

# Benutzte Quellen

- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Crockol, Universität – Karlsruhe
- ❑ <http://www.elektronik-kompendium.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

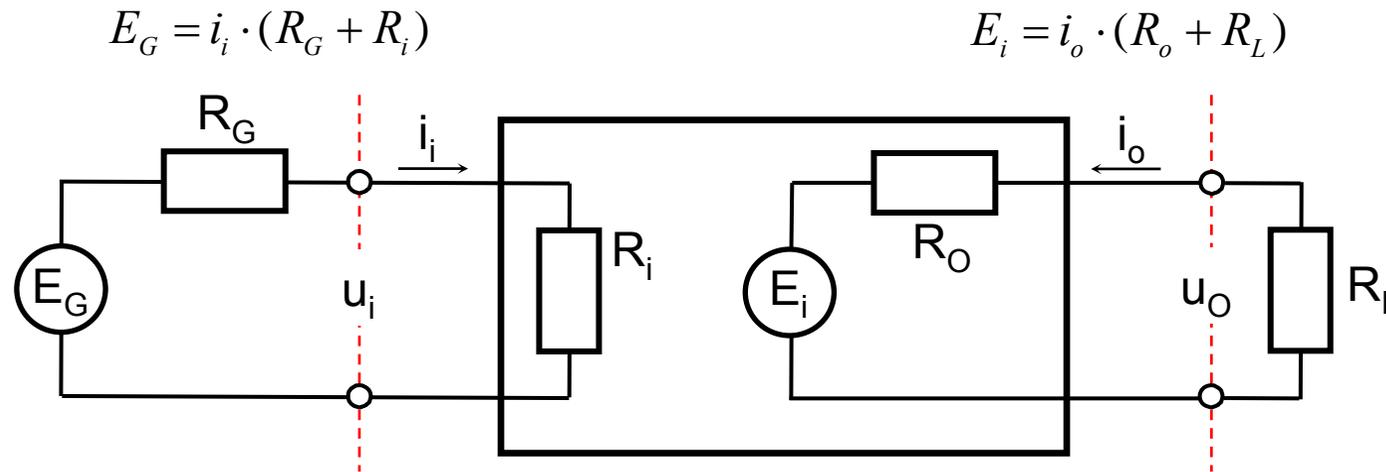
Lernziel:

- ❑ 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

- **Kenngößen 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

$$K_u = \frac{u_o}{u_i}$$

$$R_L = \infty \Rightarrow i_o = 0 \Rightarrow u_o = E_i \Rightarrow E_i = K_{u0} \cdot u_i$$

$$K_{u(NORM)} = \frac{K_u}{K_{u(1000Hz)}}$$

$$R_L \neq 0 \Rightarrow K_u = K_{u0} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

- 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).

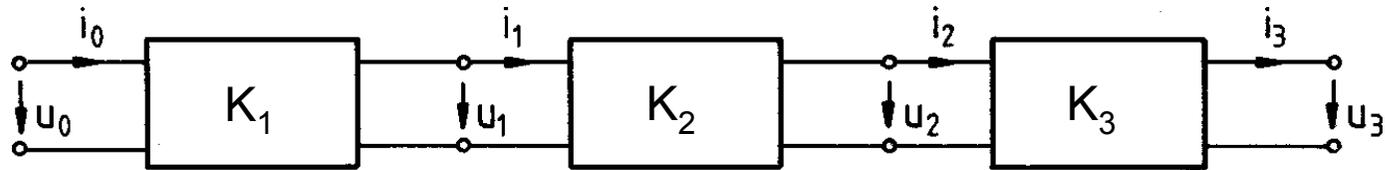
$$K_p, dB = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} \Rightarrow \text{Definition}$$

$$K_u, dB = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} \quad \text{bei } R_o = R_i$$

$$K_i, dB = 20 \lg \frac{i_o}{i_i} \quad \text{bei } R_o = R_i$$

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

# Logarithmisches Verstärkungsmaß



$$K_{u1} = \frac{u_1}{u_0}; K_{u2} = \frac{u_2}{u_1}; K_{u3} = \frac{u_3}{u_2}; \quad K_u = \frac{u_3}{u_0} = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}$$

$$\lg K_u = \lg(K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}) = \lg K_{u1} + \lg K_{u2} + \lg K_{u3}$$

$$K_{i1} = \dots$$

$$K_{p1} = \dots$$

# Kenngrößen

- Wirkungsgrad  $\eta\%$

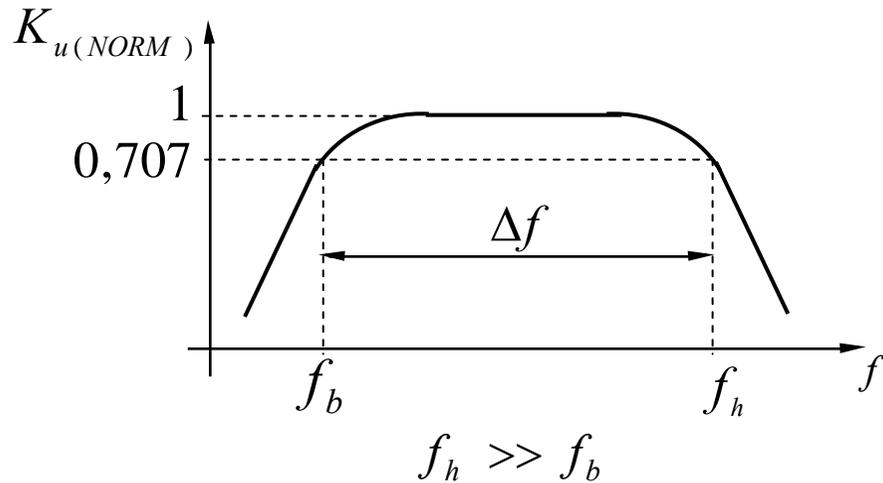
$$\eta = \frac{P_o}{\cancel{P_i} + P_{BAT}} \cdot 100, \text{ weil } P_i \ll P_{BAT}$$

- Klirrfaktor  $k\%$

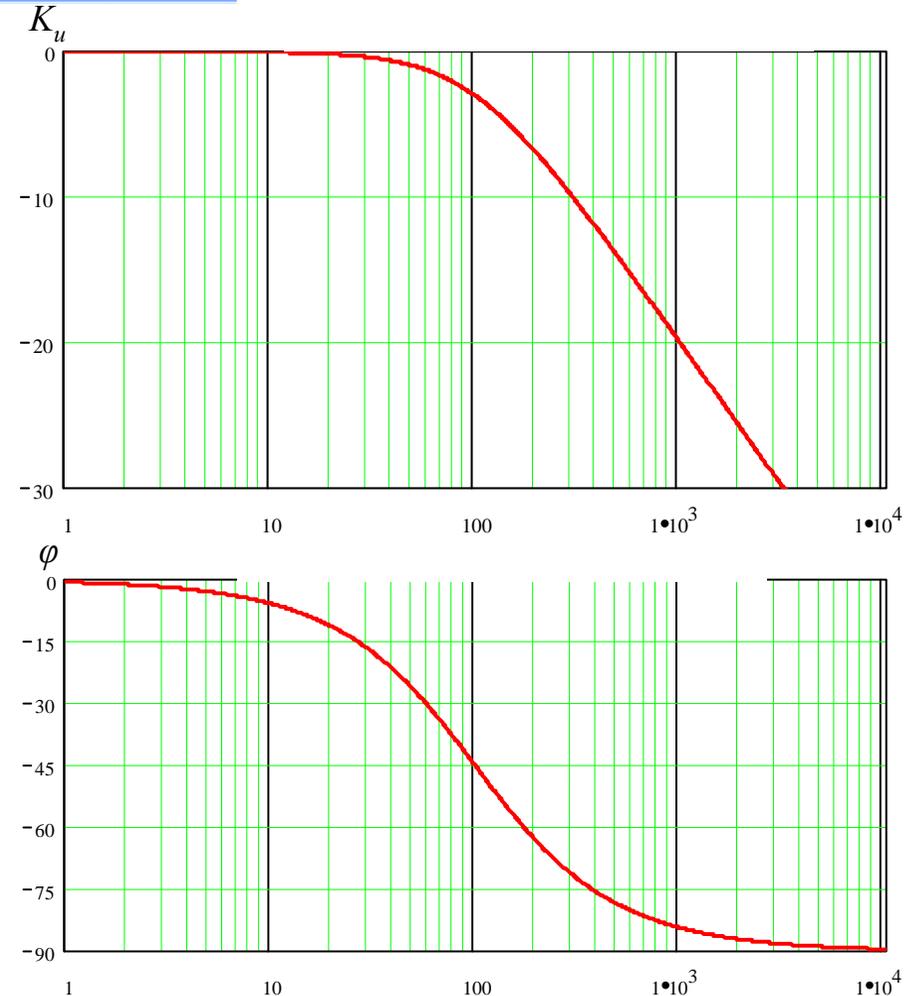
$$k = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_n^2}}{\cancel{\sqrt{u_1^2}}} \cdot 100$$

- Frequenzabhängigkeit
  - Amplitudengang
  - Phasengang

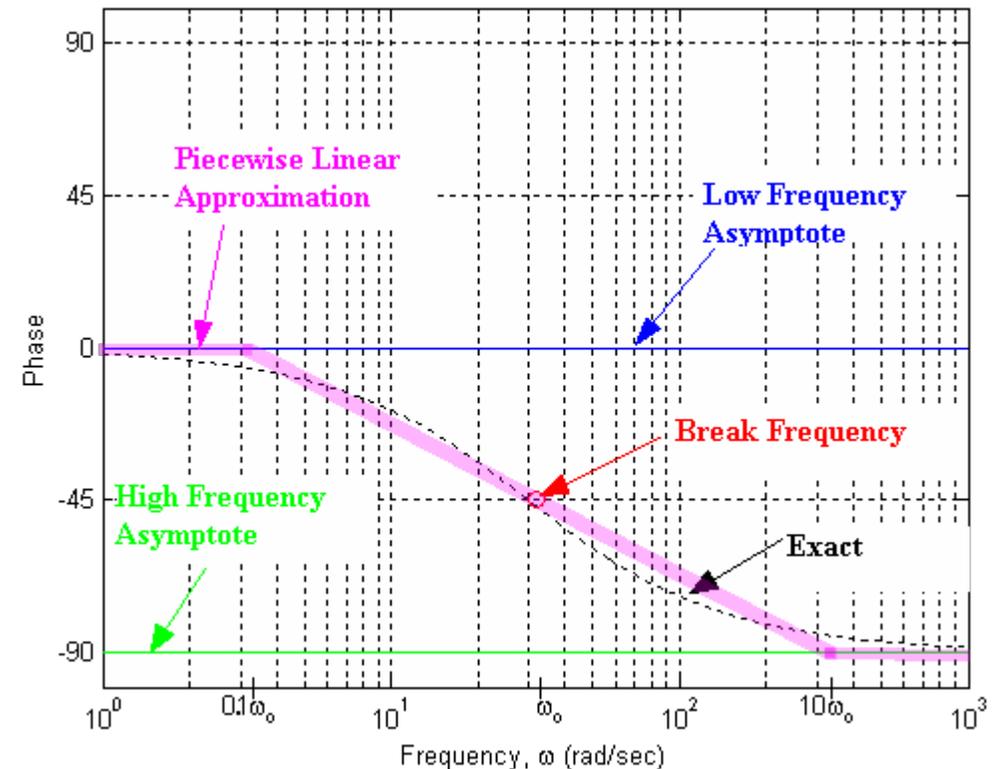
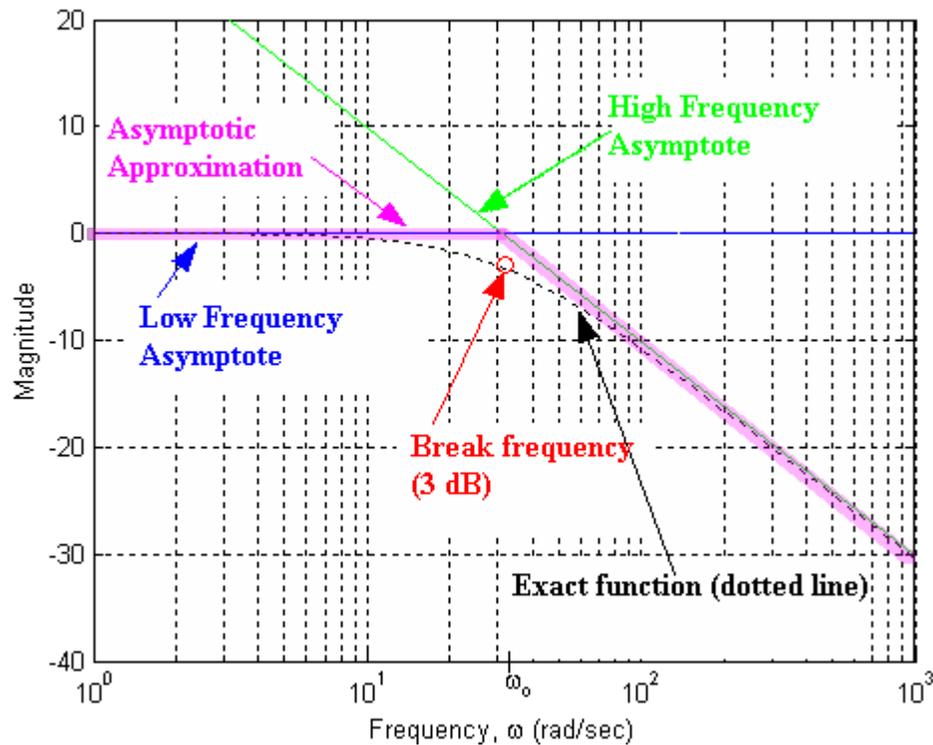
# Amplitudengang, Phasengang



Bode-Diagramm



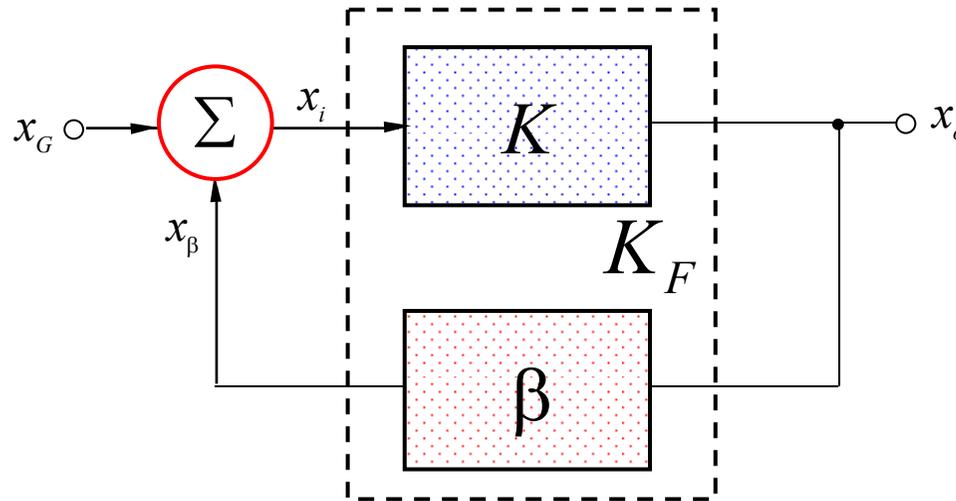
# Amplitudengang, Phasengang



# Verstärker und Komparatoren

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

# Rückkopplung



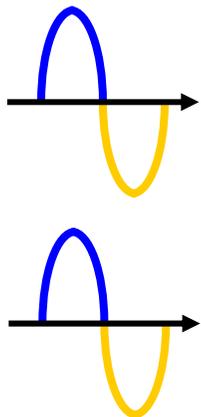
$$K = \frac{x_o}{x_i} \quad \text{Verstärkung ohne Rückkopplung}$$

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

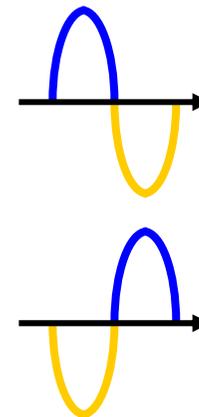
# Typen von Rückkopplungen

- In Abhängigkeit der Phasen der Signale  $x_G$  и  $x_B$

Mitkopplung



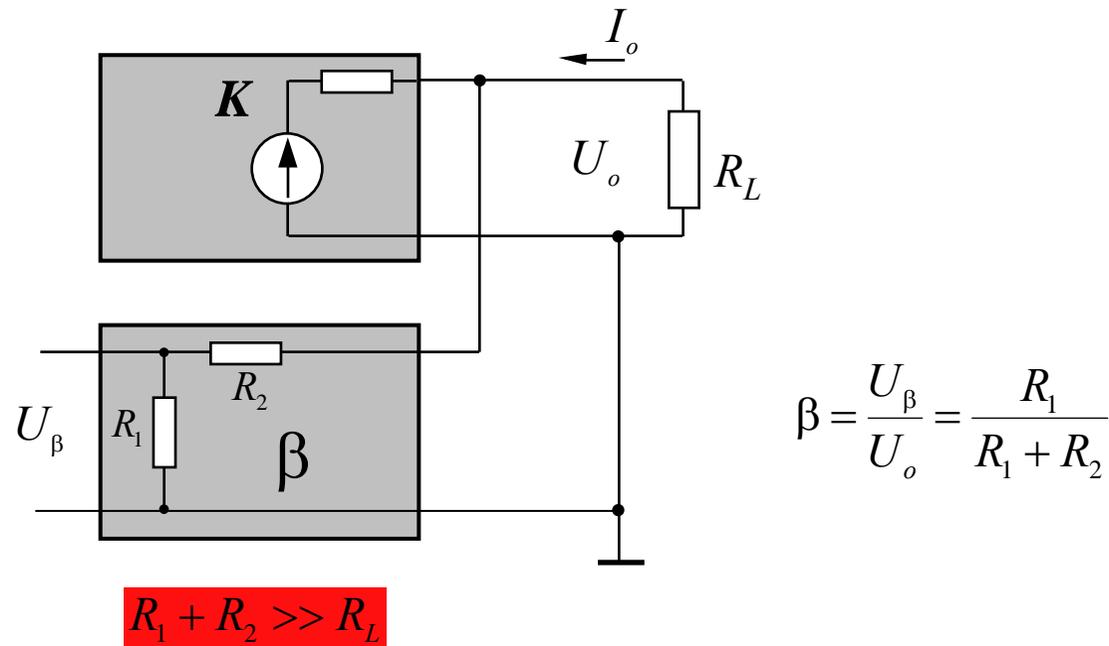
Gegenkopplung



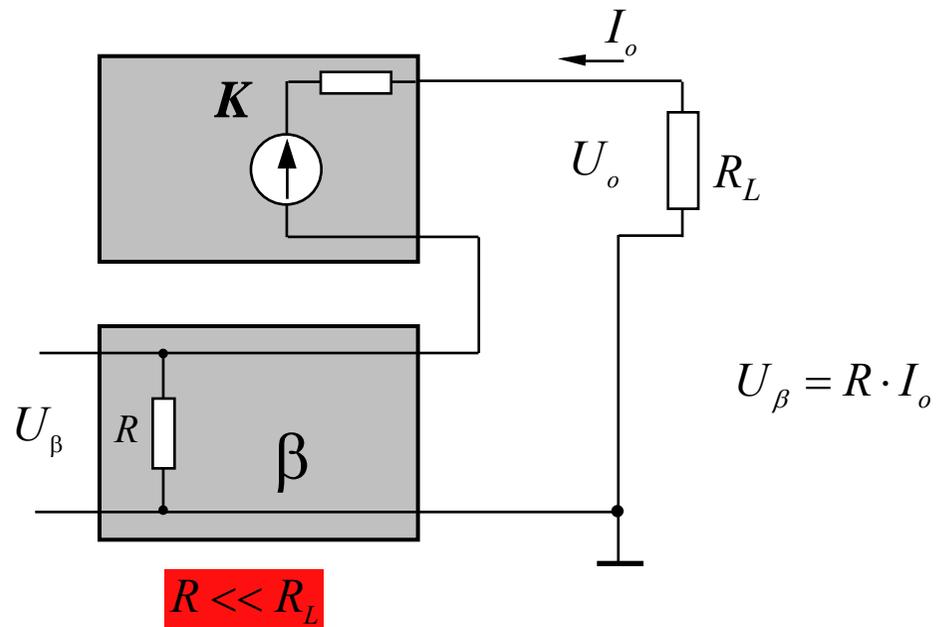
# Typen von Rückkopplungen

- ❑ 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
  - Serienrückkopplung
  - Parallelrückkopplung

# Spannungsrückkopplung



# Stromrückkopplung



# 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

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

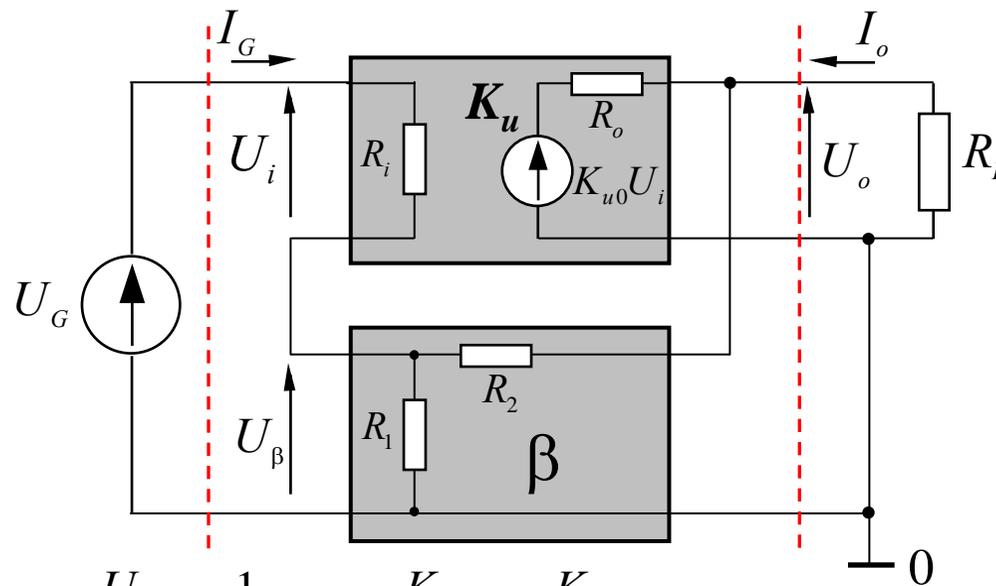
$F = 1 - \beta K$  – Mitkopplungsgrad

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

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

# Beispiel

## Serienspannungsgegenkopplung



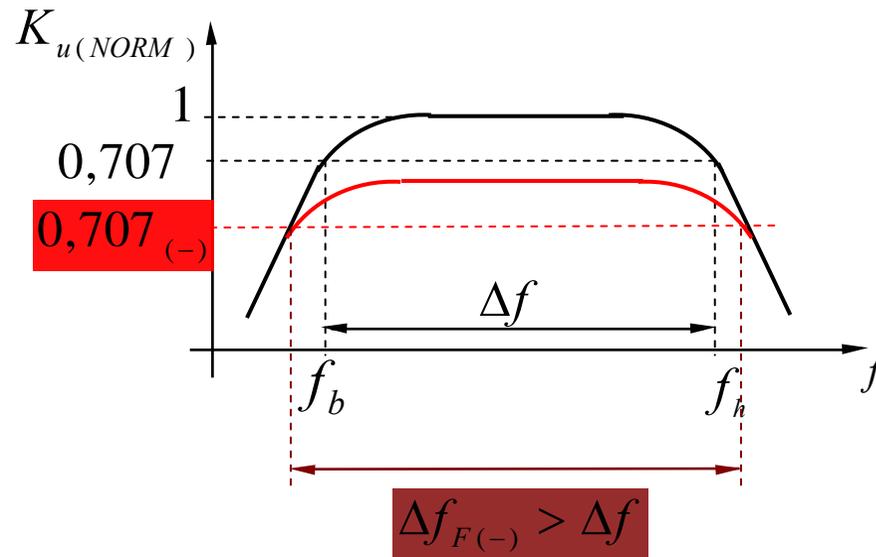
$$U_i = U_G - U_\beta$$

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

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

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

# Einfluss der GK auf das Bode-Diagramm



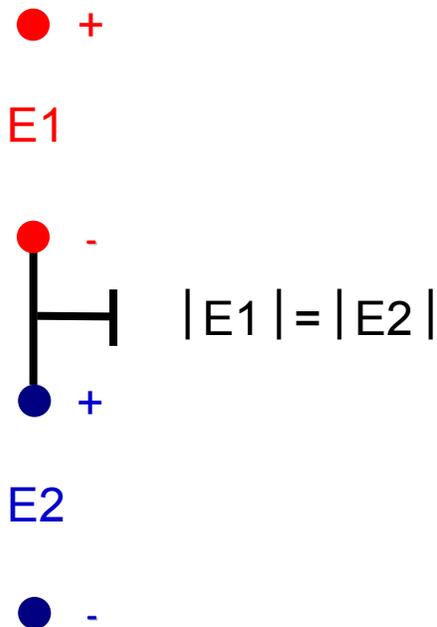
Verstärkungs-Bandbreite-Produkt:  $GBP = K_u \Delta f \approx K_u f_h = const.$

# Verstärker und Komparatoren

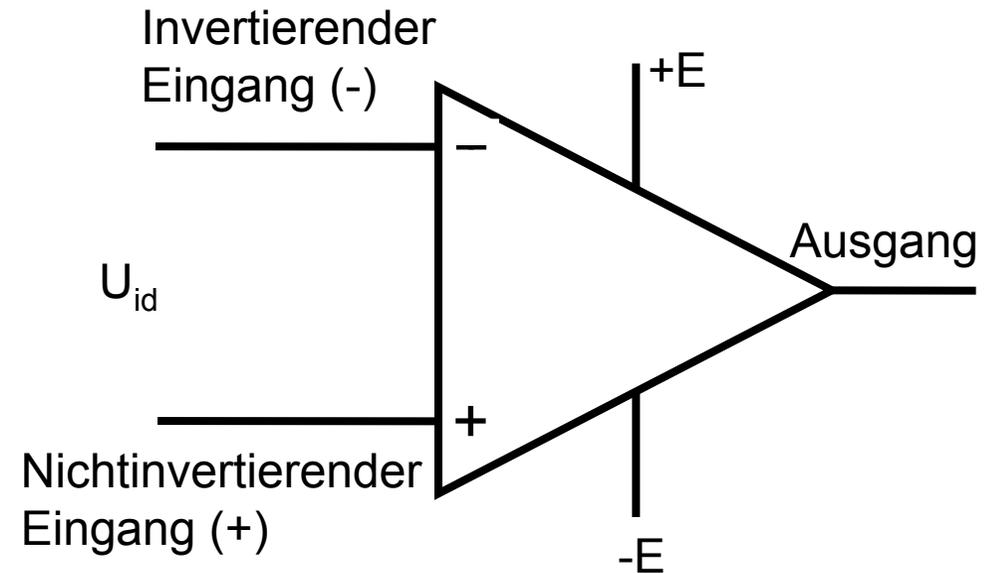
- *Kenngößen der Verstärker*
- *Rückkopplung*
- **Operationsverstärker mit Gegenkopplung**
  - Invertierender
  - Nichtinvertierender
  - Filter
- Operationsverstärker ohne Rückkopplung (Komparatoren)
- Operationsverstärker mit Mitkopplung

# Operationsverstärker (OV)

symmetrische Speisespannung



Schaltsymbol



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

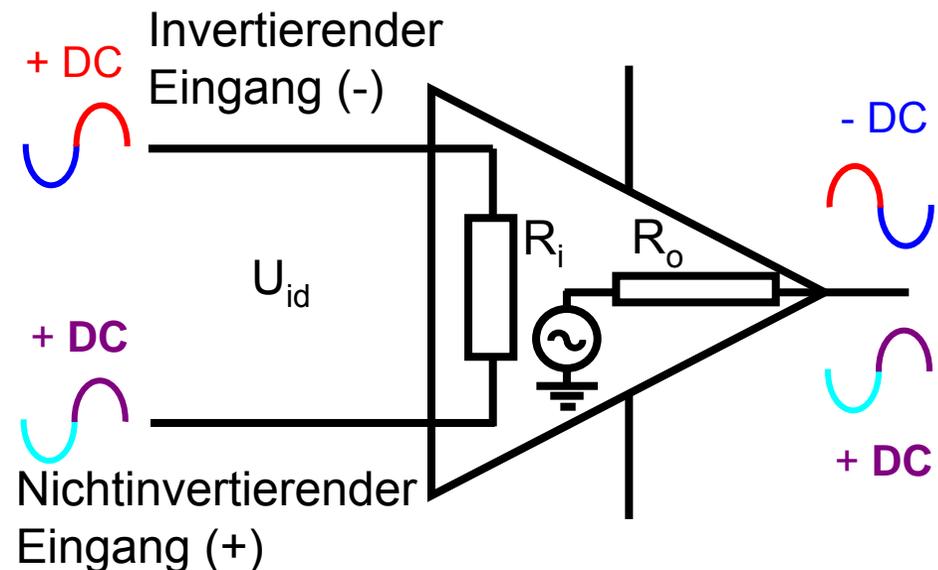
- $R_i \rightarrow \infty$  ( $I_{iOV} = 0!!!!$ )
- $K_{ud} \rightarrow \infty$  ( $U_{id} = 0!!!!$ )
- $R_o \rightarrow 0$
- $\Delta f \rightarrow \infty$

## Realer OV

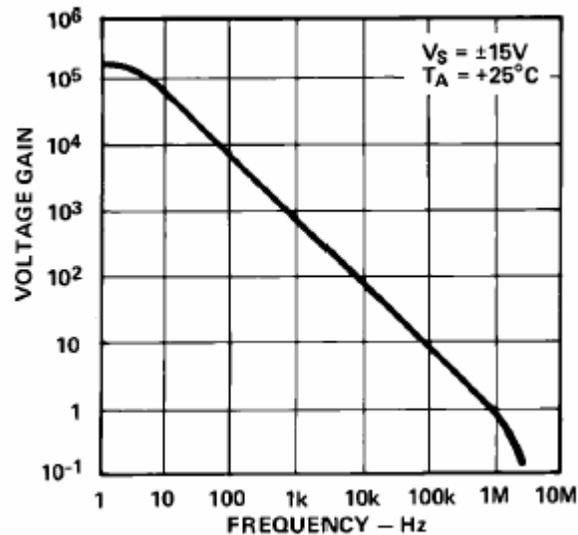
- $R_i \rightarrow 10^{12} \Omega$
- $K_{ud} \rightarrow 10^7$
- $R_o \rightarrow m\Omega$
- $\Delta f \rightarrow ?$

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.

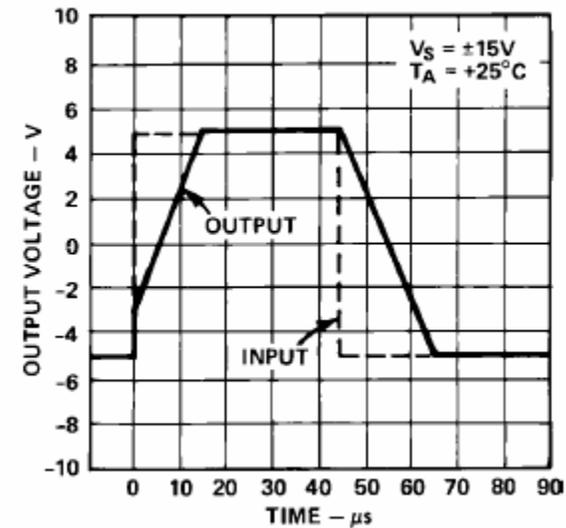
Ersatzschaltbild



# Daten eines Operationsverstärker



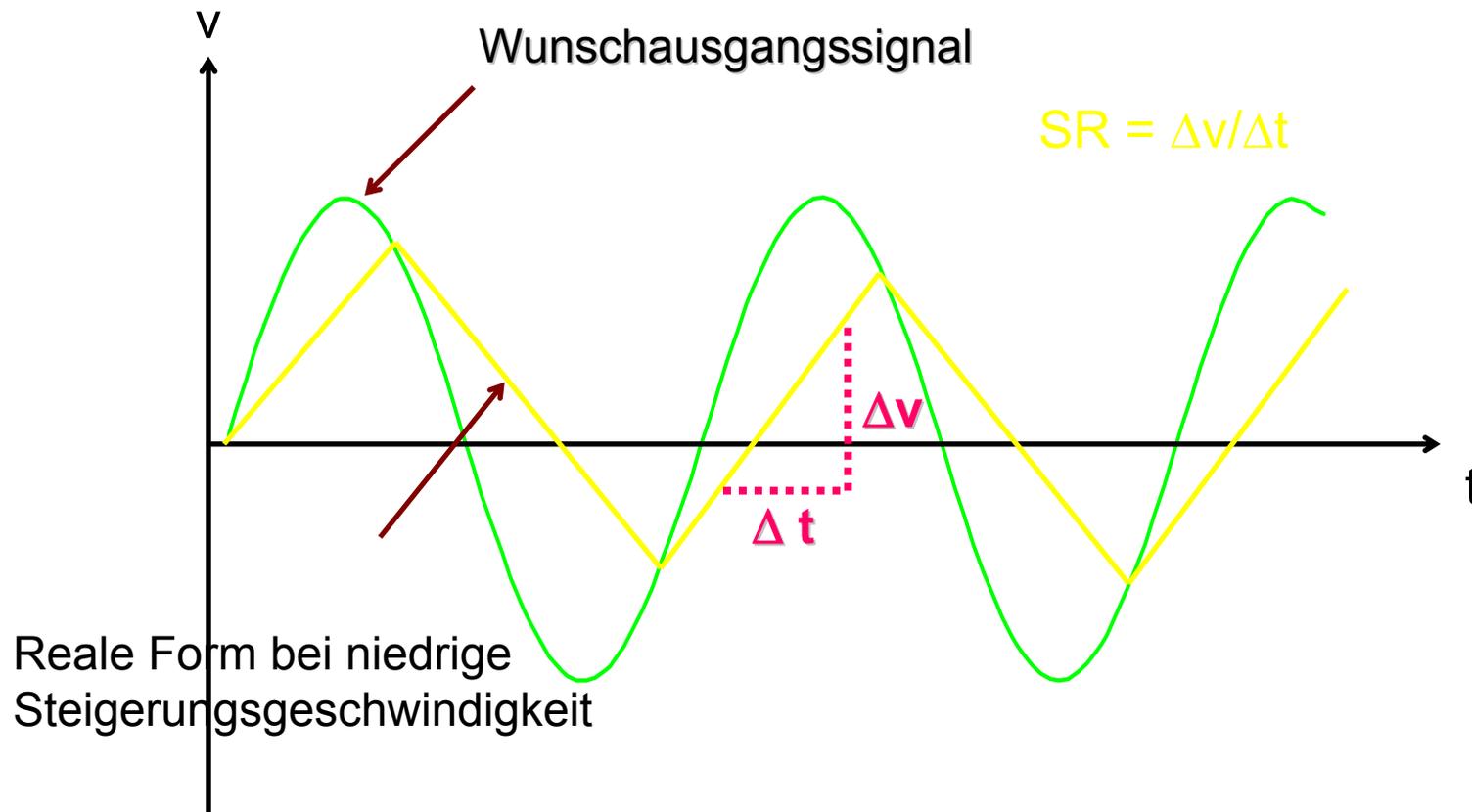
Leerlaufverstärkung (Frequenz)



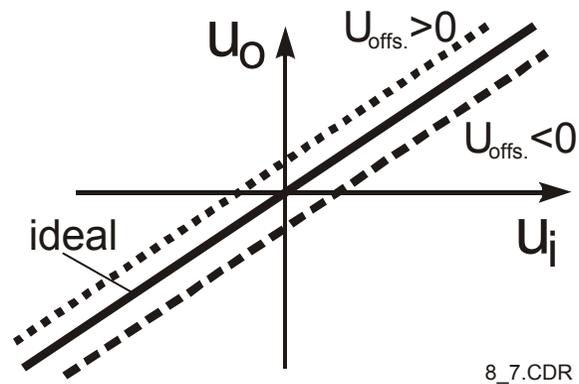
Slew-Rate

(Steigerungsgeschwindigkeit)

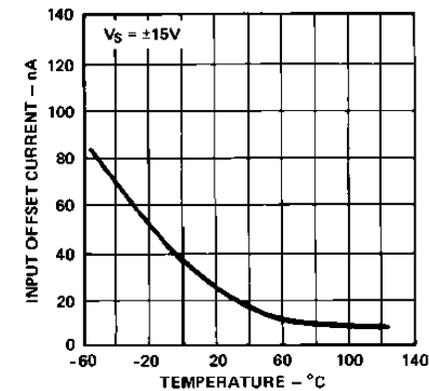
# Daten eines Operationsverstärker



# 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

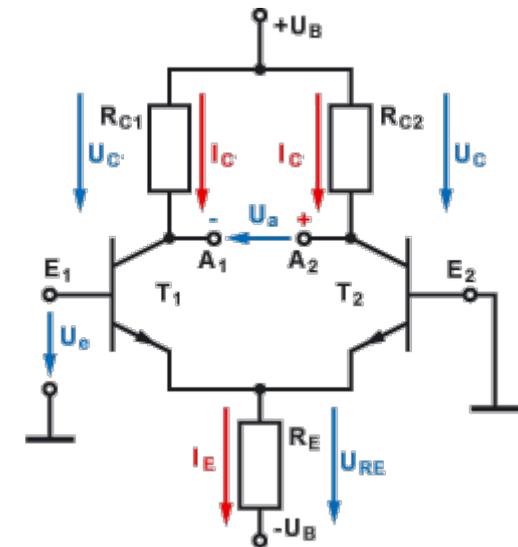
- ❑ Der Differenzverstärker ist ein Gleichspannungsverstärker und ist die Grundsaltung des Operationsverstärkers.
- ❑ Die grundlegende Idee dieser Schaltung ist, dass bei zwei identischen Emitterschaltungen identische Arbeitspunktänderungen auftreten.
- ❑ Zwischen den Kollektoren käme es zu keiner Spannungsdifferenz. 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.

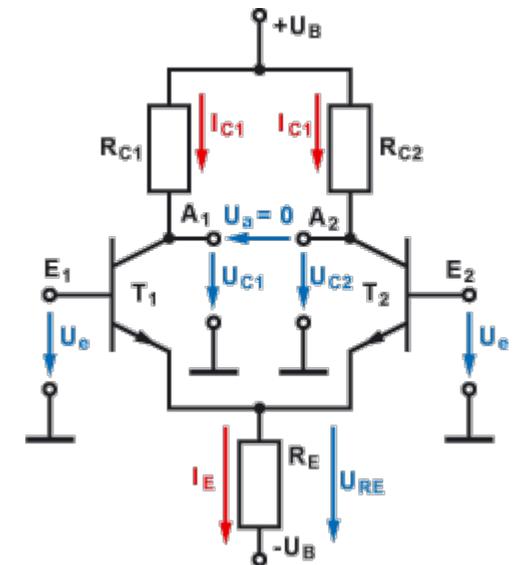
# DV - Differenzbetrieb

- 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  $180^\circ$  an  $A_1$  fest.  $A_2$  ist ohne Phasendrehung zur Eingangsspannung  $U_e$ .



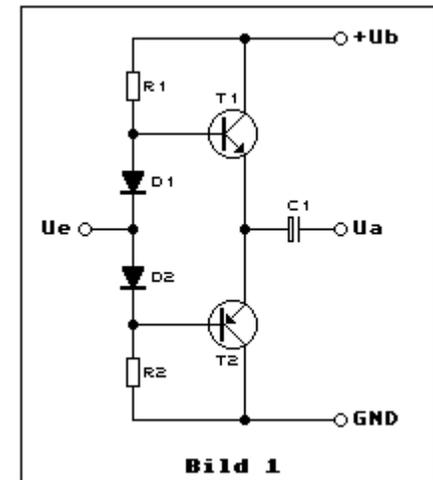
# DV - Gleichtaktbetrieb

- 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  $R_{C1}$  und  $R_{C2}$  ändern sich gleichsinnig.
- Man nennt das den Gleichtaktbetrieb. Die Verstärkung ist Null. Der Differenzverstärker verstärkt nur Signalunterschiede zwischen  $E1$  und  $E2$ .

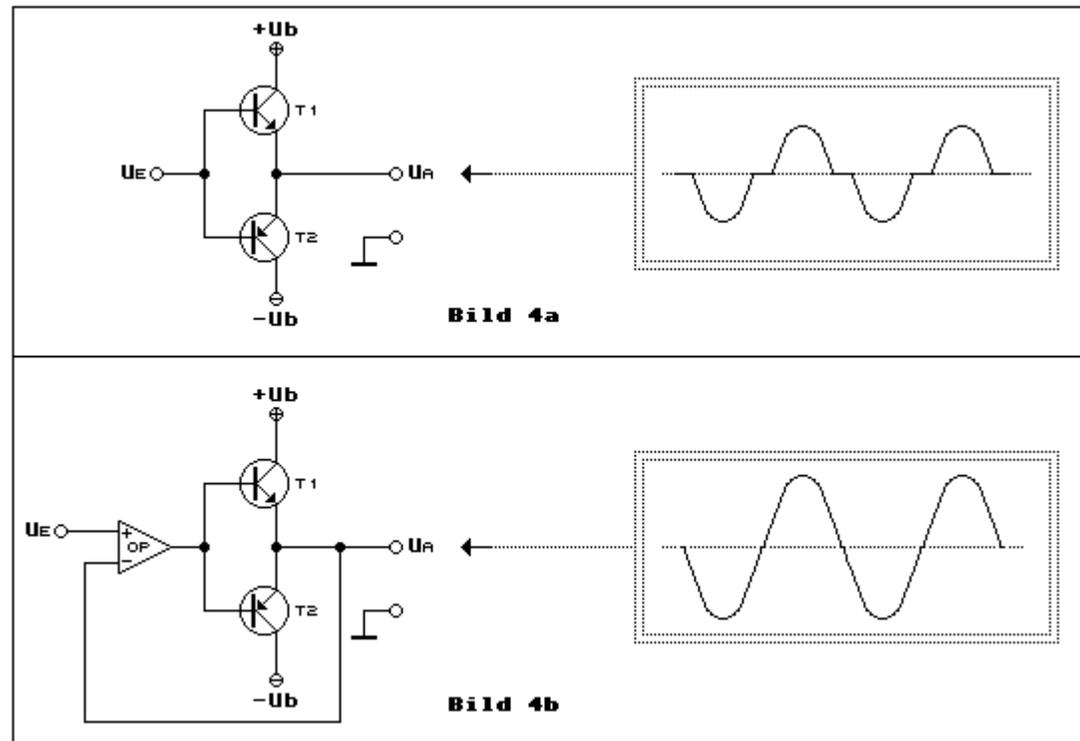


# Gegentaktverstärker

- 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.

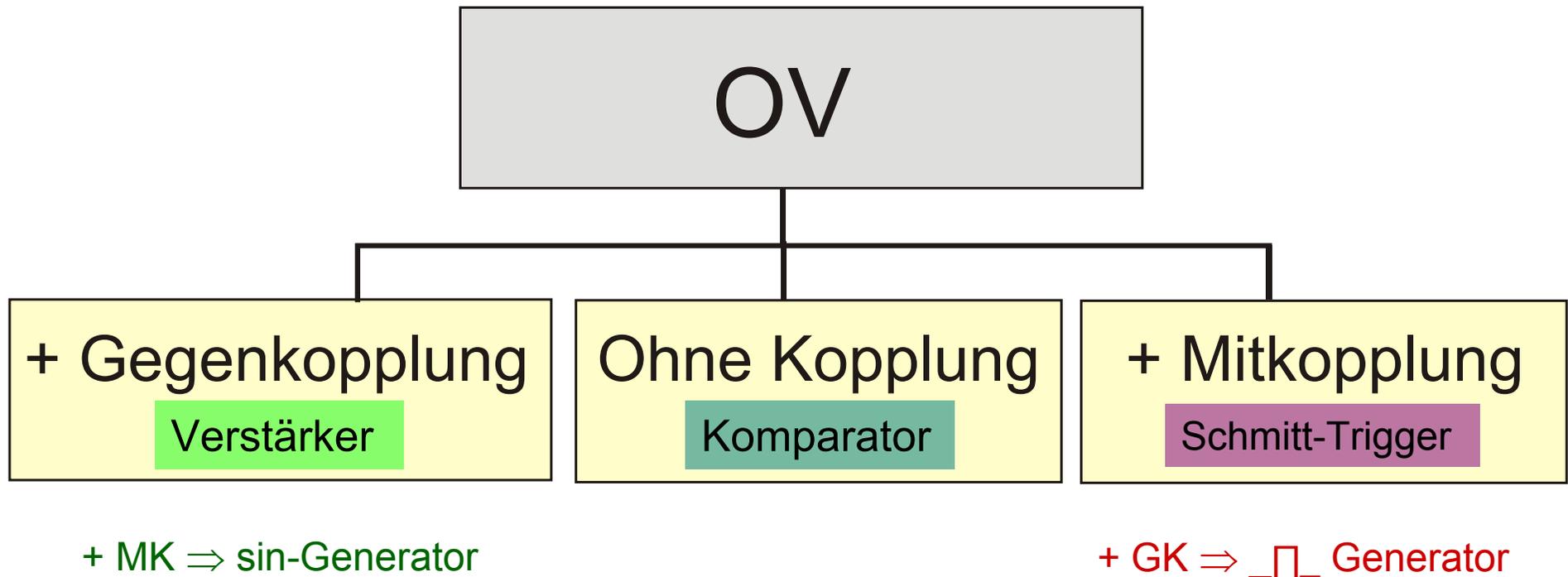


# Gegentaktverstärker



Grundschialtung ist die Kollektorschaltung.

# Verwendung von Operationsverstärkern



# Verstärker und Komparatoren

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

# Invertierender Verstärker (GK)

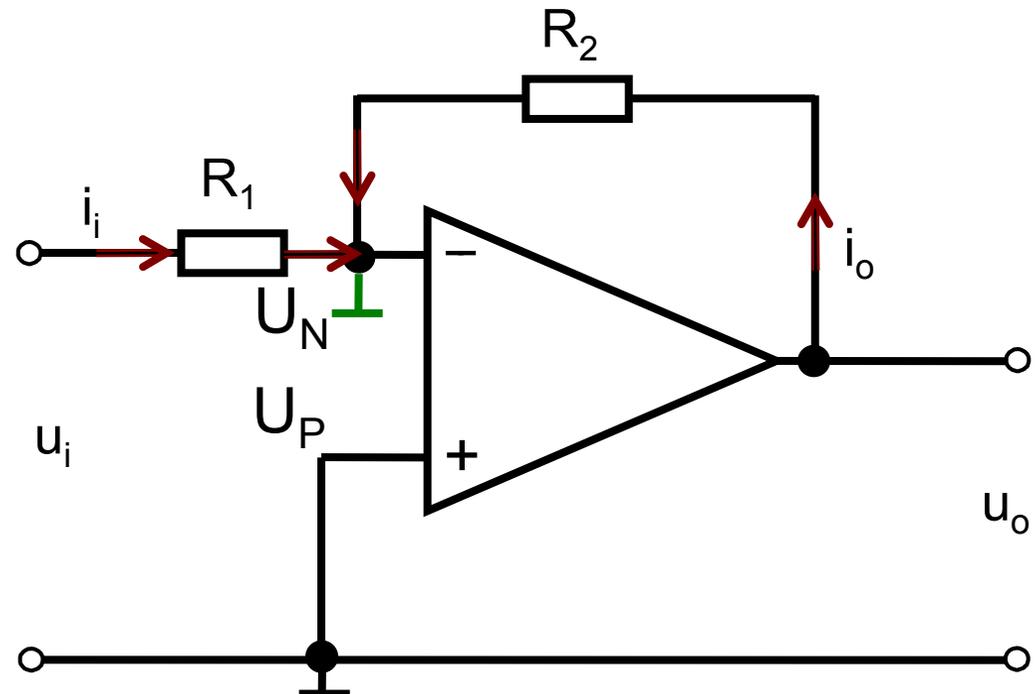
Von  $U_{id} = 0$  folgt  $U_N = U_P = 0 \text{ V}$

Von  $I_{ioy} = 0$  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)

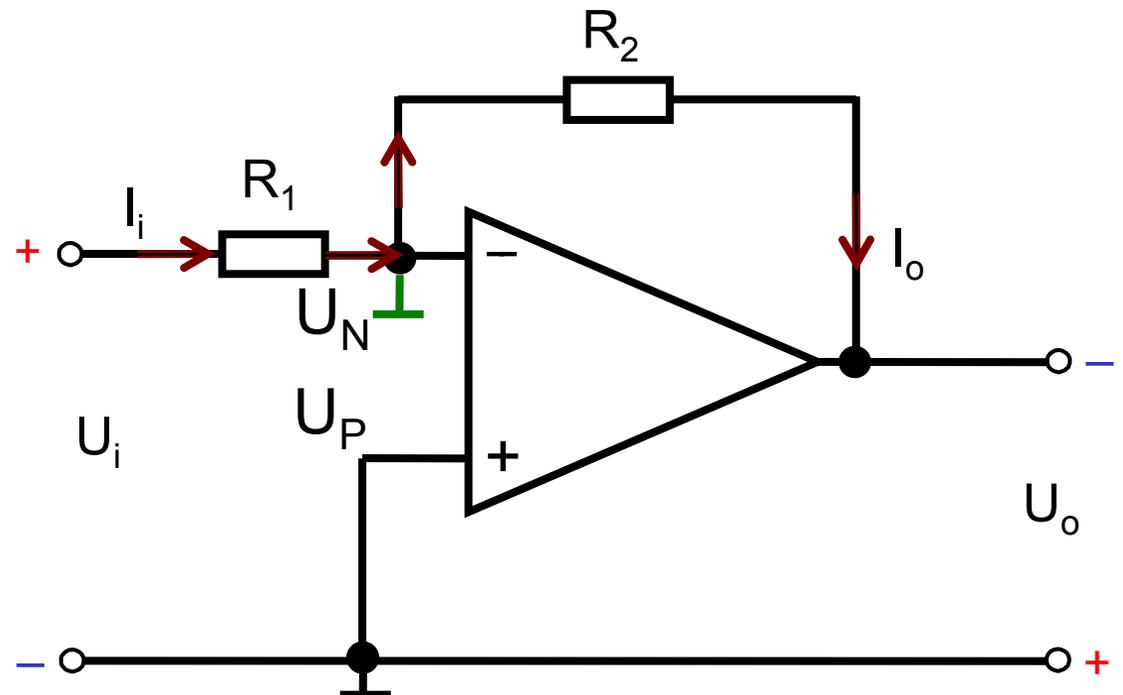
$U_i = +2\text{ V}$ ;  $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ;  $U_o = ?$ ;  $I_i = ?$ ;  $I_o = ?$ ;  $K_u = ?$

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

$$I_o = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = -2\text{ V}$$

$$K_u = -1$$



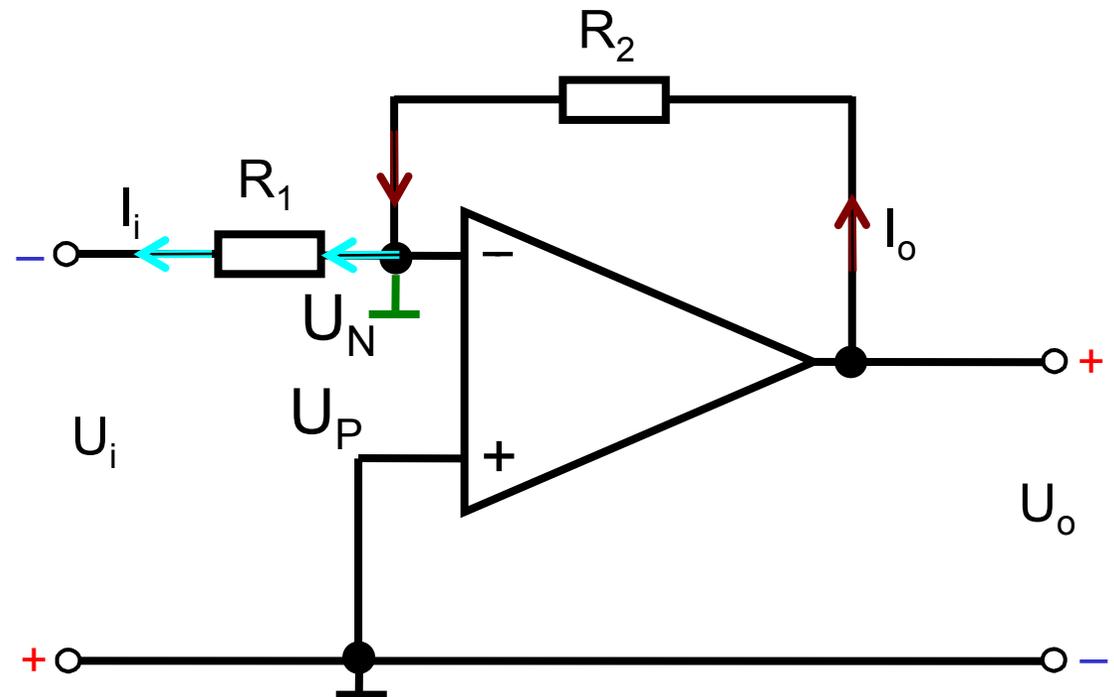
# Invertierender Verstärker (Beispiel 2)

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

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

$$I_o = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = +4 \text{ V}$$





# Invertierender Verstärker (Beispiel 4)

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

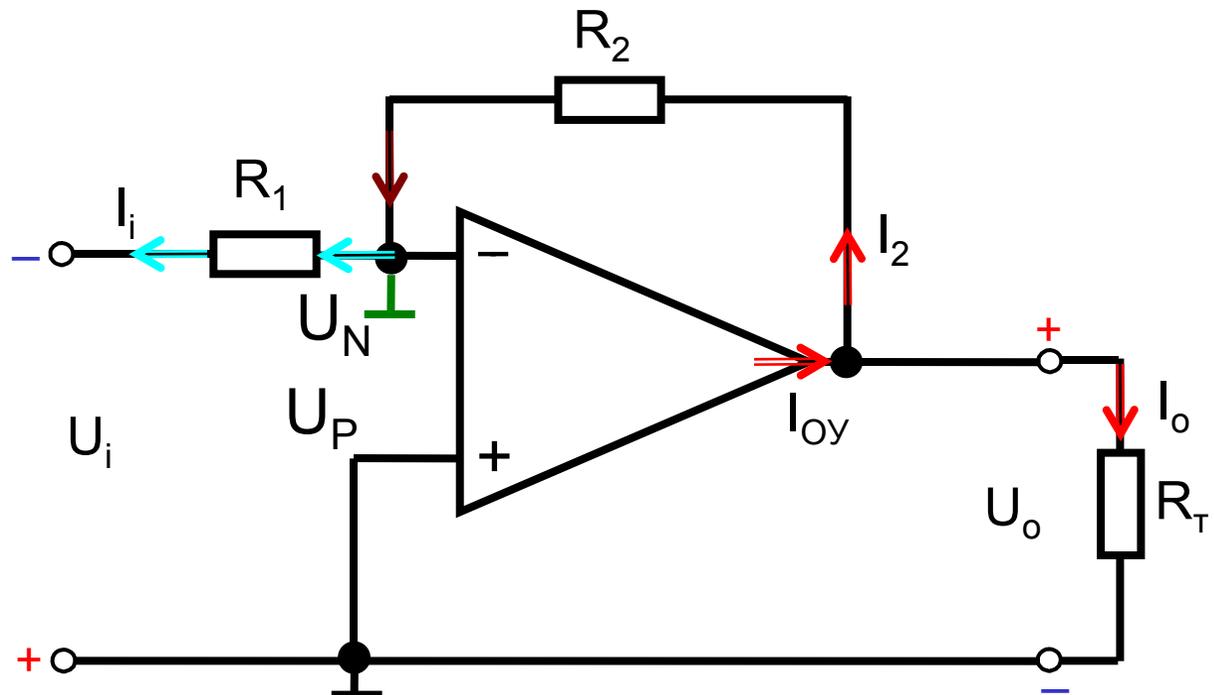
$$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$$

$$I_2 = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = +4 \text{ V}$$

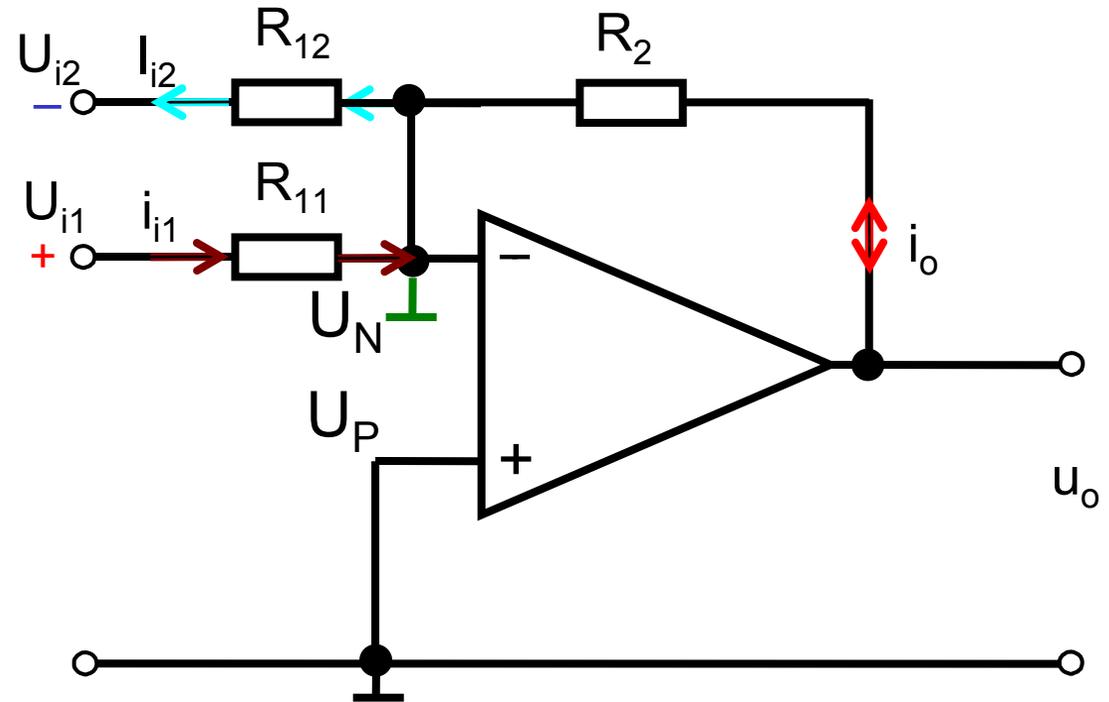
$$I_o = U_o / R_T = 2 \text{ mA}$$

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



# Invertierende Addierschaltung

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



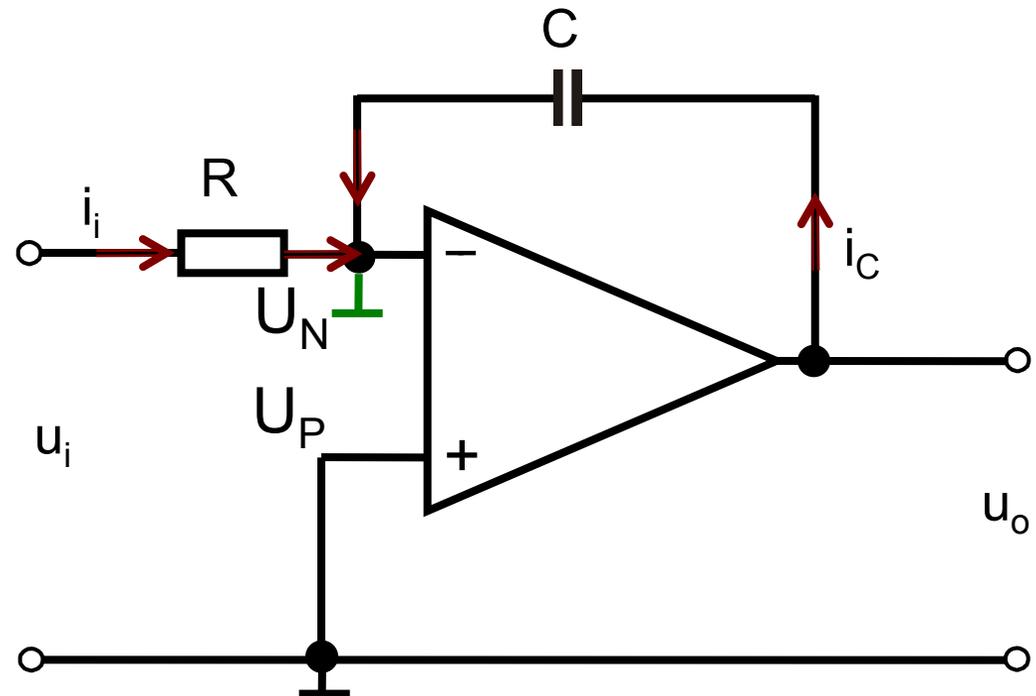
Die Richtung des Stromes  $i_o$  und das Polarität der Spannung  $u_o$  hängen von der Größe der beiden Eingangsspannungen ab.

# Invertierender Integrator

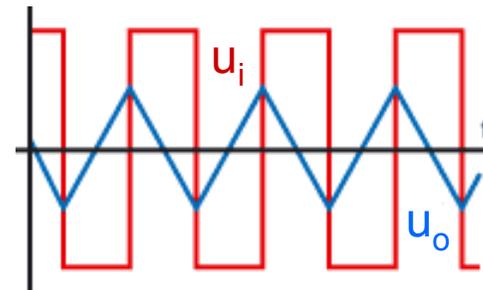
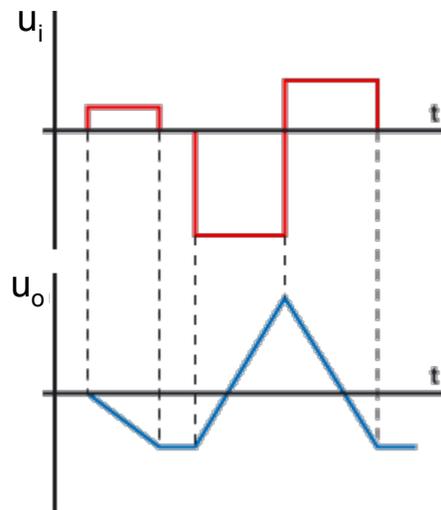
$$0 = \frac{u_i}{R} + i_C = \frac{u_i}{R} + C \frac{dU_o}{dt} \Rightarrow \frac{dU_o}{dt} = -\frac{u_i}{RC}$$

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

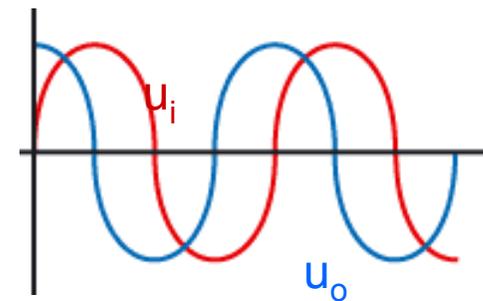
$$u_o = -\frac{u_i t}{RC}$$



# Invertierender Integrator



Rechteck  $\Rightarrow$  Dreieck



Sinus  $\Rightarrow$  Kosinus

# Verstärker und Komparatoren

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

# Nichtinvertierender Verstärker

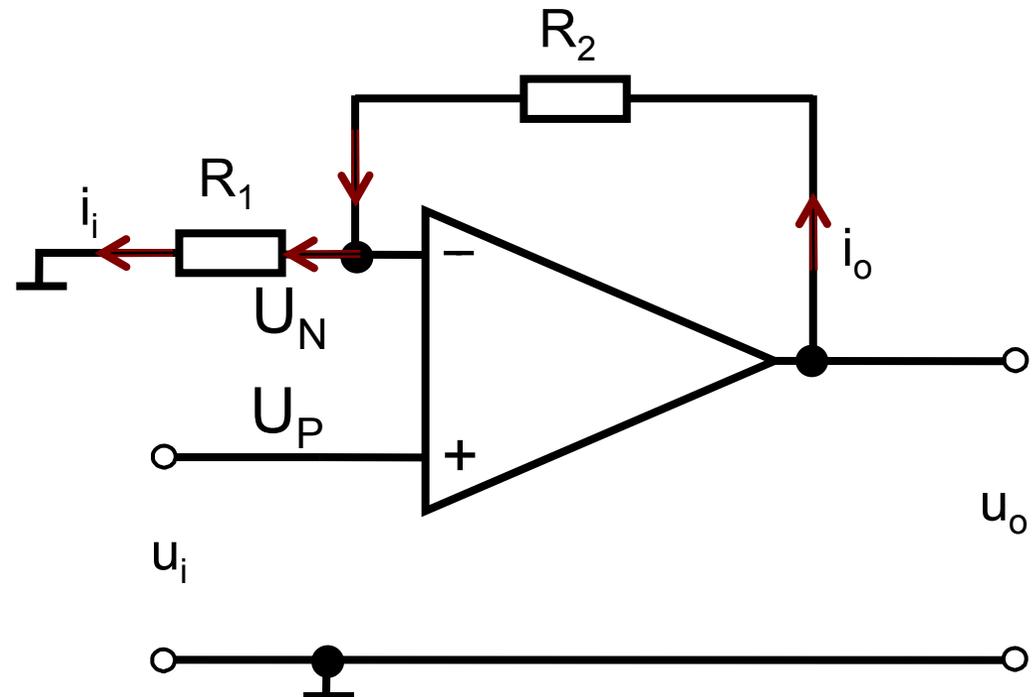
Von  $U_{id} = 0$  folgt  $U_N = U_P = u_i$

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

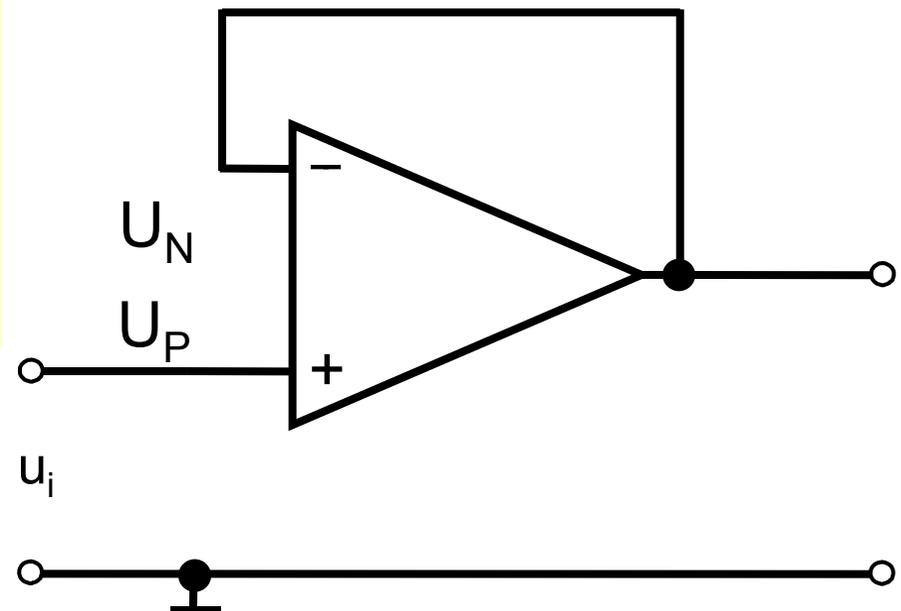
Dieser Verstärker hat einen extrem hohen Eingangswiderstand und einen niedrigen Ausgangswiderstand.

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:

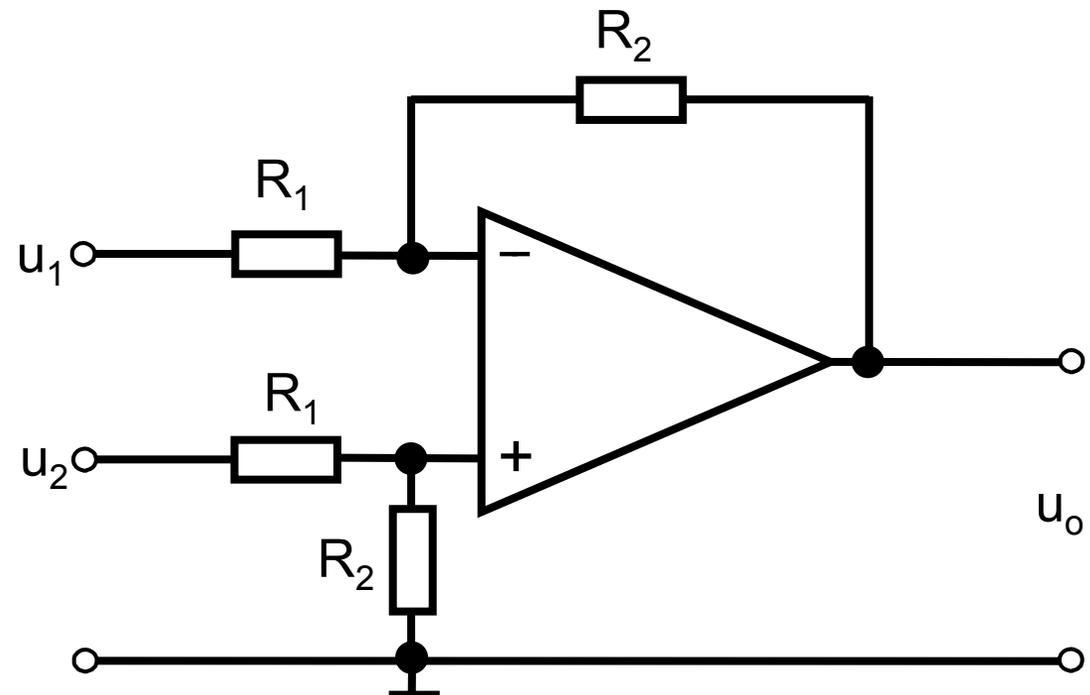
$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$

$$u_o = \underbrace{\frac{u_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}_{\text{Spannungsteiler}} \cdot \underbrace{\left[1 + \frac{R_2}{R_1}\right]}_{K_u}$$

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

oder

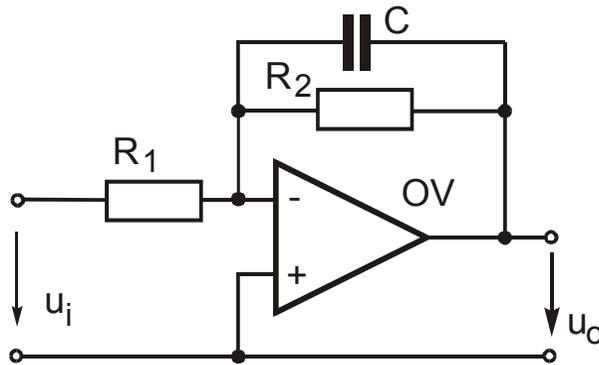
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$



# Verstärker und Komparatoren

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

# Tiefpaß



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

Bei kleinen Frequenzen  $\omega \ll \omega_g$

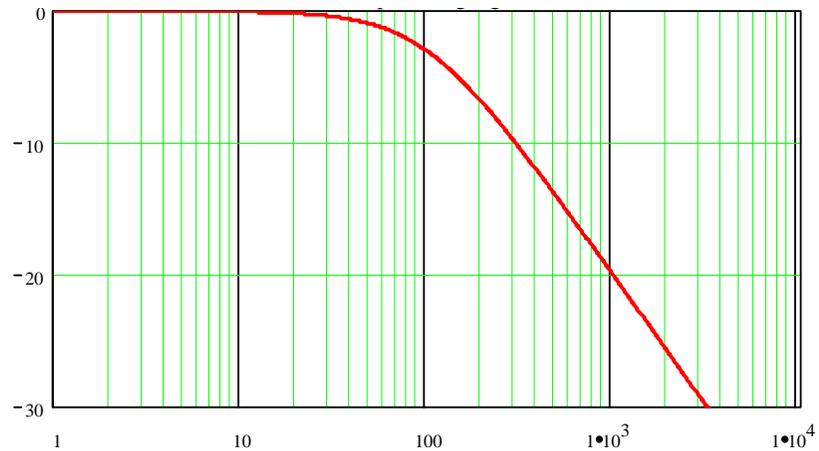
$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Bei großen Frequenzen  $\omega \gg \omega_g$

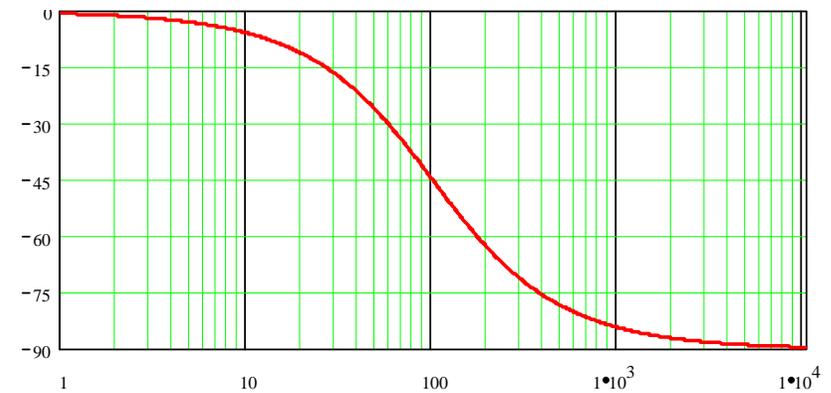
$$\dot{K}_u = -\frac{1}{j\omega CR_1}$$

# Tiefpaß

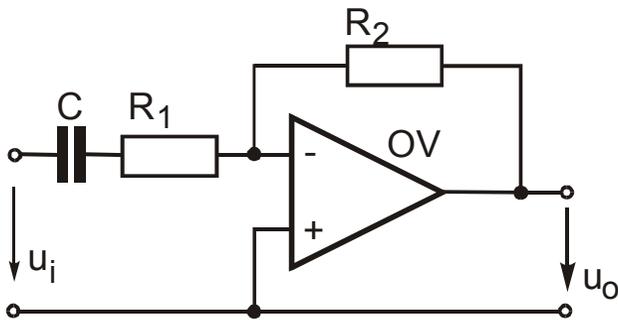
## Amplitudengang



## 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  $\omega \ll \omega_g$

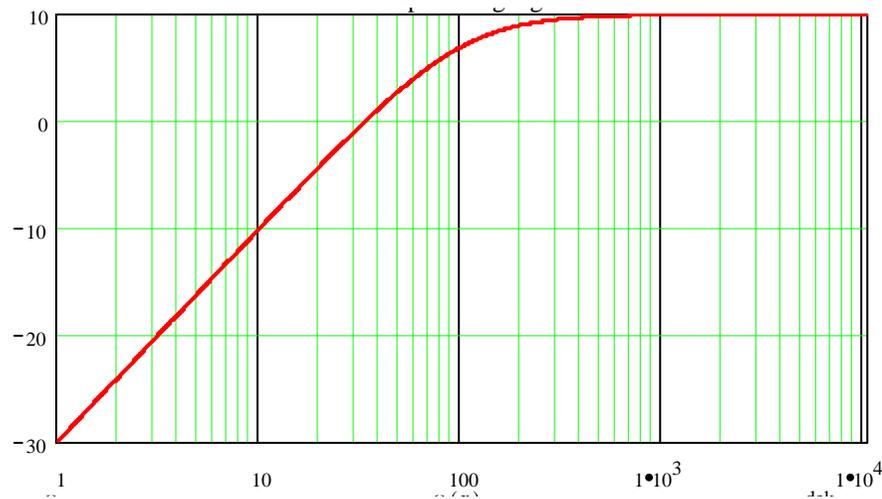
$$\dot{K}_u = -j\omega C R_2$$

Bei großen Frequenzen  $\omega \gg \omega_g$

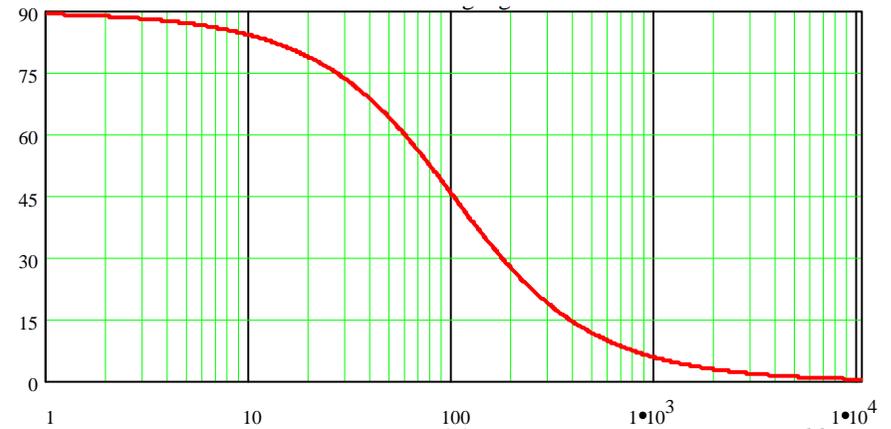
$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

# Hochpaß

## Amplitudengang

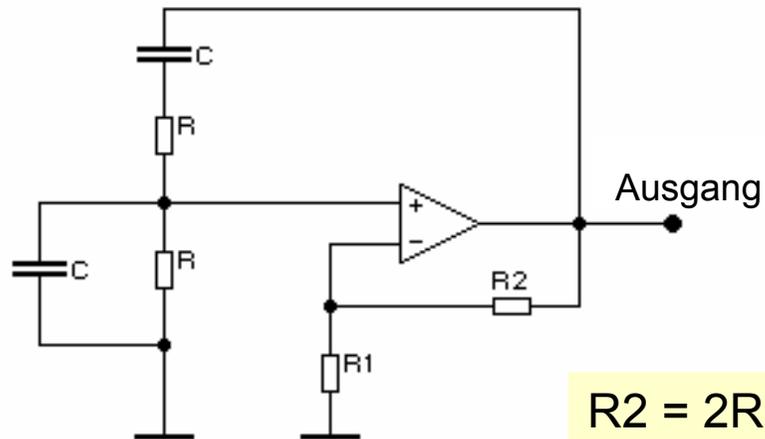


## Phasengang



# Sinusspannungsgenerator

Invertierender Verstärker + Mitkopplung mit Wien-Brücke

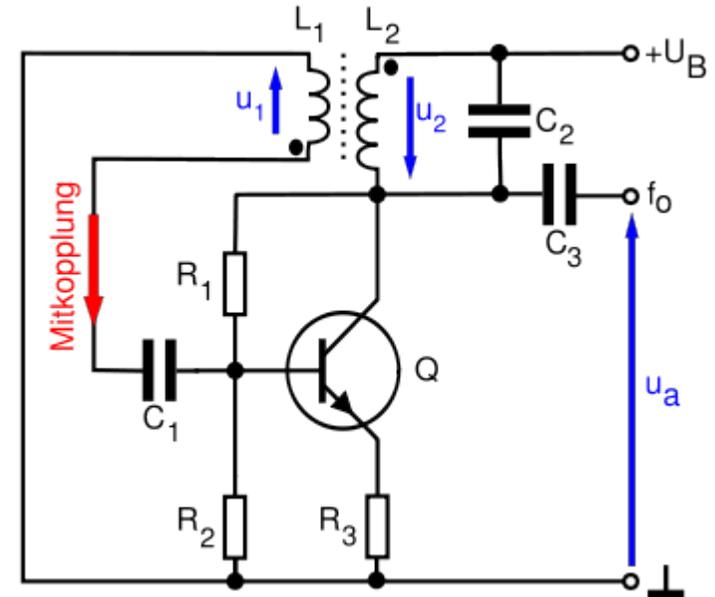


$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

$R_2 = 2R_1$ , damit  
 $K_u = 3$

# 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.

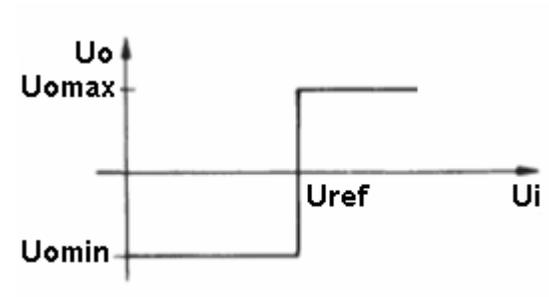
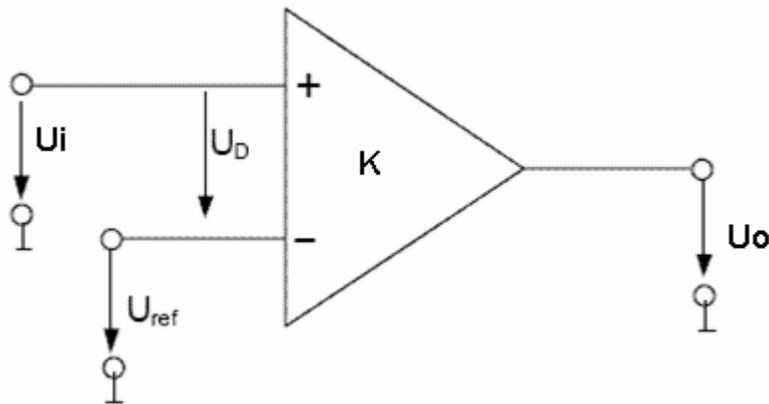


$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

# Verstärker und Komparatoren

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

# Komparator



Von besonderer Bedeutung ist der Wert der:

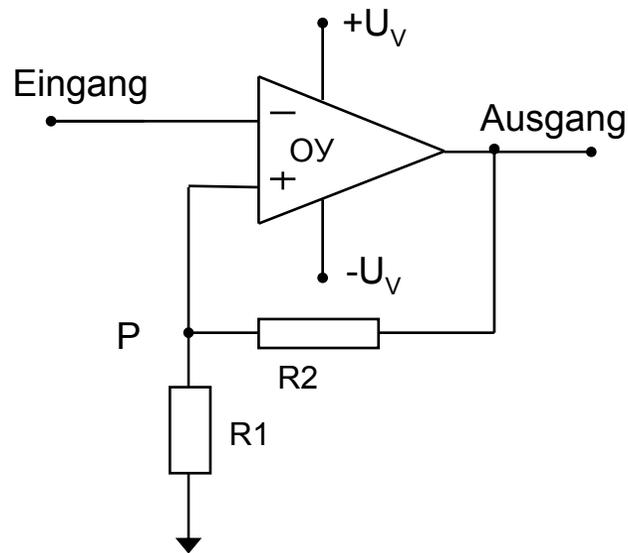
$K_{ud} \Rightarrow$  um kleinere Spannungsunterschiede erkennbar zu werden

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

# Verstärker und Komparatoren

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

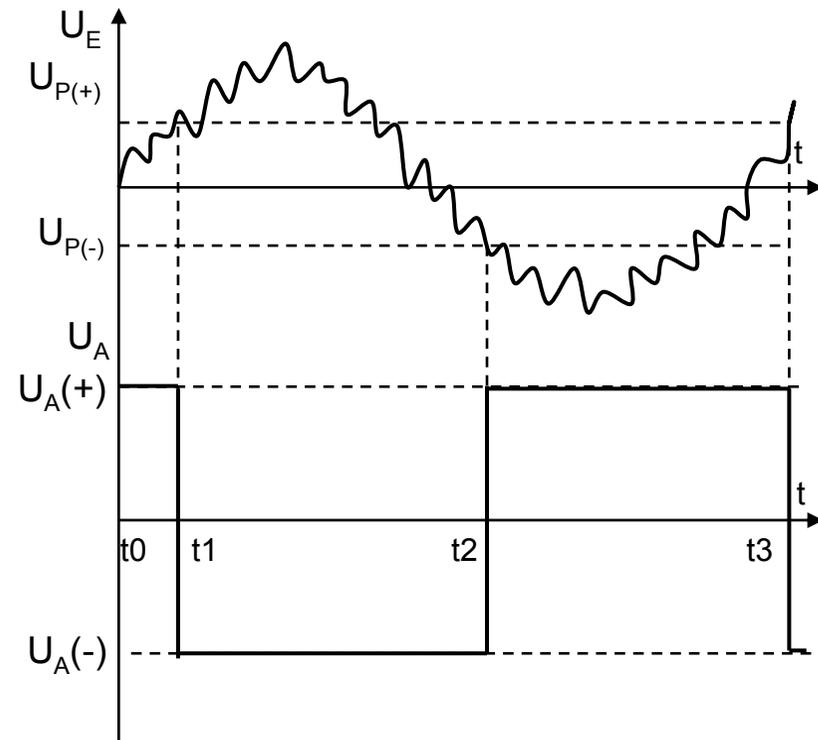
# Schmitt-Trigger



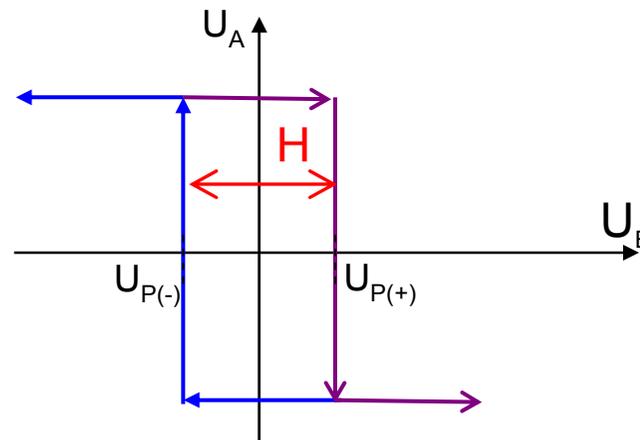
$$U_{P(+)} = U_{A(+)} \cdot R1 / (R1 + R2)$$

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

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

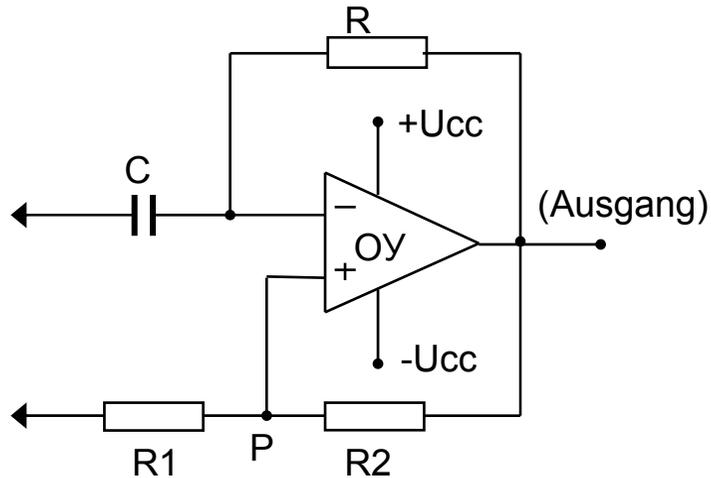


# Schmitt-Trigger

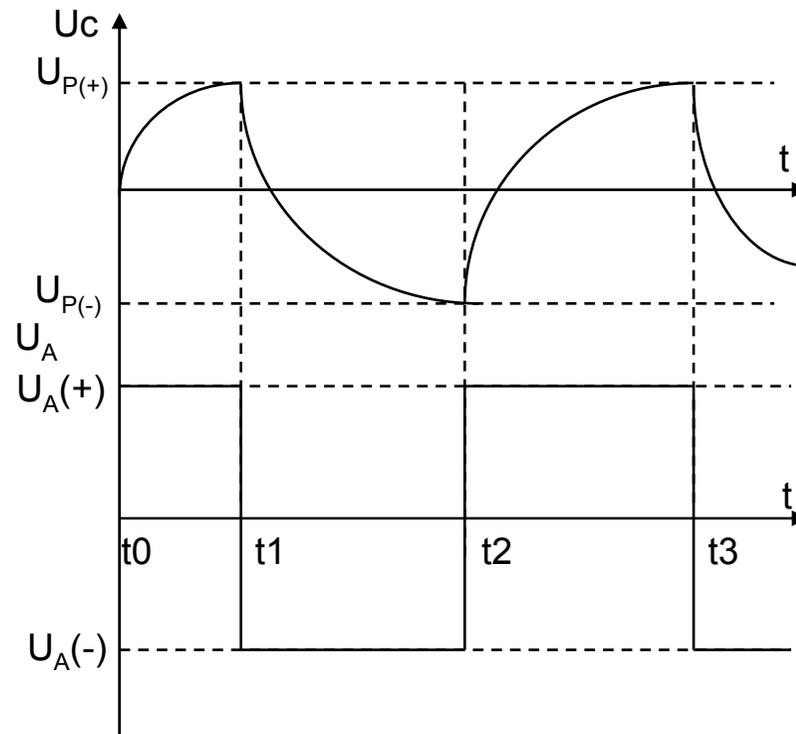


Übertragungskennlinie

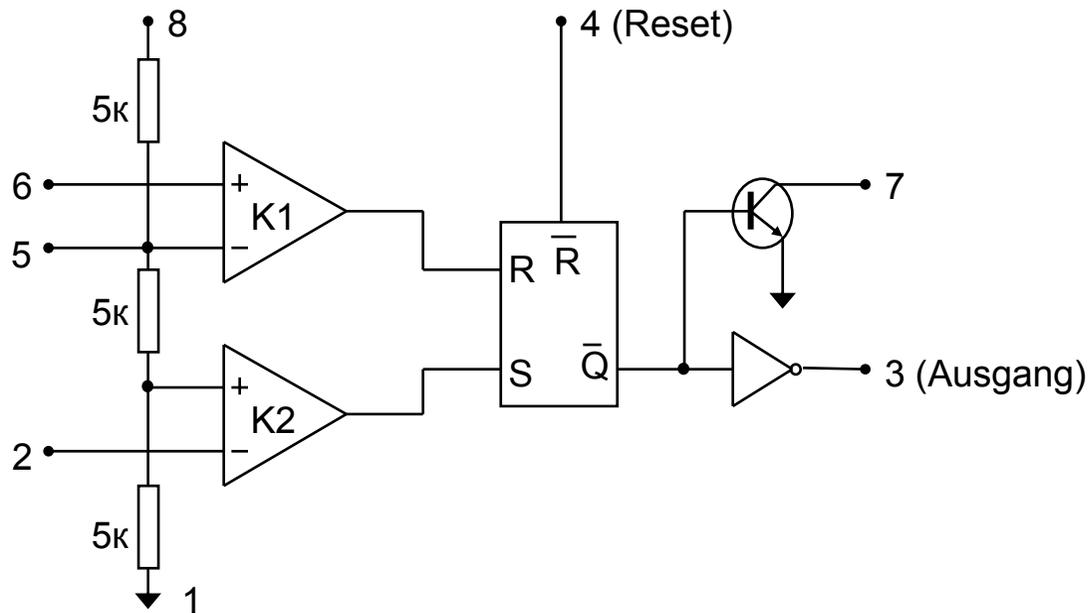
# Multivibrator



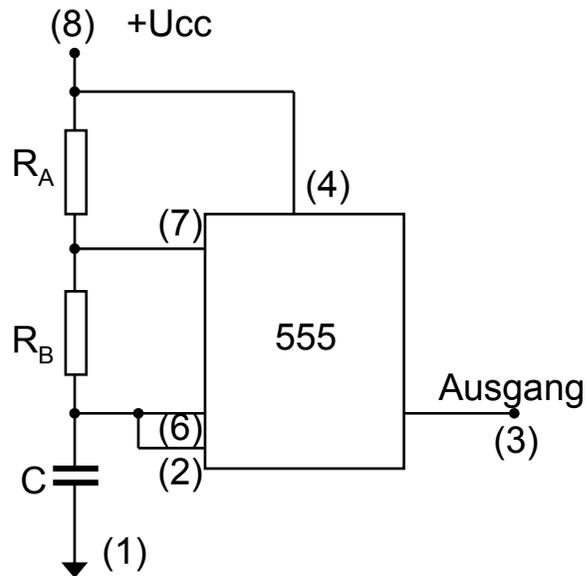
$$T = 2RC \cdot \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$



# Präzisions-Schmitt-Trigger (Timer 555)



# Multivibrator mit timer 555



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

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

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

