinvertierender
 - Filter
 - Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
 - Operationsverstärker mit Mitkopplung

Rückkopplung



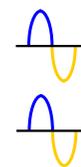
$$K = \frac{x_o}{x_i} \quad \text{Verstärkung ohne Rückkopplung}$$

$$\beta = \frac{x_p}{x_o} \quad \text{Rückkopplungsfaktor}$$

Typen von Rückkopplungen

- In Abhängigkeit der Phasen der Signale x_G und x_B

Mitkopplung



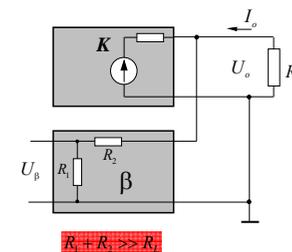
Gegenkopplung



Typen von Rückkopplungen

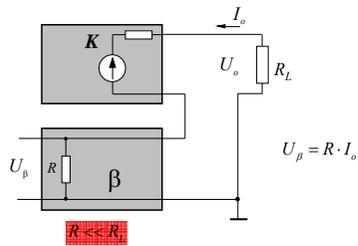
- Je nachdem ob man einen Teil der Ausgangsspannung oder der Ausgangsstromes gegengekoppelt wird, unterscheidet man
 - Spannungsrückkopplung
 - Stromrückkopplung
- Je nachdem ob man das Signal in Reihe oder parallel zu den Eingangsklemmen zuführt, unterscheidet man
 - Serierrückkopplung
 - Parallelrückkopplung

Spannungsrückkopplung



$$\beta = \frac{U_p}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Stromrückkopplung



$$U_\beta = R \cdot I_o$$

$R \ll R_L$

Gegenkopplung

$$x_i = x_G - x_\beta; \quad K_{F(-)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{x_o}{x_i + x_\beta} = \frac{x_o}{x_i \left(1 + \frac{x_\beta \cdot x_o}{x_i \cdot x_o} \right)} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{K}{F}$$

$F = 1 + \beta K$ - Gegenkopplungsgrad

$F > 1 \rightarrow K_{F(-)} < K$

Im Fall, dass $\beta K \gg 1$ für die Verstärkung folgt:

$$K_{F(-)} \approx \frac{1}{\beta}$$

Mitkopplung

$$x_i = x_G + x_\beta; \quad K_{F(+)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{K}{1 - \beta K} = \frac{K}{F}$$

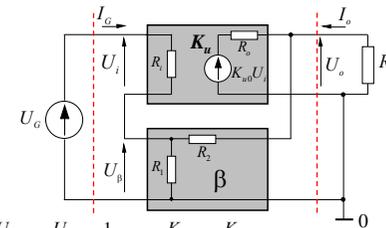
$F = 1 - \beta K$ - Mitkopplungsgrad

$F < 1 \rightarrow K_{F(+)} > K$

Bei $\beta K \sim 1 \rightarrow K_{F(+)} \rightarrow \infty$

Beispiel

Serienspannungsgegenkopplung



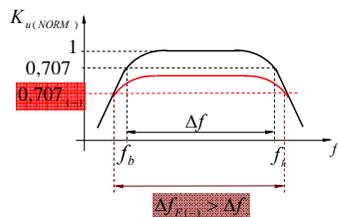
$$U_i = U_G - U_\beta$$

$$\beta = \frac{U_\beta}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$K_{uF} = \frac{U_o}{U_G} = \frac{U_o}{U_i + U_\beta} = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{U_\beta}{U_i}} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u} = \frac{K_u}{F}$$

$$R_{iF} = \frac{U_G}{I_G} = \frac{U_i + U_\beta}{I_G} = R_i + \frac{\beta K_u \cdot U_i}{I_G} = R_i (1 + \beta K_u) = R_i \cdot F$$

Einfluss der GK auf das Bode-Diagramm



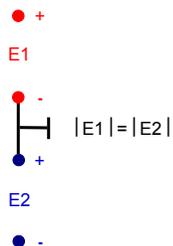
Verstärkungs-Bandbreite-Produkt: $GBP = K_u \Delta f \approx K_u f_h = const.$

Verstärker und Komparatoren

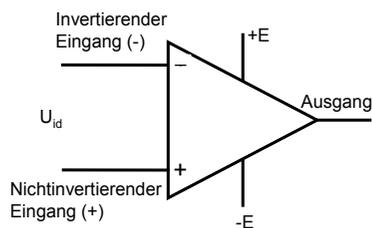
- *Kenngößen der Verstärker*
- *Rückkopplung*
- **Operationsverstärker mit Gegenkopplung**
 - Invertierender
 - Nichtinvertierender
 - Filter
- Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

Operationsverstärker (OV)

symmetrische Speisespannung



Schallsymbol



Operationsverstärker sind integrierte elektronische Schaltungen mit sehr hoher Leerlauf-Verstärkung ($V=10.000 \dots 500.000$), die frequenzabhängig ist. Durch eine äußere Beschaltung mit passiven Bauelementen lässt sich die Verstärkung entsprechend einer gewünschten mathematischen Operationen einstellen.

Idealer Operationsverstärker

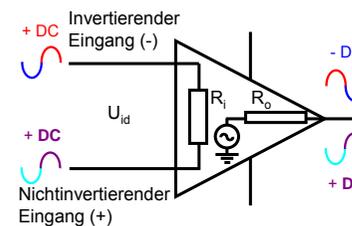
- $R_i \rightarrow \infty$ ($I_{iOV} = 0!!!$)
- $K_{ud} \rightarrow \infty$ ($U_{id} = 0!!!$)
- $R_o \rightarrow 0$
- $\Delta f \rightarrow \infty$

Realer OV

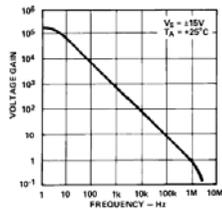
- $R_i \rightarrow 10^{12} \Omega$
- $K_{ud} \rightarrow 10^7$
- $R_o \rightarrow m\Omega$
- $\Delta f \rightarrow ?$

Wenn die Ausgangsspannung an die Aussteuergrenzen gesteuert wird, wird sie begrenzt (Übersteuerung). Der Verstärker ist dann nicht mehr linear und die Verstärkung wird zu null.

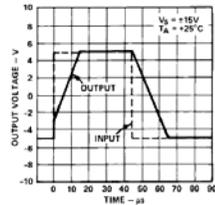
Ersatzschaltbild



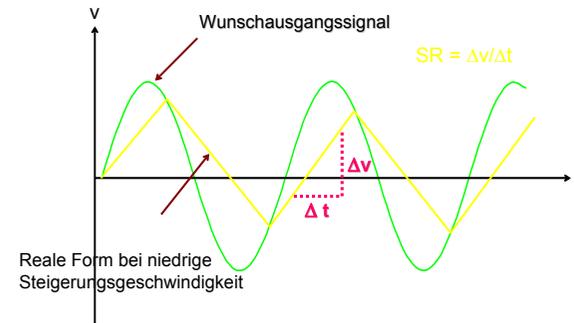
Daten eines Operationsverstärker



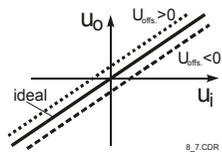
Leerlaufverstärkung (Frequenz)

Slew-Rate
(Steigerungsgeschwindigkeit)

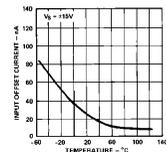
Daten eines Operationsverstärker



Daten eines Operationsverstärker



Offsetspannung



Offsetstrom

OV Interner Bau

- Am Eingang jedes OV steht einen Differenzverstärker
- Am Ausgang jedes OV steht einen Gegentaktverstärker

Differenzverstärker mit Transistoren

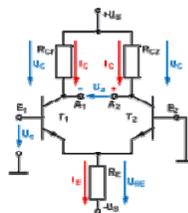
- Der Differenzverstärker ist ein Gleichspannungsverstärker und ist die Grundschaltung des Operationsverstärkers.
- Die grundlegende Idee dieser Schaltung ist, dass bei zwei identischen Emitterschaltungen identische Arbeitspunktänderungen auftreten.
- Zwischen den Kollektoren käme es zu keiner Spannungsdifferenz. Somit wäre der Einfluss der Arbeitspunktänderung auf das Ausgangssignal unterdrückt.

Differenzverstärker mit Transistoren

- Zum Funktionieren der Schaltung ist eine absolute Gleichheit der Transistoren vorauszusetzen.
- In der Praxis spricht man von Gleichtaktunterdrückung (common mode rejection). Sie ist das Maß für die Güte des Verstärkers.
- Die Gleichtaktunterdrückung ist umso besser, je größer R_E ist. Der kann aber nicht beliebig groß gewählt werden. Er bestimmt I_E in Abhängigkeit der Betriebsspannung.
- Daher wird statt dem Emitterwiderstand eine Transistor-schaltung verwendet die einen Konstantgleichstrom steuert.

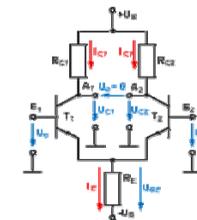
DV - Differenzbetrieb

- Wird an einem der Eingänge eine Spannung angelegt und der andere Eingang auf 0V gelegt, dann entsteht eine Differenzspannung U_a . Die Ströme I_{C1} und I_{C2} ändern sich gegensinnig. Dadurch ändern sich die Spannungen U_{C1} und U_{C2} . Es entsteht eine Differenzspannung U_a .
- Vergleicht man die Spannung an A_1 und A_2 gegen 0V, dann stellt man eine Phasendrehung von 180° an A_1 fest. A_2 ist ohne Phasendrehung zur Eingangsspannung U_e .



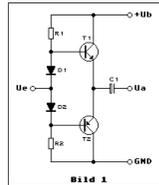
DV - Gleichtaktbetrieb

- Legt man an beiden Eingängen die gleiche Spannung U_e , dann erhöht sich bei beiden Transistoren der Emitter- und Kollektorstrom gleichmäßig. Es tritt keine Differenzspannung U_a auf. Die beiden Spannungen an $RC1$ und $RC2$ ändern sich gleichsinnig.
- Man nennt das den Gleichtaktbetrieb. Die Verstärkung ist Null. Der Differenzverstärker verstärkt nur Signalunterschiede zwischen $E1$ und $E2$.

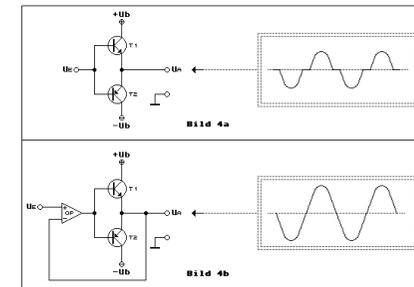


Gegentaktverstärker

- Ein Gegentaktverstärker hat zwei Verstärkungselemente. In diesem Fall zwei Transistoren, die sich die Verstärkung der positiven und negativen Halbwelle teilen. Der Gegentaktverstärker arbeitet dann im B-Betrieb. Leider werden dann kleine Signale unterhalb der UBE-Spannung (ca. 0,7 V) nicht verstärkt.
- Deshalb arbeitet ein Gegentaktverstärker im Regelfall im AB-Betrieb. Das ermöglicht die Verstärkung von großen und kleinen Signalen.

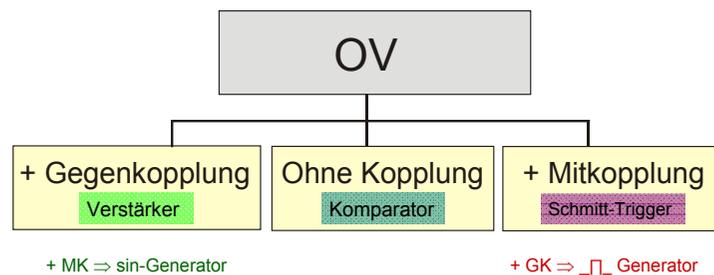


Gegentaktverstärker



Grundschiung ist die Kollektorschaltung.

Verwendung von Operationsverstärkern



Verstärker und Komparatoren

- Kenngrößen der Verstärker*
- Rückkopplung*
- Operationsverstärker mit Gegenkopplung*
 - Invertierender
 - Nichtinvertierender
 - Filter
- Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

Invertierender Verstärker (GK)

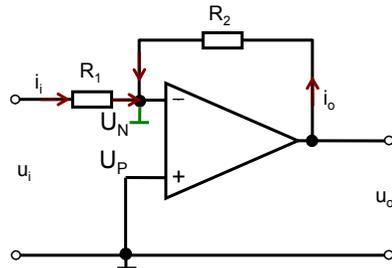
Von $U_{id} = 0$ folgt $U_N = U_P = 0 \text{ V}$

Von $I_{OY} = 0$ folgt $I_i = -I_o$

$u_i = i_i \cdot R_1$; $u_o = i_o \cdot R_2$

$K_u = u_o / u_i = i_o \cdot R_2 / i_i \cdot R_1$

$K_u = -R_2 / R_1$



Invertierender Verstärker (Beispiel 1)

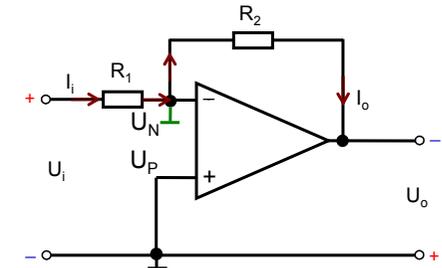
$U_i = +2 \text{ V}$; $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $U_o = ?$; $I_i = ?$; $I_o = ?$; $K_u = ?$

$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$

$I_o = U_o / R_2 = I_i$

$U_o = -2 \text{ V}$

$K_u = -1$



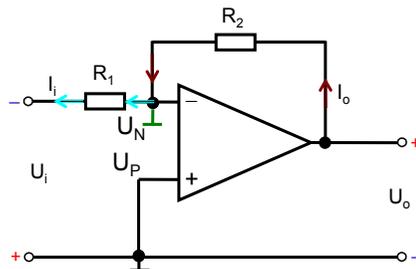
Invertierender Verstärker (Beispiel 2)

$U_i = -2 \text{ V}$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; $U_o = ?$; $I_i = ?$; $I_o = ?$

$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$

$I_o = U_o / R_2 = I_i$

$U_o = +4 \text{ V}$



Invertierender Verstärker (Beispiel 3)

$U_i = +2 \text{ V}$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; $R_T = 2 \text{ k}\Omega$;

$U_o = ?$; $I_i = ?$; $I_o = ?$; $I_{OY} = ?$

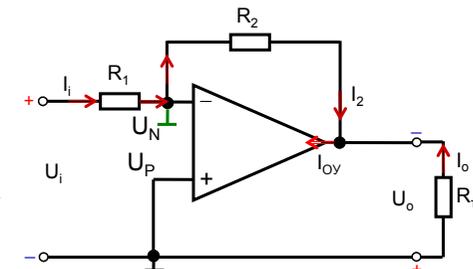
$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$

$I_2 = U_o / R_2 = I_i$

$U_o = -4 \text{ V}$

$I_o = U_o / R_T = 2 \text{ mA}$

$I_{OY} = I_2 + I_o = 2,2 \text{ mA}$



Invertierender Verstärker (Beispiel 4)

$U_i = -2 \text{ V}$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; $R_T = 2 \text{ k}\Omega$;
 $U_o = ?$; $I_i = ?$; $I_o = ?$; $I_{OY} = ?$

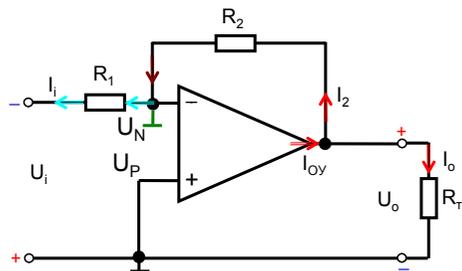
$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$

$I_2 = U_o / R_2 = I_i$

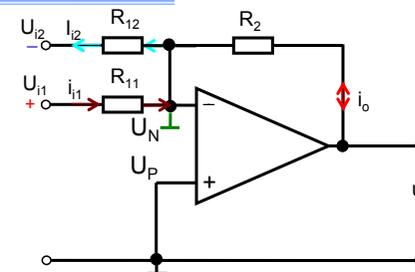
$U_o = +4 \text{ V}$

$I_o = U_o / R_T = 2 \text{ mA}$

$I_{OY} = I_2 + I_o = 2,2 \text{ mA}$



Invertierende Addierschaltung



$$\frac{U_o}{R_2} = - \left(\frac{+U_{i1}}{R_{11}} + \frac{-U_{i2}}{R_{12}} \right)$$

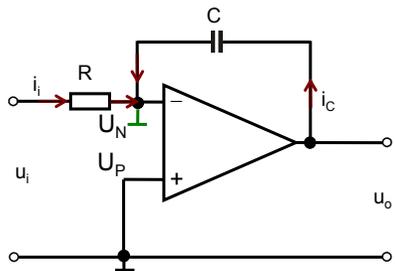
Die Richtung des Stromes i_o und das Polarität der Spannung u_o hängen von der Größe der beiden Eingangsspannungen ab.

Invertierender Integrator

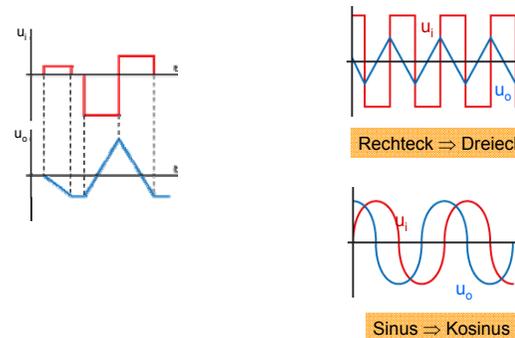
$$0 = \frac{u_i}{R} + i_c = \frac{u_i}{R} + C \frac{dU_o}{dt} \Rightarrow \frac{dU_o}{dt} = -\frac{u_i}{RC}$$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

$$u_o = -\frac{u_i t}{RC}$$



Invertierender Integrator



Verstärker und Komparatoren

- *Kenngößen der Verstärker*
- *Rückkopplung*
- *Operationsverstärker mit Gegenkopplung*
 - *Invertierender*
 - **Nichtinvertierender**
 - *Filter*
- *Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)*
- *Operationsverstärker mit Mitkopplung*

Nichtinvertierender Verstärker

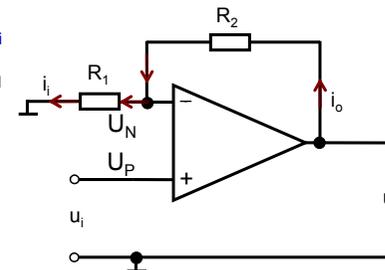
Von $U_{id} = 0$ folgt $U_N = U_P = u_i$

Von $I_{ioy} = 0$ folgt $I_i = I_o$

$$U_N = u_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = u_i$$

$$K_u = u_o / u_i = (R_1 + R_2) / R_1$$

$$K_u = 1 + R_2 / R_1$$



Nichtinvertierender Verstärker

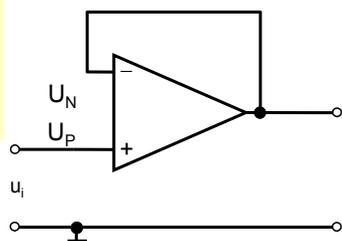
Dieser Verstärker hat einen extrem hohen Eingangswiderstand und einen niedrigen Ausgangswiderstand.

Eignet sich zur Anpassung von Verstärker mit hohem Ausgangswiderstand und eine niederohmige Last

Impedanzwandler

Bei $R_1 = \infty$ und $R_2 = 0 \Rightarrow K_u = 1$

Spannungsfolger



Subtrahierverstärker

Die Ausgangsspannung berechnet man mit Hilfe der Superposition:

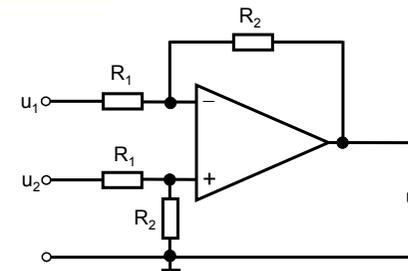
$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$

$$u_o = \frac{u_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right]$$

$$u_o = \frac{u_2 \cdot R_2 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) R_1} = \frac{R_2}{R_1} u_2$$

oder

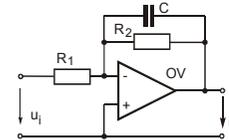
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$



Verstärker und Komparatoren

- *Kenngößen der Verstärker*
- *Rückkopplung*
- *Operationsverstärker mit Gegenkopplung*
 - *Invertierender*
 - *Nichtinvertierender*
 - *Filter*
- *Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)*
- *Operationsverstärker mit Mitkopplung*

Tiefpaß



$$\begin{aligned} \dot{K}_u &= -\frac{\frac{1}{R_2 + j\omega C}}{R_1} = \\ &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega CR_2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_g}} \end{aligned}$$

Bei kleinen Frequenzen $\omega \ll \omega_g$

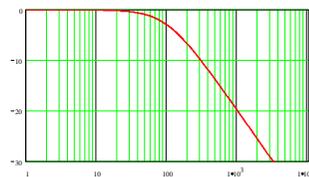
$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Bei großen Frequenzen $\omega \gg \omega_g$

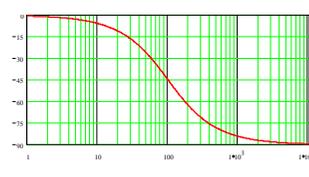
$$\dot{K}_u = -\frac{1}{j\omega CR_1}$$

Tiefpaß

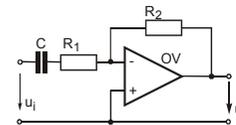
Amplitudengang



Phasengang



Hochpaß



$$\begin{aligned} \dot{K}_u &= -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = -\frac{R_2 \cdot j\omega C}{R_1 \cdot (1 + j\omega C \cdot R_1)} = \\ &= -\frac{R_2 \cdot j\omega / \omega_g}{R_1 \cdot (1 + j\omega / \omega_g)} \quad \omega_g = \frac{1}{C \cdot R_1} \end{aligned}$$

Bei kleinen Frequenzen $\omega \ll \omega_g$

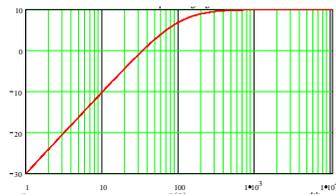
$$\dot{K}_u = -j\omega CR_2$$

Bei großen Frequenzen $\omega \gg \omega_g$

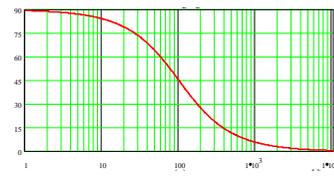
$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Hochpaß

Amplitudengang



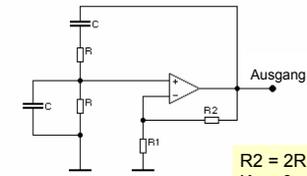
Phasengang



Sinusspannungsgenerator

Invertierender Verstärker + Mitkopplung mit Wien-Brücke

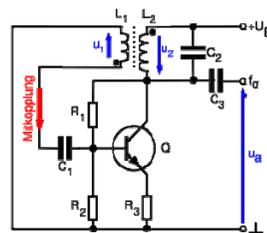
$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$



$R2 = 2R1$, damit
 $Ku = 3$

Meißner-Oszillator

- Ein Meißner-Oszillator ist ein rückgekoppelter Verstärker mit einem frequenzbestimmenden Schwingkreis.
- Die Schaltung ist nach ihrem Erfinder Meißner benannt, der sie 1913 vorstellte.

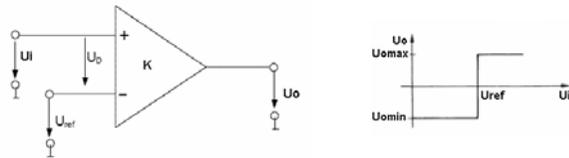


$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

Verstärker und Komparatoren

- *Kenngrößen der Verstärker*
- *Rückkopplung*
- *Operationsverstärker mit Gegenkopplung*
 - *Invertierender*
 - *Nichtinvertierender*
 - *Filter*
- **Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)**
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

Komparator



Von besonderer Bedeutung ist der Wert der:

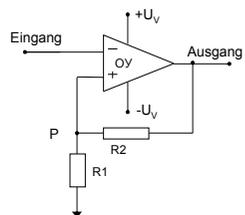
$K_{Ud} \Rightarrow$ um kleinere Spannungsunterschiede erkennbar zu werden

$S/R \Rightarrow$ um die Übergangszeit vom einen zu den anderen Zustand kleiner zu halten

Verstärker und Komparatoren

- Kenngrößen der Verstärker
- Rückkopplung
 - Invertierender
 - Nichtinvertierender
 - Filter
- Operationsverstärker mit Gegenkopplung
- Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

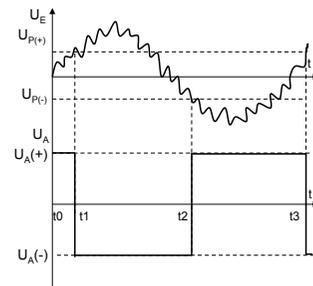
Schmitt-Trigger



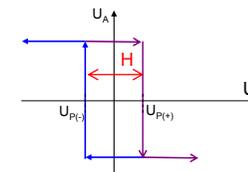
$$U_{P(+)} = U_{A(+)} \cdot R1 / (R1 + R2)$$

$$U_{P(-)} = U_{A(-)} \cdot R1 / (R1 + R2)$$

$$H = U_{P(+)} - U_{P(-)} = (U_{A(+)} - U_{A(-)}) \cdot R1 / (R1 + R2)$$

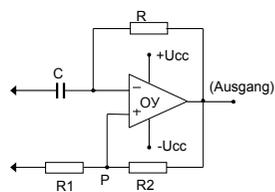


Schmitt-Trigger

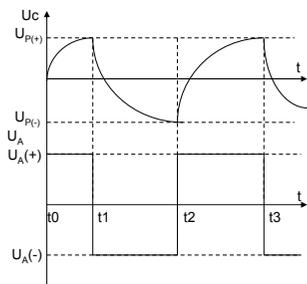


Übertragungskennlinie

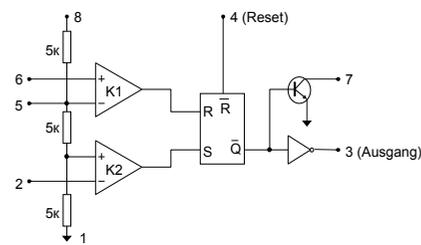
Multivibrator



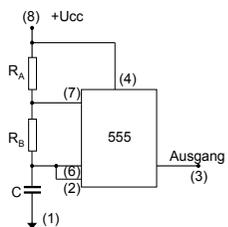
$$T = 2RC \cdot \ln(1 + 2R1 / R2)$$



Präzisions-Schmitt-Trigger (Timer 555)



Multivibrator mit timer 555



$$t_2 = R_B \cdot C \cdot \ln 2$$

$$t_1 = (R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln 2$$

$$T = (R_A + 2R_B) \cdot C \cdot \ln 2$$

