

**Inhaltsverzeichnis:**

<b>Thema</b>	<b>Unterpunkt</b>	<b>Seite</b>
Operationsverstärker allgemein	Arten von OP's	3-3
	Differenzspannung	3-3
	Eingangswiderstand	3-3
	Eingangsruhestrom	3-3
Differenzverstärkung	Berechnung	3-4
	Diagramm	3-4
Gleichtaktaussteuerung	Definition	3-4
Gleichtaktverstärkung	Berechnung	3-4
	Diagramm	3-4
Gleichtaktunterdrückung	Berechnung	3-4
Frequenzgang bei Differenzverstärkung	Diagramm	3-5
	Definition	3-5
Kleinsignalbandbreite	Definition	3-6
	Berechnung	3-6
slew rate	Definition	3-6
	Berechnung	3-6
Großsignalbandbreite	Definition	3-6
	Berechnung	3-6
Nichtinvertierender Verstärker	Schaltbild	3-7
	Diagramm	3-7
	Verstärkung	3-7
	Eingangswiderstand	3-7
	Ausgangswiderstand	3-7
Impedanzwandler	Schaltbild	3-7
	Berechnung	3-7
Invertierender Verstärker	Schaltbild	3-8
	Diagramm	3-8
	Verstärkung	3-8
	Eingangswiderstand	3-8
	Ausgangswiderstand	3-8
	Kompensationswiderstand	3-8
Konstantstromquelle	Schaltbild	3-9
	Berechnung	3-9
Strom-Spannungs-Verstärker	Schaltbild	3-9
	Berechnung	3-9
Summierverstärker	Schaltbild	3-9
	Berechnung	3-9
Summierverstärker mit Subtraktionseingang	Schaltbild	3-10
	Berechnung	3-10
Integrator	Schaltbild	3-11
	Diagramm	3-11
	Berechnung	3-11
Differentiator	Schaltbild	3-12
	Diagramm	3-12
	Berechnung	3-12

<b>Thema</b>	<b>Unterpunkt</b>	<b>Seite</b>
Komperator allgemein	Schaltbild	3-13
	Diagramm	3-13
	Berechnung	3-13
Komperator mit definierter Ausgangsspannung	Schaltbild	3-13
	Berechnung	3-13
Fensterkomperator	Schaltbild	3-14
	Diagramm	3-14
Invertierender Komperator (invertierender Schmitt-Trigger)	Schaltbild	3-15
	Diagramm	3-15
	Definition	3-15
	Berechnung	3-15
Nichtinvertierender Komperator (nichtinvertierender Schmitt-Trigger)	Schaltbild	3-16
	Diagramm	3-16
	Definition	3-16
	Berechnung	3-16
Schmitt-Trigger mit unsymmetrischen Schaltschwellen	Schaltbild	3-17
	Berechnung	3-17

**Operationsverstärker allgemein:****Arten von OP's:****- OP mit Transistor-Eingang:**

Anwendungen mit geringen Anforderungen  
z.B. Schaltverstärker, NF-Verstärker

**Differenzeingangswiderstand klein**

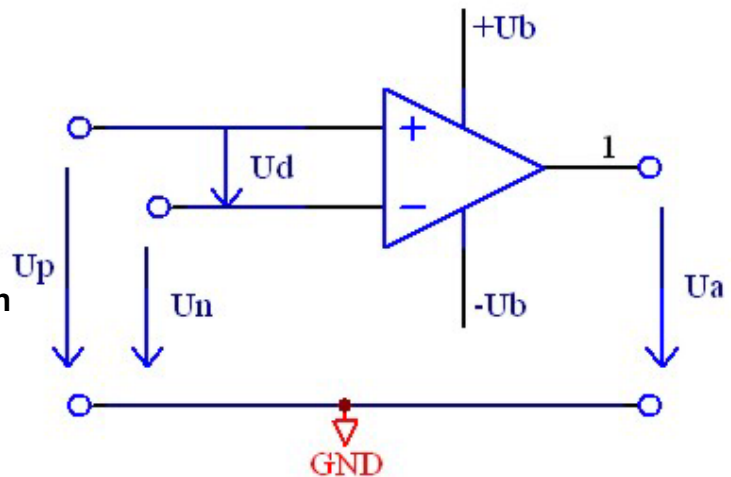
**- OP mit FET-Eingang:**

Anwendungen mit hohen Anforderungen  
z.B. Integrierer, Differenzierer

**Differenzeingangswiderstand sehr hoch (FET)**

**- OP mit hoher Langzeitstabilität:**

z.B. in medizinischen Geräten



$$U_d = U_p - U_n$$

$$\pm U_a = \pm U_B - 3V$$

$U_d$  = Differenzspannung in V

$U_p$  = Spannung am nichtinvertierenden Eingang (+ Eingang) in V

$U_n$  = Spannung am invertierenden Eingang (- Eingang) in V

$+U_a = U_{amax}$  = positive Aussteuergrenze des OP in V ( typisch +12V )

$-U_a = U_{amin}$  = negative Aussteuergrenze des OP in V ( typisch -12V )

**Eingangswiderstände, Eingangsruhestrome:****OP's mit Bipolareingang:**

- Differenzeingangswiderstand  $r_e$  im Bereich von  $10^6 \Omega$
- Gleichtakteingangswiderstand  $r_{GL}$  im Bereich von  $10^9 \Omega$
- Eingangsruhestrom  $I_B$  im Bereich von 20 nA bis 200 nA (nA =  $10^{-9}$  A)

**OP's mit FET-Eingang:**

- Differenzeingangswiderstand  $r_e$  im Bereich von  $10^{12} \Omega$
- Gleichtakteingangswiderstand  $r_{GL}$  im Bereich von  $10^{14} \Omega$

Eingangsruhestrom  $I_B$  im Bereich von wenigen pA (pA =  $10^{-12}$  A)

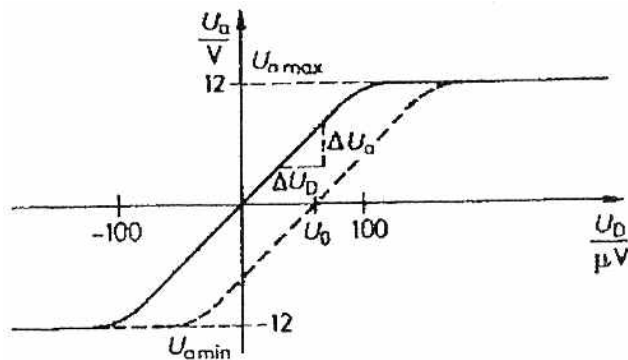
**Differenzverstärkung:**

$$A_D = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_D}$$

$$\Delta U_D = \frac{\Delta U_a}{A_D}$$

$$\Delta U_a = A_D \cdot \Delta U_D$$

$$A_D(\text{dB}) = 20 \cdot \log\left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_D}\right)$$



Wie im Diagramm zu sehen ist, verläuft beim realen OP (gestrichelte Linie) die Übertragungskennlinie nicht durch den Nullpunkt.

**Die Spannung  $U_0$  wird als Offsetspannung bezeichnet.**

Sie beträgt einige mV und muß als Differenzspannung am – Eingang angelegt werden, um die Kennlinienverschiebung zu korrigieren.

$A_D$  = Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OP. **Ohne Einheit !!**

$A_D(\text{dB})$  = Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OP in dB

$\Delta U_A$  = Änderung der Eingangsspannung in V

$\Delta U_D$  = Änderung der Differenzspannung in V

$U_0$  = Offsetspannung des OP in V

**Gleichtaktaussteuerung:**

Liegen am + Eingang ( $U_p$ ) und am – Eingang des OP ( $U_n$ ) die gleiche Spannung, so ist die Differenzspannung  $U_D$  beim idealen OP gleich Null.

**Beim realen OP stellt sich allerdings eine Ausgangsspannung  $U_{GL}$  ein, die Gleichtaktaussteuerung genannt wird.**

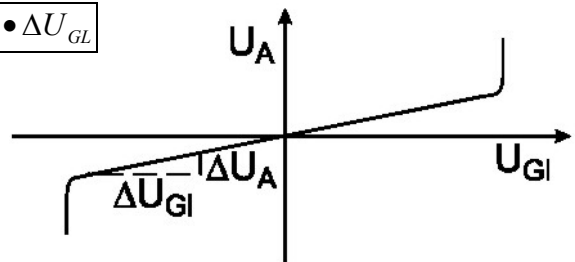
**Gleichtaktverstärkung:**

$$A_{GL} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{GL}}$$

$$\Delta U_{GL} = \frac{\Delta U_a}{A_{GL}}$$

$$\Delta U_a = A_{GL} \cdot \Delta U_{GL}$$

$$A_{GL}(\text{dB}) = 20 \cdot \log(A_{GL})$$



$A_{GL}$  = Gleichtaktverstärkung. **Ohne Einheit !!**

$A_{GL}(\text{dB})$  = Gleichtaktverstärkung in dB

$\Delta U_a$  = Änderung der Ausgangsspannung in V

$\Delta U_{GL}$  = Änderung der Gleichtaktaussteuerung in V

**Gleichtaktunterdrückung:**

$$G = \frac{A_D}{A_{GL}}$$

$$A_{GL} = \frac{A_D}{G}$$

$$A_D = G \cdot A_{GL}$$

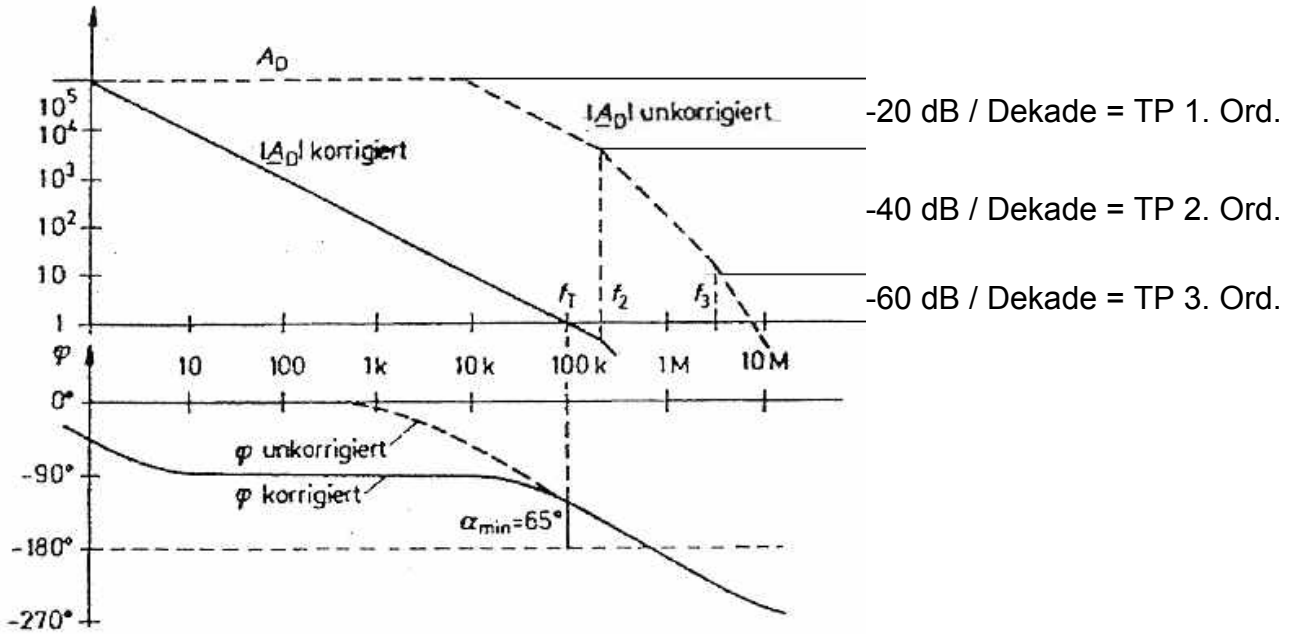
$G$  = Gleichtaktunterdrückung

$A_D$  = Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OP. **Ohne Einheit !!**

$A_{GL}$  = Gleichtaktverstärkung. **Ohne Einheit !!**

Typische Werte für realen OP:  $G \approx 10^4 \dots 10^5$

**Frequenzgang bei Differenzverstärkung:**

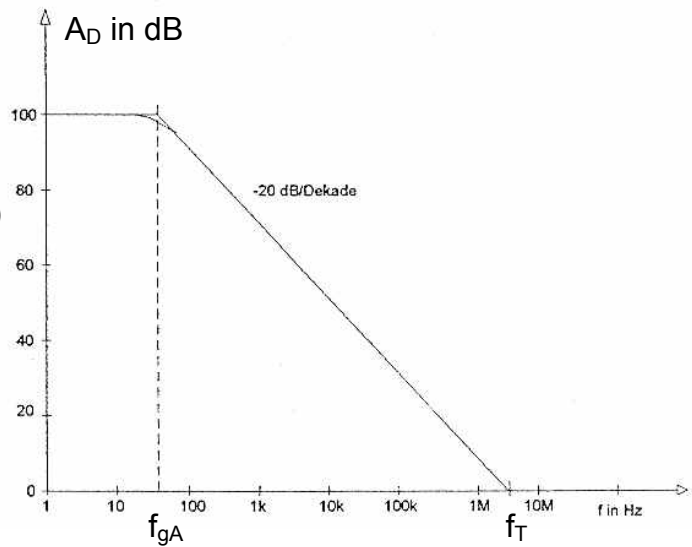


Durch den mehrstufigen inneren Aufbau und parasitärer Kapazitäten verhält sich der OP bei steigender Frequenz anfangs wie ein Tiefpass 1. Ordnung, dann wie ein Tiefpass 2. Ordnung, dann wie ein Tiefpass 3. Ordnung. Das bedeutet, dass mit steigender Frequenz die Verstärkung abnimmt und die Phasenverschiebung zwischen  $u_e$  und  $u_a$  zunimmt. Ab einer bestimmten Frequenz, während  $A_D$  mit  $-40 \text{ dB / Dekade}$  abnimmt, erreicht die Phasenverschiebung  $180^\circ$ . Bei einer Gegenkopplungsschaltung wird somit der Gegenkopplungseffekt aufgehoben und die Schaltung beginnt zu schwingen.

Um diesen Effekt zu verhindern wird (meist) **in den OP ein sogenannter Korrekturkondensator  $C_K$  eingebaut.**

Durch diesen wird eine  **$-3\text{dB}$ -Grenzfrequenz  $f_{gA}$  (einige 10 Hz)** festgelegt, bis zu der die Differenzverstärkung  $A_D$  fast konstant bleibt und ab dort mit  $-20\text{dB / Dekade}$  abnimmt.

Bei der **Transitfrequenz  $f_T$**  erreicht die Differenzverstärkung  $A_D$  den Wert  $0\text{dB}$  ( $= 1$ ). Die Transitfrequenz  $f_T$  wird auch als **Verstärkungs-Bandbreite-Produkt** bezeichnet.



**Kleinsignalbandbreite:**

Die Kleinsignalbandbreite ist die Frequenz, bis zu der eine **Eingangsspannung mit geringer Amplitude** verzerrungsfrei durch den OP verstärkt wird.

(Bei größeren Amplituden -> siehe Großsignalbandbreite)

$$b = f_{gA} = \frac{f_T}{A_D}$$

$$A_D = \frac{f_T}{b}$$

$$f_T = A_D \cdot b$$

b = Kleinsignalbandbreite in Hz

f<sub>gA</sub> = Grenzfrequenz in Hz

f<sub>T</sub> = Transitfrequenz in Hz

A<sub>D</sub> = Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OP. **Ohne Einheit !!**

**Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung (slew rate):**

Die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung, auch „slew rate“, sagt aus, wie groß die Änderung der Ausgangsspannung ΔU<sub>a</sub> während einer Zeitspannung dt ist.

$$\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) = \frac{I_{C_{\max}}}{C_K}$$

$$C_K = \frac{I_{C_{\max}}}{\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right)}$$

$$I_{C_{\max}} = \left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) \cdot C_K$$

$\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right)$  = Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgang in  $\frac{V}{\mu s}$  ( $= 10^6 \cdot \frac{V}{s}$ )

I<sub>Cmax</sub> = I<sub>K</sub> = maximaler Ausgangsstrom des Eingangsdifferenzverstärkers in A

C<sub>K</sub> = Korrekturkondensator in F

**Achtung beim Ausrechnen:**  $\left[ \frac{dU_a(t)}{dt} \right] = \frac{V}{s} = 10^{-6} \cdot \frac{V}{\mu s}$

**Großsignalbandbreite:**

Die Großsignalbandbreite ist, bei sinusförmiger Aussteuerung der Ausgangsspannung, die Frequenz, bei der das Ausgangssignal noch ohne Verzerrung verstärkt wird.

Sie wird durch die „slew rate“ und die Amplitude der Ausgangsspannung bestimmt.

$$f = \frac{\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \hat{u}_a}$$

$$\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) = f \cdot 2 \cdot \pi \cdot \hat{u}_a$$

$$\hat{u}_a = \frac{\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

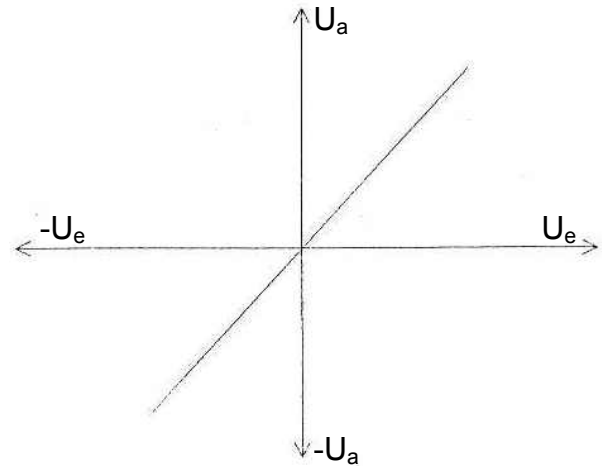
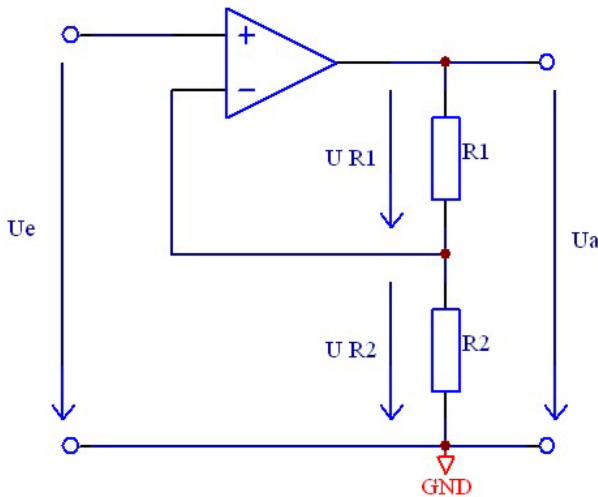
f = Großsignalbandbreite in Hz (auch als B bekannt)

$\left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right)$  = Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung in  $\frac{V}{\mu s}$  ( $= 10^6 \cdot \frac{V}{s}$ )

$\hat{u}_a$  = Amplitude der Ausgangsspannung in V ( $= \frac{U_a}{\sqrt{2}}$  bei Sinus)

Wenn die Frequenz des Eingangssignals höher als die Großsignalbandbreite ist, ergeben sich am Ausgang sogenannte TIM-Verzerrungen (transiente Intermodulationsverzerrung).

**Nichtinvertierender Verstärker:**



Beim nichtinvertierenden Verstärker wird die Eingangsspannung  $U_e$  proportional verstärkt.

**Verstärkung:**

$$v_u = \frac{U_a}{U_e}$$

$$U_e = \frac{U_a}{v_u}$$

$$U_a = v_u \cdot U_e$$

$$v_u = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_1 = (v_u - 1) \cdot R_2$$

$$R_2 = \frac{R_1}{(v_u - 1)}$$

$$v_u (dB) = 20 \cdot \log(v_u)$$

$$U_e = U_{R2} = I_R \cdot R_2$$

$$U_{R1} = I_R \cdot R_1$$

$$U_2 = I_R \cdot (R_1 + R_2)$$

$v_u$  = Verstärkung der beschalteten OP. **Ohne Einheit !!!**

$v_u(dB)$  = Verstärkung der beschalteten OP in dB

$U_a$  = Ausgangsspannung in V

$U_e$  = Eingangsspannung in V

$R_1$  = Gegenkopplungswiderstand in  $\Omega$

$R_2$  = Widerstand in  $\Omega$

$U_{R1}$  = Spannung am Widerstand  $R_1$  in V

$U_{R2}$  = Spannung am Widerstand  $R_2$  in V

$I_R$  = Strom durch die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  in A (Eingangsstrom am –Eingang = 0 !!)

**Eingangswiderstand:**

- idealer OP:  $r_e = \infty$
- realer OP:  $r_e \approx r_{GL}$  (Gleichstromwiderstand)

**Ausgangswiderstand:**

- idealer OP:  $r_a \approx 0$

Der Ausgang des nichtinvertierenden Verstärkers ist eine **Konstantspannungsquelle** dar.

**Impedanzwandler:**

Der Impedanzwandler ist ein nichtinvertierender Verstärker mit  $R_1 = 0 \Omega$  und  $R_2 = \infty \Omega$

$$v_u = 1$$

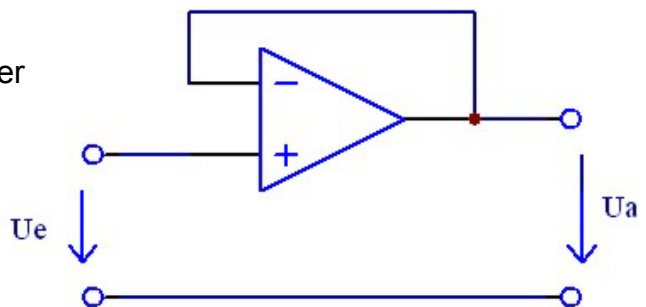
$$\Rightarrow \frac{U_A}{U_E} = 1$$

$$\Rightarrow U_A = U_E$$

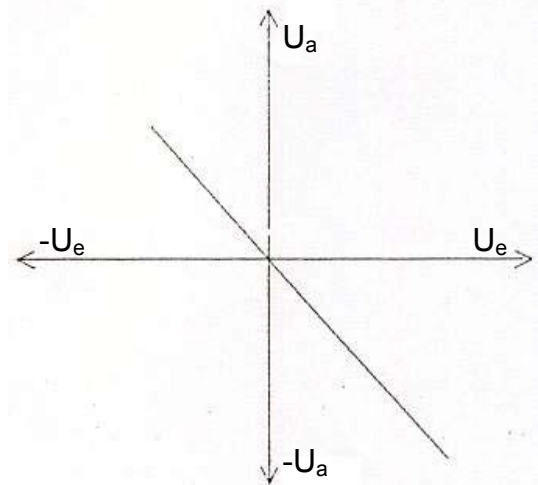
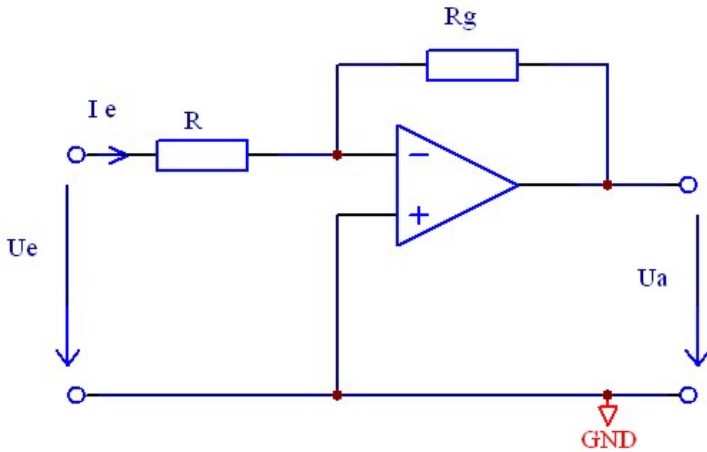
$v_u$  = Verstärkungsfaktor. **Ohne Einheit !!**

$U_E$  = Eingangsspannung in V

$U_A$  = Ausgangsspannung in V



**Invertierender Verstärker:**



Der invertierende Verstärker verstärkt die Eingangsspannung  $U_e$  umgekehrt proportional.

Weil die Eingangsströme des OP  $\approx 0$  sind, wird der **-Eingang bei dieser Schaltungsart** auch als „**virtuelle Masse**“ bezeichnet.

**Verstärkung:**

$v_u = \frac{U_a}{U_e}$	$U_e = \frac{U_a}{v_u}$	$U_a = v_u \cdot U_e$	$v_u = -\frac{R_g}{R}$	$R = -\frac{R_g}{v_u}$	$R_g = -(v_u \cdot R)$
$v_u (dB) = 20 \cdot \log(v_u)$	$I_e = I_{Rg}$	$U_e = U_R = I_e \cdot R$	$U_2 = U_{Rg} = -I_e \cdot R_g$		

$v_u$  = Verstärkung der beschalteten OP. **Ohne Einheit !!!**

$v_u(dB)$  = Verstärkung der beschalteten OP in dB

$U_a$  = Ausgangsspannung in V

$U_e$  = Eingangsspannung in V

$R_g$  = Gegenkopplungswiderstand in  $\Omega$

$R$  = Eingangswiderstand in  $\Omega$

$U_R$  = Spannung am Eingangswiderstand R in V

$U_{Rg}$  = Spannung am Widerstand  $R_g$  in V

$I_e$  = Eingangsstrom in A

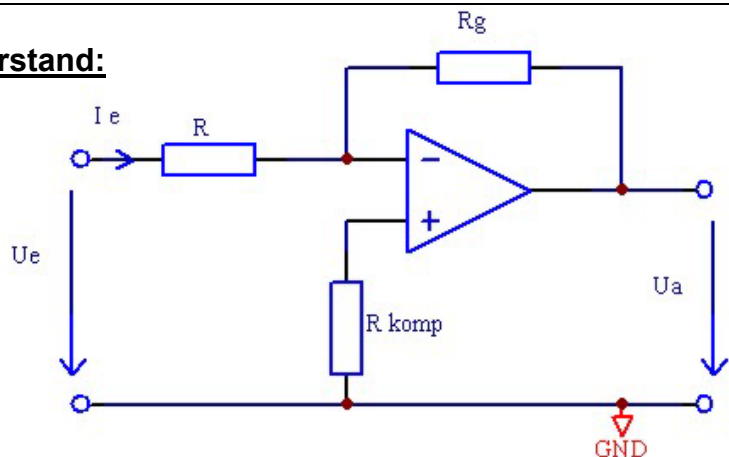
Eingangswiderstand:  $r_e = R$

Ausgangswiderstand:  $r_a = 0$

**Invertierer mit Kompensationswiderstand:**

Wenn R und  $R_g$  sehr hochohmig sind (im M $\Omega$ -Bereich) können die sehr kleinen Eingangsströme des OP nicht mehr unberücksichtigt bleiben.  
 $\Rightarrow$  Kompensationswiderstand  $R_{komp}$

$$R_{komp} = \frac{R + R_g}{R \cdot R_g}$$



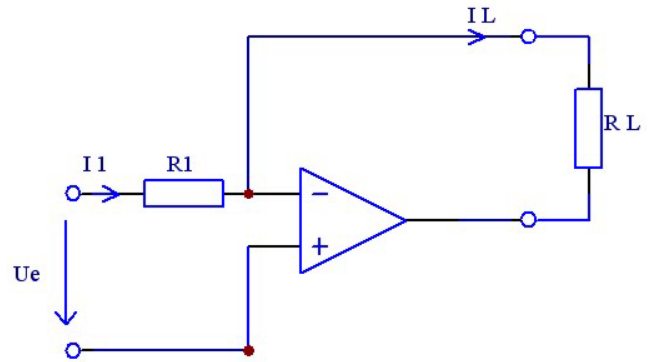
**Konstantstromquelle:**

$$I_1 = I_L = \frac{U_e}{R_1}$$

$$R_1 = \frac{U_e}{I_L}$$

$$U_e = I_L \cdot R_1$$

$I_1$  = Eingangsstrom in A  
 $I_L$  = Strom durch den Lastwiderstand in A  
 $U_e$  = Eingangsspannung in V  
 $R_1$  = Eingangswiderstand in  $\Omega$



**Strom – Spannungs – Verstärker:**

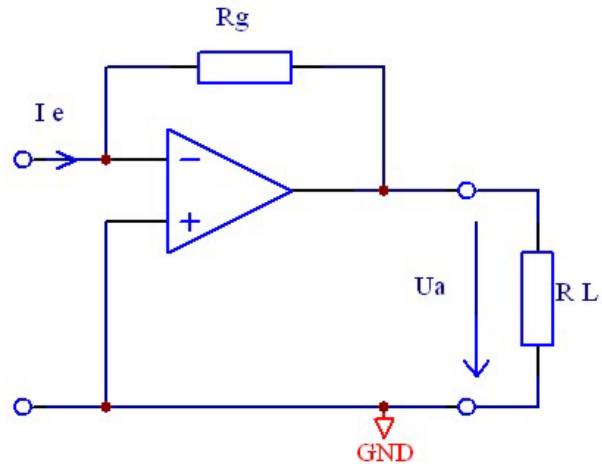
Diese Schaltung ist für die Strommessung sehr gut geeignet, da der niedrige Innenwiderstand den Messkreis fast nicht belastet.

$$u_a = -i_e \cdot R_g$$

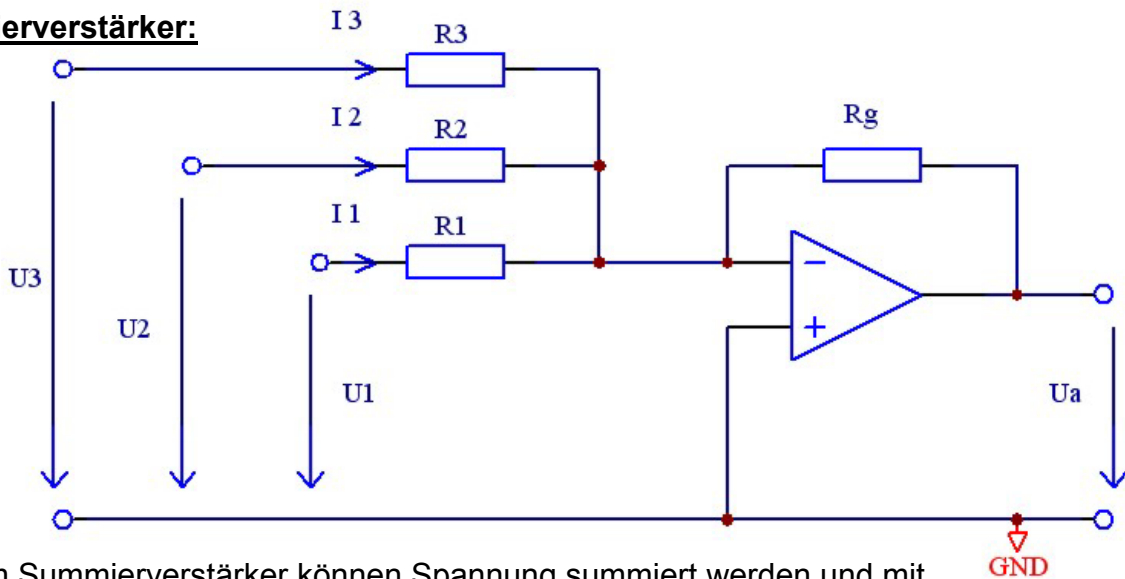
$$i_e = -\frac{u_a}{R_g}$$

$$R_g = -\frac{u_a}{i_e}$$

$u_a$  = Ausgangsspannung in V  
 $i_e$  = Eingangsstrom in A  
 $R_g$  = Gegenkopplungswiderstand in  $\Omega$



**Summierverstärker:**



Mit dem Summierverstärker können Spannung summiert werden und mit Hilfe der Eingangswiderstände gewichtete werden.

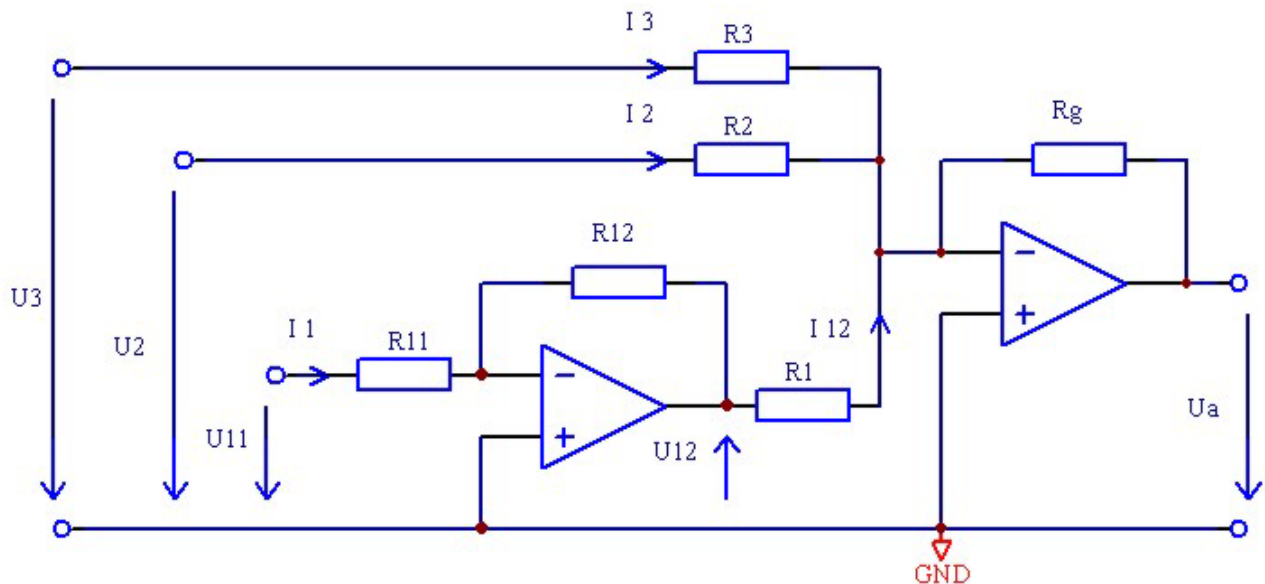
$$U_a = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right) \cdot R_g$$

$$U_a = -(I_1 + I_2 + I_3) \cdot R_g$$

$U_a$  = Ausgangsspannung in V  
 $U_1, U_2, U_3$  = Eingangsspannungen in V  
 $R_1, R_2, R_3$  = Eingangswiderstände in  $\Omega$   
 $R_g$  = Gegenkopplungswiderstand in  $\Omega$   
 $I_1, I_2, I_3$  = Eingangsströme in A

**Summierverstärker mit Subtraktionseingang:**

Will man bei einem Summierverstärker Spannungen abziehen, so schaltet man zwischen Spannung und Eingang des Summierverstärker einen invertierenden Verstärker.



$$U_{12} = -U_{11} \cdot \frac{R_{12}}{R_{11}}$$

$$U_a = -\left(\frac{U_{12}}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right) \cdot R_g$$

$$U_a = -\left(\frac{U_{12}}{R_1} + I_2 + I_3\right) \cdot R_g$$

Wenn man  $R_{11} = R_{12}$  wählt gilt:

$$U_{12} = -U_{11}$$

$$U_a = -\left(\frac{-U_{11}}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right) \cdot R_g$$

$$U_a = -\left(\frac{-U_{11}}{R_1} + I_2 + I_3\right) \cdot R_g$$

$U_{11}$  = Eingangsspannung des Inverter in V

$R_{11}$  = Eingangswiderstand des Inverter in  $\Omega$

$I_1$  = Eingangsstrom des Inverter in A

$R_{12}$  = Gegenkopplungswiderstand des Inverter in  $\Omega$

$U_{12}$  = Ausgangsspannung des Inverter und Eingangsspannung des Summierers in V

$U_{12}, U_2, U_3$  = Eingangsspannungen des Summierers in V

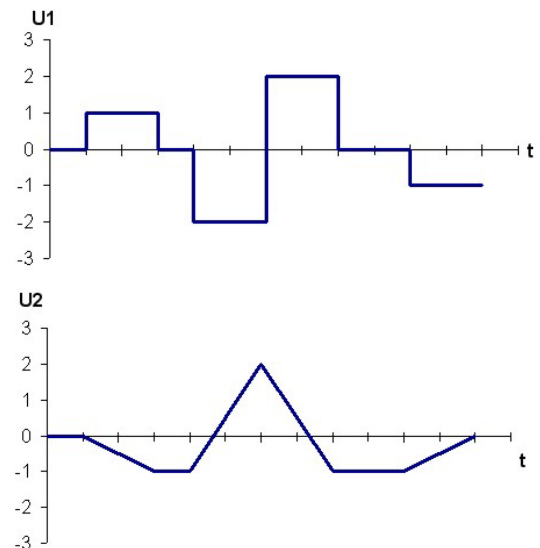
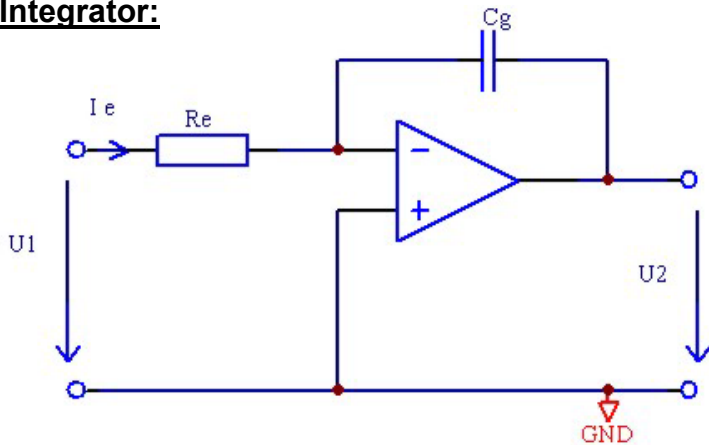
$R_1, R_2, R_3$  = Eingangswiderstände des Summierers in  $\Omega$

$R_g$  = Gegenkopplungswiderstand des Summierers in  $\Omega$

$I_{12}, I_2, I_3$  = Eingangsströme des Summierers in A

$U_a$  = Ausgangsspannung in V

**Integrator:**



$$i_e(t) = i_c(t) ; u_2(t) = u_c(t) \Rightarrow u_2(t) = \frac{Q_c(t)}{C_g}$$

$$\Delta U_2(t_0 - t_1) = \frac{1}{C_g} \cdot \int_{t_0}^{t_1} i_1(t) \cdot dt$$

$$\Rightarrow \Delta U_2(t_0 - t_1) = \frac{1}{C_g} \cdot [i_1(t) \cdot t]_{t_0}^{t_1}$$

$$\Rightarrow \Delta U_2(t_0 - t_1) = \frac{1}{C_g} \cdot [(i_1(t) \cdot t_1) - (i_1(t) \cdot t_0)]$$

Obergrenze - Untergrenze

$$\Delta U_2(t_0 - t_1) = \frac{i_1(t)}{C_g} \cdot (t_1 - t_0)$$

mit  $i_c(t) = \frac{u_1(t)}{R_e}$

$$\Delta U_2(t_0 - t_1) = -\frac{1}{R_e \cdot C_g} \cdot \int_{t_0}^{t_1} u_1(t) \cdot dt$$

$$\Rightarrow \Delta U_2(t_0 - t_1) = -\frac{1}{R_e \cdot C_g} \cdot [u_1(t) \cdot t]_{t_0}^{t_1}$$

$$\Rightarrow \Delta U_2(t_0 - t_1) = -\frac{1}{R_e \cdot C_g} \cdot [(u_1(t) \cdot t_1) - (u_1(t) \cdot t_0)]$$

Obergrenze - Untergrenze

$$\Delta U_2(t_0 - t_1) = -\frac{u_1(t)}{R_e \cdot C_g} \cdot (t_1 - t_0)$$

$\Delta U_2(t_0 - t_1)$  = Änderung der Ausgangsspannung vom Zeitpunkt  $t_0$  zum Zeitpunkt  $t_1$  in V

$t_0$  = Anfangszeit der Zeitspanne in s

$t_1$  = Endzeit der Zeitspanne in s

$R_e$  = Eingangswiderstand in  $\Omega$

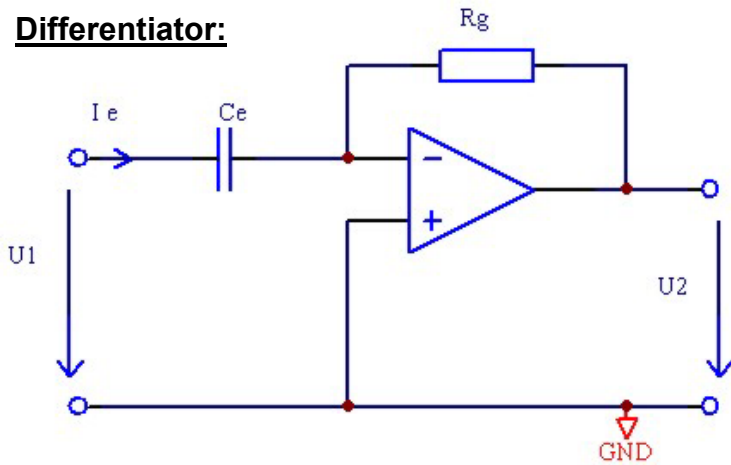
$C_g$  = Gegenkopplungskondensator in F

$u_1(t)$  = Eingangsspannung zum Zeitpunkt t in V

Je höher die Eingangsspannung während einer Zeitspanne von  $t_0$  bis  $t_1$  ist, desto größer ist die Ausgangsspannungsänderung  $\Delta u_a$  während dieser Zeitspanne. (Siehe Diagramm)

Dieser Schaltungstyp ist gut geeignet, um Dreieck- und Sägezahnspannungen zu erzeugen.

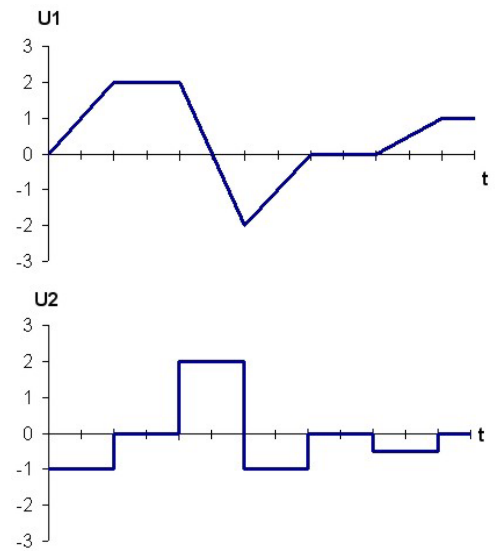
**Differentiator:**



$$i_e(t) = C_e \cdot \frac{dU_1}{dt}$$

$$u_2(t) = -i_e(t) \cdot R_g$$

$$U_2(t) = -R_g \cdot C_e \cdot \frac{dU_1}{dt}$$



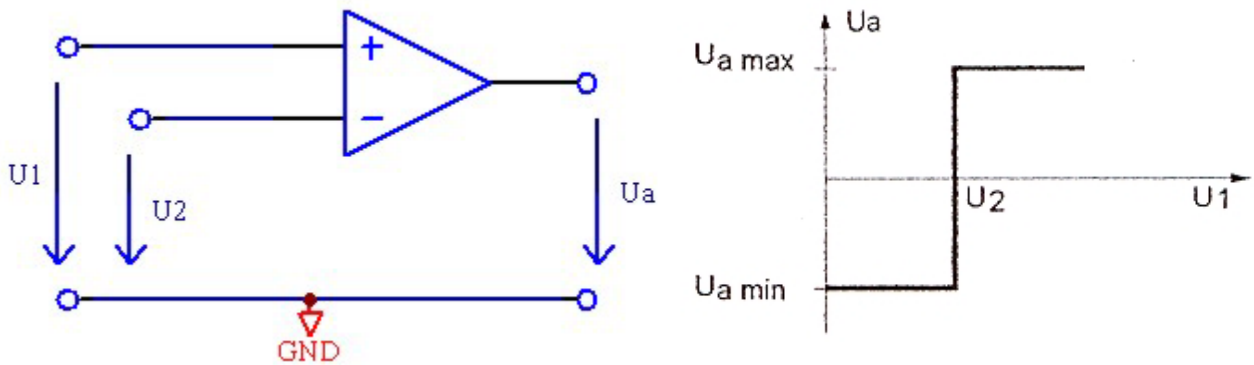
$U_2(t)$  = Ausgangsspannung zum Zeitpunkt t in V

$C_e$  = Eingangskondensator in F

$\frac{dU_1}{dt}$  = Änderung der Eingangsspannung während der Zeitspanne dt in V

Je größer die Eingangsspannungsänderung  $\Delta U_1$  während einer Zeitspanne dt ist, desto höher ist die Ausgangsspannung in dieser Zeitspanne. (Siehe Diagramm)

**Komparator allgemein:**



Der Komparator wird auch als Vergleichler bezeichnet.

Solange die Spannung am + Eingang ( $U_1$ ) kleiner als die Spannung am –Eingang ( $U_2$ ) ist, liegt die Ausgangsspannung auf  $U_{amin}$ . Wenn nun  $U_1$  größer als  $U_2$  wird, steigt die Ausgangsspannung aufgrund der fehlenden Gegenkopplung und der hohen Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OP auf  $U_{amax}$ .

Aufgrund der maximalen Anstiegsgeschwindigkeit des OP (slew rate) ergibt sich eine Anstiegszeit:

$$t_A \approx \frac{U_{amax} - U_{amin}}{slew\ rate}$$

$t_A$  = Anstiegszeit von  $U_{amin}$  –  $U_{amax}$  bzw. Abfallzeit von  $U_{amax}$  –  $U_{amin}$  in s

$U_{amax}$  = maximale Ausgangsspannung in V (positive Aussteuergrenze)

$U_{amin}$  = minimale Ausgangsspannung in V (negative Aussteuergrenze)

slew rate =  $\frac{dUa(t)}{dt}$  = Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung in  $\frac{V}{\mu s}$

typischer Wert für einem Standard-OP:

mit  $\pm U_a = \pm 12V$  und „slew rate“ =  $1 \frac{V}{\mu s}$  ergibt sich ein  $t_A$  von 24  $\mu s$

**Komparator mit definierter Ausgangsspannung:**

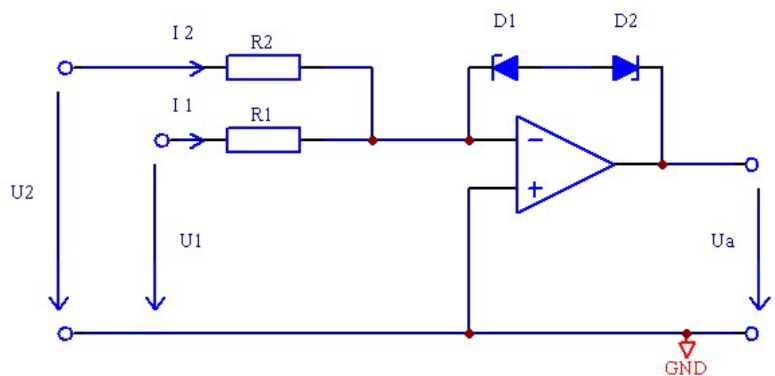
$$U_a = \pm(U_F + U_Z)$$

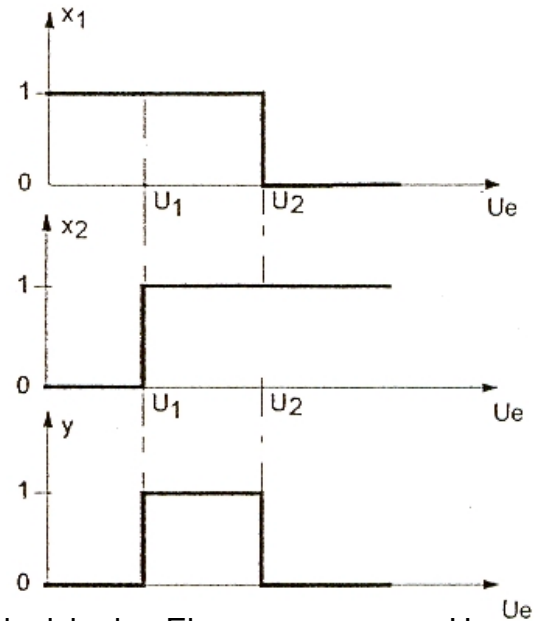
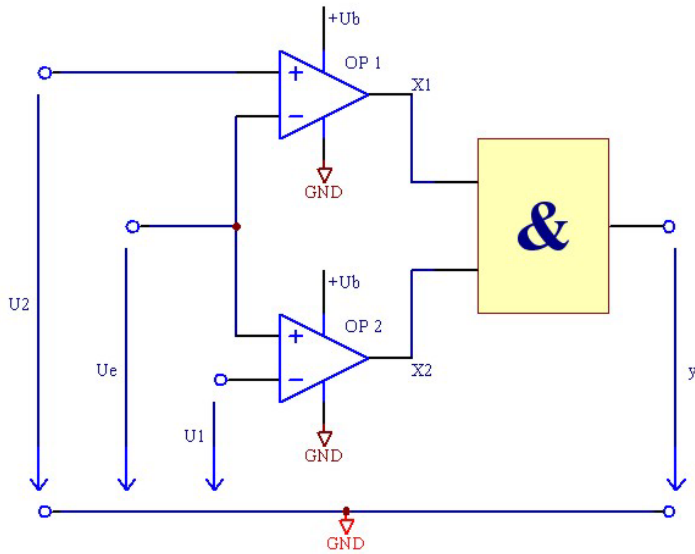
$U_a$  = Ausgangsspannung in V

$D_1, D_2$  = Zenerdioden

$U_F$  = Durchlaßspannung der Zenerdiode in V

$U_Z$  = Zenerspannung der Zenerdiode in V



**Fensterkomparator:**

Diese Schaltung wird verwendet, um festzustellen, ob sich eine Eingangsspannung  $U_e$  zwischen zwei Spannungsebenen  $U_1$  und  $U_2$  befindet. Es gilt:

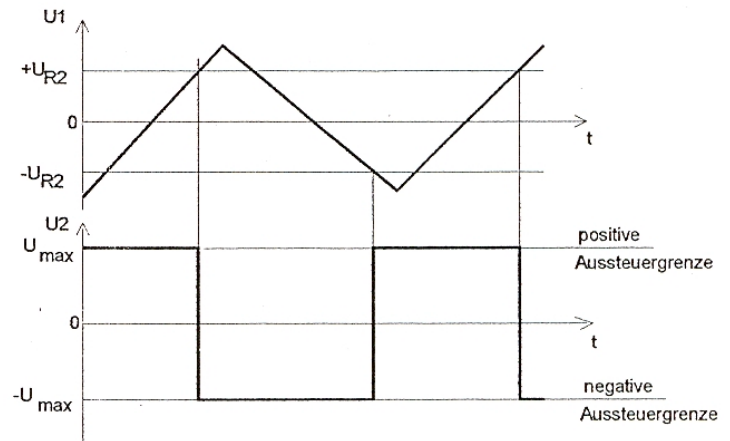
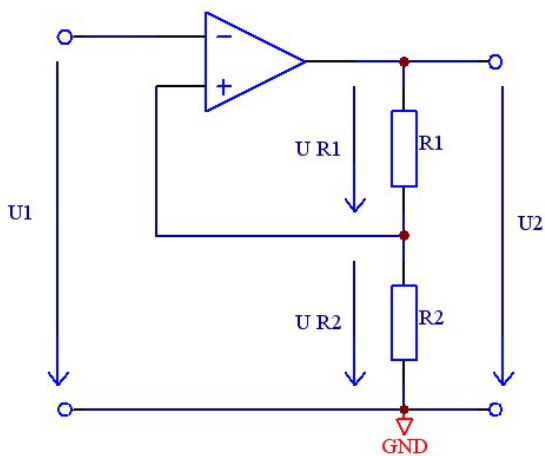
$$y=1 \text{ wenn } U_1 < U_e < U_2$$

$y$  = Ausgang des UND-Gliedes

$U_e$  = Eingangsspannung in V

$U_1$  = Untere Spannungsschwelle in V

$U_2$  = Obere Spannungsschwelle in V

**Invertierender Komparator (invertierender Schmitt-Trigger):**

Im Einschaltmoment wechselt die Ausgangsspannung des OP, durch den Mitkopplungseffekt bedingt, auf  $U_{a\max}$ , falls die Eingangsspannung  $U_1$  die obere Schaltschwelle  $+U_{kipp}$  ( $+U_{R2}$ ) nicht überschreitet. Wenn nun die obere Schaltschwelle  $+U_{kipp}$  überschritten wird, wechselt die Ausgangsspannung auf  $U_{a\min}$ . Nun muss erst wieder die untere Schaltschwelle  $-U_{kipp}$  ( $-U_{R2}$ ) unterschritten werden, damit die Ausgangsspannung wieder auf  $U_{a\max}$  wechselt. Für die Schaltschwellen gilt:

$$U_{R2} = U_1 \quad \frac{U_1}{\pm U_a} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$+U_{kipp} = U_{a\max} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Bei } U_1 \geq +U_{kipp} \text{ wechselt } U_a \text{ von } U_{a\max} \text{ nach } U_{a\min}$$

$$-U_{kipp} = U_{a\min} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Bei } U_1 \leq -U_{kipp} \text{ wechselt } U_a \text{ von } U_{a\min} \text{ nach } U_{a\max}$$

$U_{R2}$  = Spannung am Widerstand  $R_2$  in V

$U_1$  = Eingangsspannung in V

$U_{a\max}$  = maximale Ausgangsspannung in V (positive Aussteuergrenze)

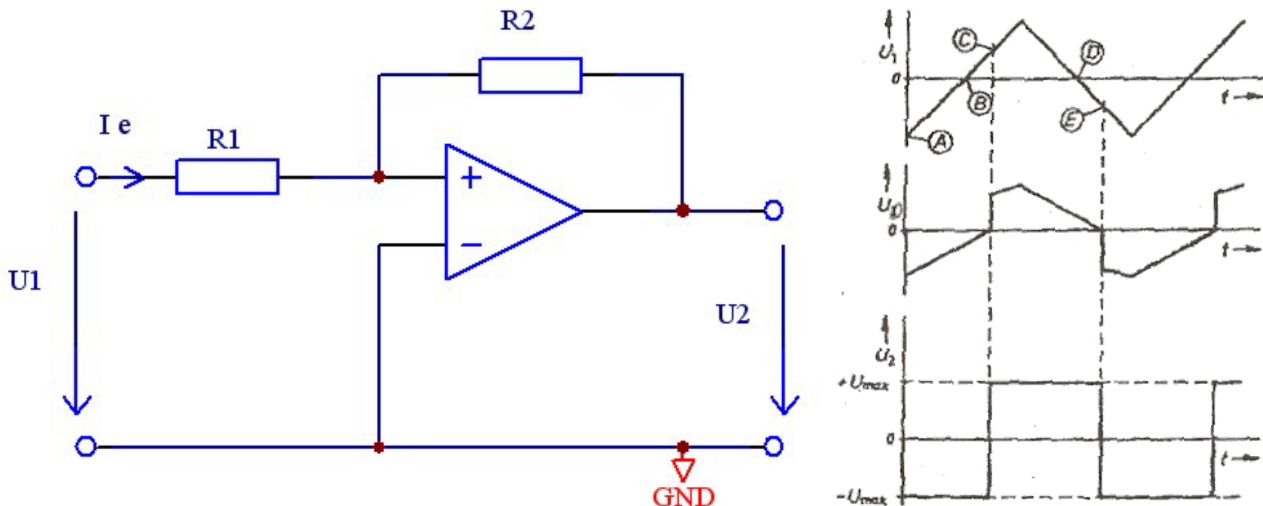
$U_{a\min}$  = minimale Ausgangsspannung in V (negative Aussteuergrenze)

$R_1$  = Mitkopplungswiderstand in  $\Omega$

$R_2$  = Widerstand in  $\Omega$

$+U_{kipp}$  =  $+U_{R2}$  Obere Schaltschwelle in V

$-U_{kipp}$  =  $-U_{R2}$  Untere Schaltschwelle in V

**Nichtinvertierender Komperator (nichtinvertierender Schmitt-Trigger):**

Im Einschaltmoment wechselt die Ausgangsspannung des OP, durch den Mitkopplungseffekt bedingt, auf  $U_{amin}$ , falls die Eingangsspannung  $U_1$  die obere Schaltschwelle  $+U_{kipp}$  ( $+U_{R2}$ ) nicht überschreitet. Wenn nun die obere Schaltschwelle  $+U_{kipp}$  überschritten wird, wechselt die Ausgangsspannung auf  $U_{amax}$ . Nun muss erst wieder die untere Schaltschwelle  $-U_{kipp}$  ( $-U_{R2}$ ) unterschritten werden, damit die Ausgangsspannung wieder auf  $U_{amin}$  wechselt. Für die Schaltschwellen gilt:

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_1}{\pm U_a} = \frac{R_1}{R_2} \quad \frac{U_1}{\pm U_a} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$+U_{kipp} = U_{amax} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Bei  $U_1 \geq +U_{kipp}$  wechselt  $U_a$  von  $U_{amin}$  nach  $U_{amax}$

$$-U_{kipp} = U_{amin} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Bei  $U_1 \leq -U_{kipp}$  wechselt  $U_a$  von  $U_{amax}$  nach  $U_{amin}$

$U_{R1}$  = Spannung am Eingangswiderstand in V

$U_{R2}$  = Spannung am Mitkopplungswiderstand in V

$U_1$  = Eingangsspannung in V

$U_{amax}$  = maximale Ausgangsspannung in V (positive Aussteuergrenze, typ. +12 V)

$U_{amin}$  = minimale Ausgangsspannung in V (negative Aussteuergrenze, typ. -12V)

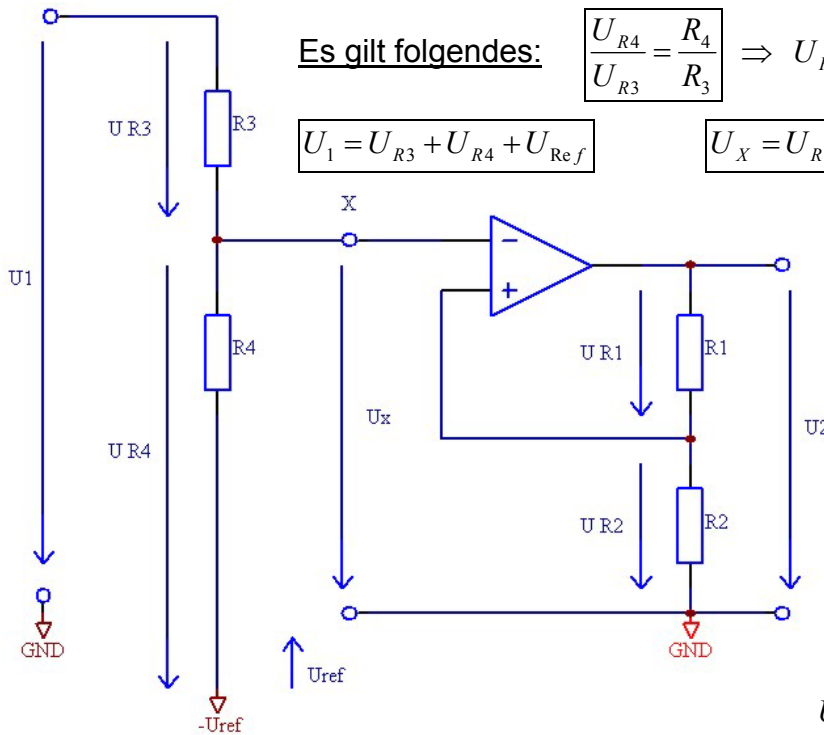
$R_1$  = Mitkopplungswiderstand in  $\Omega$

$R_2$  = Widerstand in  $\Omega$

$+U_{kipp}$  =  $+U_{R2}$  = Obere Schaltschwelle in V

$-U_{kipp}$  =  $-U_{R2}$  = Untere Schaltschwelle in V

**Komparator mit unsymmetrischen Schaltschwellen:**



Es gilt folgendes:

$$\frac{U_{R4}}{U_{R3}} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow U_{R3} = U_{R4} \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad U_{R4} = U_{R3} \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

$$U_1 = U_{R3} + U_{R4} + U_{Ref}$$

$$U_X = U_{R4} + U_{Ref}$$

$$U_1 = U_{R3} + U_X$$

$$U_1 = U_{R3} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) + U_{Ref}$$

$$U_1 = U_{R4} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) + U_{Ref}$$

$$U_{R3} = (U_1 - U_{Ref}) \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$U_{R4} = (U_1 - U_{Ref}) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_X = (U_1 - U_{Ref}) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} + U_{Ref}$$

$$U_X = U_{R2}$$

$$U_2 = U_{R1} + U_{R2}$$

$$U_X = U_2 - U_{R1}$$

$$\frac{U_{R2}}{U_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_X = U_2 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_{R2}}{U_{R1}} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$U_X = U_{R1} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_R = \frac{U_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_R = \frac{(U_2 - U_X)}{R_1}$$

$$I_R = \frac{U_{R2}}{R_2}$$

$$U_X = I_R \cdot R_2$$

$$U_X = U_2 - (I_R \cdot R_1)$$

**Potentialänderung an X:**

$$\Delta U_1 = U_{1max} - U_{1min}$$

$$\frac{\Delta U_{R4}}{\Delta U_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\Delta U_X = \Delta U_{R4}$$

$$\Delta U_X = \Delta U_1 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_{X+} = U_X + \frac{\Delta U_X}{2}$$

$$U_{X+} = U_X + \frac{\Delta U_{R4}}{2}$$

$$U_{X+} = U_{R4} + \frac{\Delta U_{R4}}{2} + U_{Ref}$$

$$U_{X-} = U_X - \frac{\Delta U_X}{2}$$

$$U_{X-} = U_X - \frac{\Delta U_{R4}}{2}$$

$$U_{X-} = U_{R4} - \frac{\Delta U_{R4}}{2} + U_{Ref}$$

U<sub>1</sub> = Eingangsspannung in V

U<sub>1max</sub> = obere Schaltschwelle in V

R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> = Widerstände in Ω

U<sub>R3</sub> = Spannung am Widerstand R<sub>3</sub>

U<sub>X+</sub> = maximales Potential am –Eingangs des OP in V

U<sub>X-</sub> = minimales Potential am –Eingangs des OP in V

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> = Widerstände in Ω

U<sub>R1</sub> = Spannung am Widerstand R<sub>1</sub> in V

U<sub>2</sub> = Ausgangsspannung in V

ΔU<sub>1</sub> = Änderung der Eingangsspannung in V

U<sub>1min</sub> = untere Schaltschwelle in V

U<sub>ref</sub> = Referenzspannung in V

U<sub>R4</sub> = Spannung am Widerstand R<sub>4</sub> in V

U<sub>R2</sub> = Spannung am Widerstand R<sub>2</sub> in V

ΔU<sub>X</sub> = Änderung der Differenzspannung in V

**Tip: Schaltung aufzeichnen und Spannungen eintragen!!**