

Inhaltsverzeichnis:

Thema	Bereiche	Seite
Verstärkungsfaktor	für Feldgrößen	2-2
	für Leistungsgrößen	2-2
Operationsverstärker allgemein	Empfindlichkeit des OP	2-3
	Gleichtaktverstärkung und –unterdrückung	2-3
	Reale Ausgangsspannung eines OP	2-3
u / u – OP – Verstärker	idealer Verstärkungsfaktor	2-4
	realer Verstärkungsfaktor	2-4
	Dimensionierung	2-4
	Eingangs- und Ausgangswiderstand	2-4
	ESB	2-4
u / i – OP – Verstärker	idealer Verstärkungsfaktor	2-5
	realer Verstärkungsfaktor	2-5
	Dimensionierung	2-5
	Eingangs- und Ausgangswiderstand	2-5
	ESB	2-5
i / u – OP – Verstärker	idealer Verstärkungsfaktor	2-6
	Dimensionierung	2-6
	Eingangs- und Ausgangswiderstand	2-6
	Besonderheiten	2-6
	ESB	2-6
i / i – OP – Verstärker	idealer Verstärkungsfaktor	2-7
	realer Verstärkungsfaktor	2-7
	Dimensionierung	2-7
	Eingangs- und Ausgangswiderstand	2-7
	Besonderheiten	2-7
	ESB	2-7
Impedanzwandler	Grundschtaltung und Berechnung	2-8
Invertierer	Grundschtaltung und Berechnung	2-8
Addierer	Grundschtaltung und Berechnung	2-9
Subtrahierer (Differenzverstärker)	Berechnung	2-9
Differenzierer	Berechnung und Diagramme	2-10
Integrierer	Berechnung und Diagramme	2-11

Verstärkungsfaktor:

Für Feldgrößen (z.B. U, I):

$$v_U = \frac{U_A}{U_E}$$

$$U_E = \frac{U_A}{v_U}$$

$$U_A = U_E \cdot v_U$$

$$a_U = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_A}{U_E}\right) dB$$

$$U_A = U_E \cdot 10^{\frac{(a_U)}{20dB}}$$

$$U_E = \frac{U_A}{10^{\frac{a_U}{20dB}}}$$

$$v_U = 10^{\frac{a_U}{20dB}}$$

$$a_U = 20 \cdot \lg(v_U) dB$$

Für Leistungsgrößen (z.B. P, W):

$$v_P = \frac{P_A}{P_E}$$

$$P_E = \frac{P_A}{v_P}$$

$$P_A = P_E \cdot v_P$$

$$a_P = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_A}{P_E}\right) dB$$

$$P_A = P_E \cdot 10^{\frac{(a_P)}{10dB}}$$

$$P_E = \frac{P_A}{10^{\frac{a_P}{10dB}}}$$

$$v_P = 10^{\frac{a_P}{10dB}}$$

$$a_P = 10 \cdot \lg(v_P) dB$$

v_U = Verstärkungsfaktor für Feldgrößen wie z.B. U, I (dez. Maßstab). **Ohne Einheit !**

U_E = Eingangsspannung in V

U_A = Ausgangsspannung in V

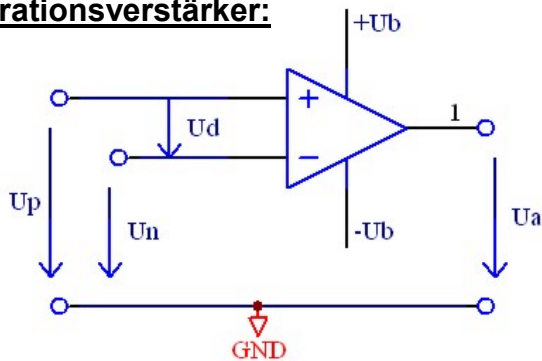
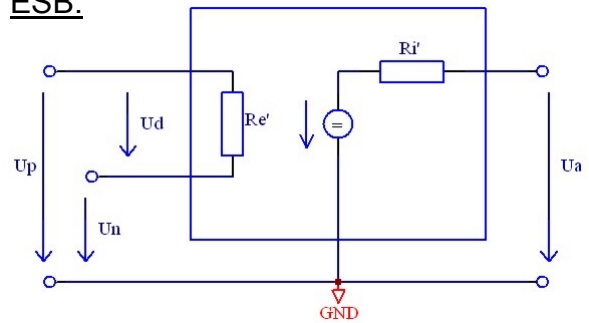
a_U = Verstärkungsfaktor für Feldgrößen in dB (logarithmischer Maßstab)

v_P = Verstärkungsfaktor für Leistungsgrößen wie z.B. P, W (dezimal). **Ohne Einheit !**

P_E = Eingangsleistung in W

P_A = Ausgangsleistung in W

a_P = Verstärkungsfaktor für Leistungsgrößen in dB (logarithmischer Maßstab)

Operationsverstärker:**ESB:****Empfindlichkeit:**

$$k' = \frac{u_A}{u_D}$$

$$u_D = \frac{u_A}{k'}$$

$$u_A = k' \cdot u_D$$

k' = Empfindlichkeit (interne Verstärkung) des OP. Ohne Einheit !!!

u_A = Ausgangsspannung in V

u_D = Differenzspannung in V (Spannung zwischen + und – Eingang des OP)

Gleichtaktverstärkung und Gleichtaktunterdrückung:

$$k_{GL} = \frac{k}{G}$$

$$G = \frac{k}{k_{GL}}$$

$$k = G \cdot k_{GL}$$

$$k_{GL} = \frac{u_{Offset}}{u_{GL}}$$

$$u_{GL} = \frac{u_{Offset}}{k_{GL}}$$

$$u_{Offset} = k_{GL} \cdot u_{GL}$$

k_{GL} = Gleichtaktverstärkung. **Ohne Einheit !**

k = Verstärkungsfaktor der äußeren Beschaltung des OP (siehe nächste Seiten)

G = Gleichtaktunterdrückung. **Ohne Einheit !**

u_{GL} = Spannung die am potentialgleichen + und – Eingang des OP anliegt

u_{Offset} = Spannung am Ausgang bei potentialgleichem + und – Eingang des OP

Reale Ausgangsspannung:

$$u_A = k \cdot u_D + k_{GL} \cdot u_{GL}$$

u_A = Ausgangsspannung in V

k = Verstärkungsfaktor der äußeren Beschaltung des OP. **Ohne Einheit !**

u_D = Spannung zwischen + und – Eingang des OP in V

k_{GL} = Gleichtaktverstärkung. **Ohne Einheit !**

u_{GL} = Spannung die am potentialgleichen + und – Eingang des OP anliegt in V

$$u_{Amax} = \pm U_B - 3V$$

u_{Amax} = maximale Ausgangsspannung in V (Sättigungsspannung)

$\pm U_B$ = Betriebsspannung des OP.

Die 3V werden **von der negativen, wie auch von der positiven Betriebsspannung abgezogen**, da sie durch Verluste an den internen Transistoren des OP's begründet sind.

u / u – OP-Verstärker, nichtinvertierend:

idealer Verstärkungsfaktor:

$$k_U = \frac{u_A}{u_E}$$

$$u_E = \frac{u_A}{k_U}$$

$$u_A = k_U \cdot u_E$$

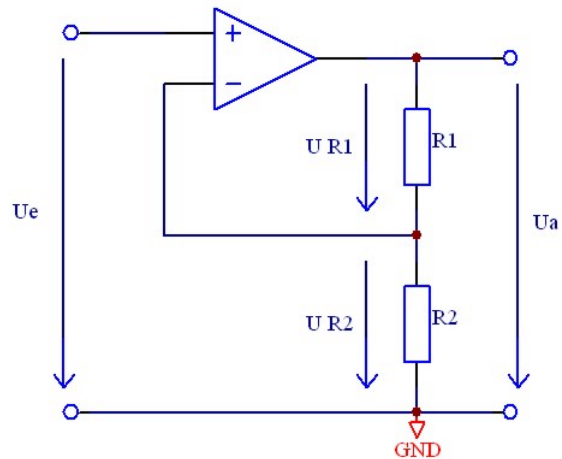
$$k_U = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

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

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

$$u_E = \frac{u_A}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}$$

$$u_A = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot u_E$$



k_U = Verstärkungsfaktor durch äußere Beschaltung des OP. **Ohne Einheit !**

u_A = Ausgangsspannung in V

u_E = Eingangsspannung in V

R_1 = Rückkopplungs-Widerstand in Ω

R_2 = Widerstand in Ω

realer Verstärkungsfaktor:

$$k_U = \frac{1}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{1}{k'} + \frac{R_i'}{R_L \cdot k'}}$$

k' = Empfindlichkeit (innere Verstärkung) des OP. **Ohne Einheit !**

R_i' = Ausgangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω

R_L = Lastwiderstand in Ω

Dimensionierung:

$(R_1 + R_2) \gg R_i'$; $(R_1 + R_2) \gg R_L$

$$R_i = \frac{R_i'}{1 + \frac{k'}{k_U}}$$

$$R_E = \frac{k'}{k_U} \cdot R_E'$$

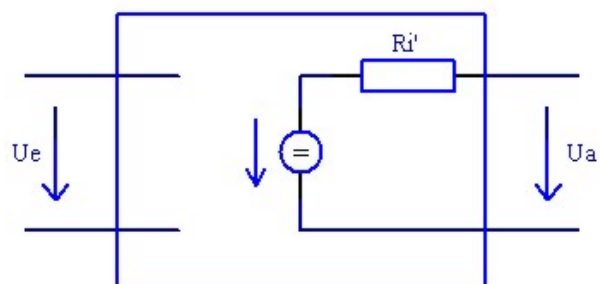
R_i = Ausgangswiderstand des beschalteten OP in Ω (ideal = 0)

R_E' = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω (ideal = ∞)

R_E = Eingangswiderstand des beschalteten OP in Ω (ideal = ∞)

ESB des beschalteten OP:

Der **Ausgang** des beschalteten OP stellt eine **Konstantspannungsquelle** dar.



u / i – OP-Verstärker, nichtinvertierend:

idealer Verstärkungsfaktor:

$$k_G = \frac{i_A}{u_E}$$

$$u_E = \frac{i_A}{k_G}$$

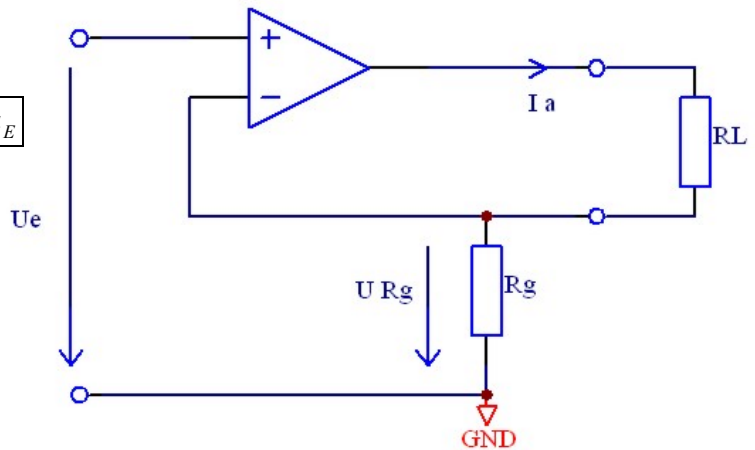
$$i_A = k_G \cdot u_E$$

$$k_G = \frac{1}{R_G}$$

$$R_G = \frac{1}{k_G}$$

$$u_E = i_A \cdot R_G$$

$$i_A = \frac{u_E}{R_G}$$



k_G = Verstärkungsfaktor durch äußere Beschaltung des OP in $\frac{1}{\Omega}$

i_A = Ausgangsstrom in A

u_E = Eingangsspannung in V

R_G = Rückkopplungs-Widerstand in Ω

realer Verstärkungsfaktor:

$$k_G = \frac{1}{R_G + \frac{R_G}{k'} + \frac{R_L}{k'} + \frac{R_i'}{k'}}$$

k' = Empfindlichkeit (innere Verstärkung) des OP. **Ohne Einheit !**

R_i' = Ausgangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω

R_L = Lastwiderstand in Ω

Dimensionierung:

$$R_G \ll R_E' ; u_{Rg} = i_A \cdot R_G$$

$$R_i = R_i' + (1 + k') \cdot R_G$$

$$R_E = \frac{k' \cdot R_i'}{k_G \cdot (R_G + R_L + R_i')}$$

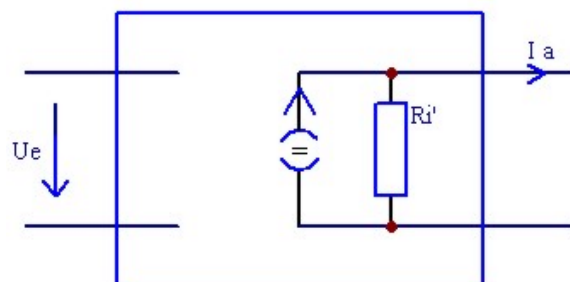
R_i = Ausgangswiderstand des beschalteten OP in Ω (ideal = ∞)

R_E' = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω (ideal = ∞)

R_E = Eingangswiderstand des beschalteten OP in Ω (ideal = ∞)

ESB des beschalteten OP:

Der **Ausgang** des beschalteten OP stellt eine **Konstantstromquelle** dar.



i / u – OP-Verstärker, invertierend:

idealer Verstärkungsfaktor:

$$k_R = \frac{u_A}{i_E}$$

$$i_E = \frac{u_A}{k_R}$$

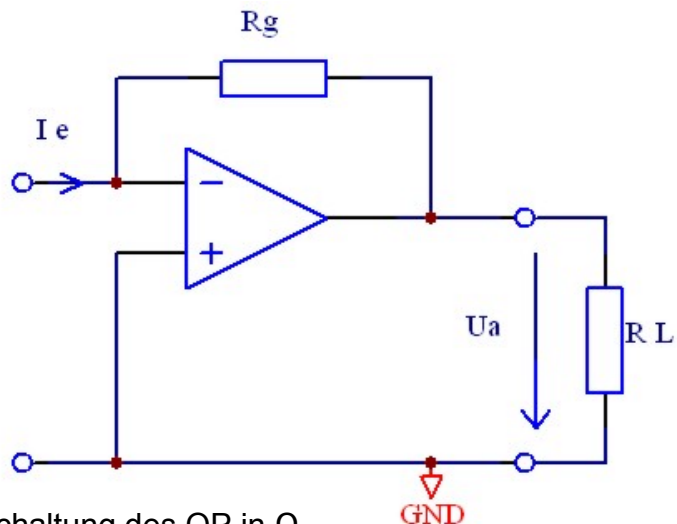
$$u_A = k_R \cdot i_E$$

$$k_R = -R_G$$

$$R_G = -k_R$$

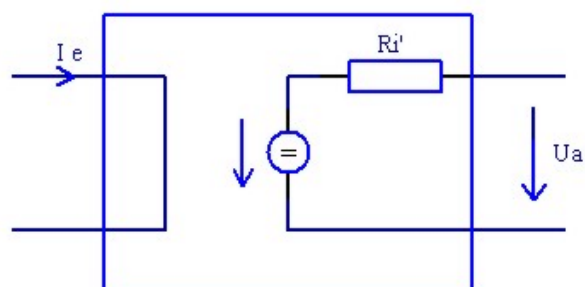
$$u_A = i_E \cdot (-R_G)$$

$$i_E = \frac{u_A}{-R_G}$$

 k_R = Verstärkungsfaktor durch äußere Beschaltung des OP in Ω u_A = Ausgangsspannung in V i_E = Eingangsstrom in A R_G = Rückkopplungs-Widerstand in Ω R_i' = Ausgangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω R_E' = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω (ideal = ∞)Dimensionierung: $R_G \gg R_i'$; $R_G \ll R_E'$ Aus- und Eingangswiderstand des beschalteten idealen OP:

$$R_i = 0$$

$$R_E = 0$$

Besonderheiten:Da der + Eingang des OP auf Masse geschaltet ist und $R_E = 0$ spricht man von „virtueller Masse“ am – Eingang des OPESB des beschalteten OP:Der **Ausgang** des beschalteten OP stellt eine **Konstantspannungsquelle** dar.

i / i – OP-Verstärker, invertierend:

idealer Verstärkungsfaktor:

$$k_i = \frac{i_A}{i_E}$$

$$i_E = \frac{i_A}{k_i}$$

$$i_A = k_i \cdot i_E$$

$$i_A = - \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot i_E$$

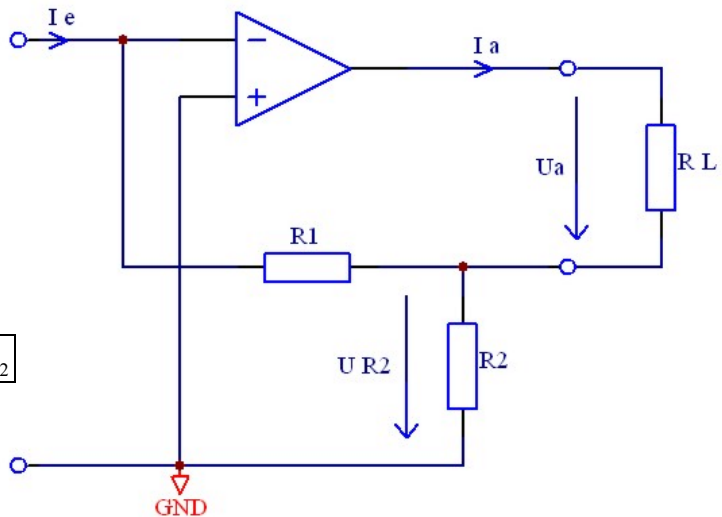
$$u_{R2} = (i_A - i_E) \cdot R_2$$

$$i_E = \frac{i_A}{- \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)}$$

$$k_i = - \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) = - \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$R_2 = - \left(\frac{R_1}{(k_i + 1)} \right)$$

$$R_1 = - \left((k_i + 1) \cdot R_2 \right)$$



k_i = Verstärkungsfaktor durch äußere Beschaltung des OP. **Ohne Einheit !**

i_A = Ausgangsstrom in A

i_E = Eingangsstrom in A

u_{R2} = Spannung am Widerstand R2 in V

R_1 = Rückkopplungs-Widerstand in Ω

R_2 = Widerstand in Ω

realer Verstärkungsfaktor:

$$k_i = - \frac{R_1 + R_2}{R_2 + \frac{1}{k'} \cdot (R_L + R_i')}$$

k' = Empfindlichkeit (innere Verstärkung) des OP. **Ohne Einheit !**

R_i' = Ausgangswiderstand des unbeschalteten OP in Ω

R_L = Lastwiderstand in Ω

Dimensionierung:

$$R_1 \ll R_{E'} ; R_2 \ll R_{E'}$$

Aus- und Eingangswiderstand des beschalteten idealen OP:

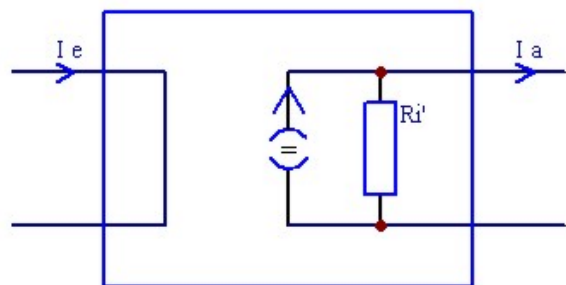
$$R_i = \infty ; R_E = 0$$

Besonderheiten:

Da der + Eingang des OP auf Masse geschaltet ist und $R_E = 0$ spricht man von „virtueller Masse“ am – Eingang des OP

ESB des beschalteten OP:

Der **Ausgang** des beschalteten OP stellt eine **Konstantstromquelle** dar.

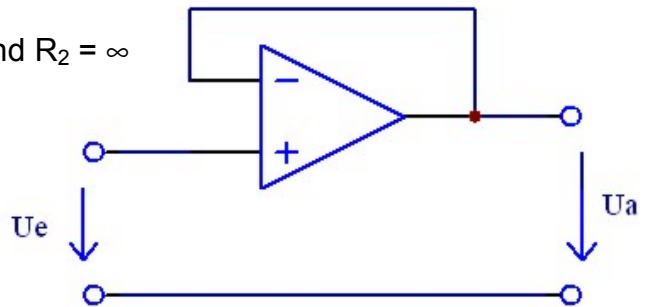


Impedanzwandler:

Grundsaltung: u/u-Verstärker mit $R_1 = 0$ und $R_2 = \infty$

Berechnungen:

$$k = 1 \quad \frac{u_A}{u_E} = 1 \quad u_A = u_E$$



k = Verstärkungsfaktor. **Ohne Einheit !!**

u_E = Eingangsspannung in V

u_A = Ausgangsspannung in V

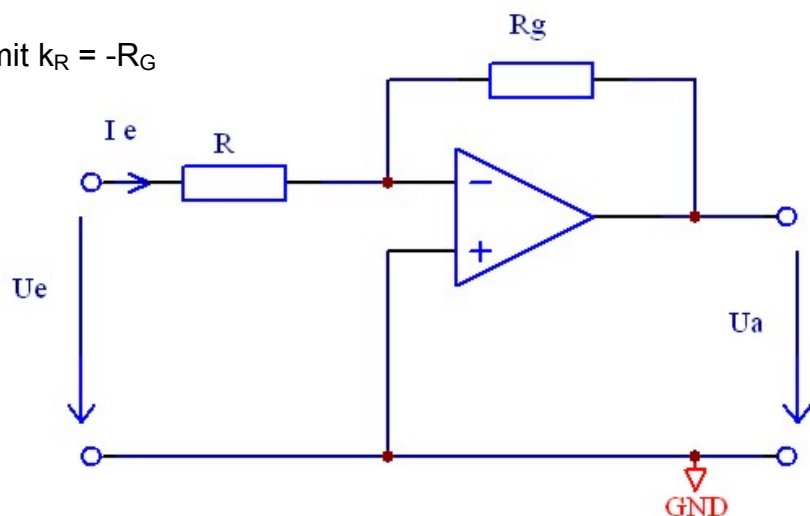
Invertierer:

Grundsaltung: i/u-Verstärker mit $k_R = -R_G$

Berechnungen:

$$k = \frac{u_A}{u_E} = -\frac{R_G}{R} \quad \frac{u_A}{-R_G} = \frac{u_E}{R}$$

$$u_A = -\frac{R_g}{R} \cdot u_E \quad u_E = \frac{u_A \cdot R}{-R_g}$$



Bei $R = R_G$ gilt:

$$u_A = -u_E$$

k = Verstärkungsfaktor. **Ohne Einheit !**

u_E = Eingangsspannung in V

u_A = Ausgangsspannung in V

R_G = Rückkopplungswiderstand in Ω

R = Widerstand in Ω

Addierer:

Grundschialtung: i/u-Verstärker mit $k_R = -R_G$

Berechnungen:

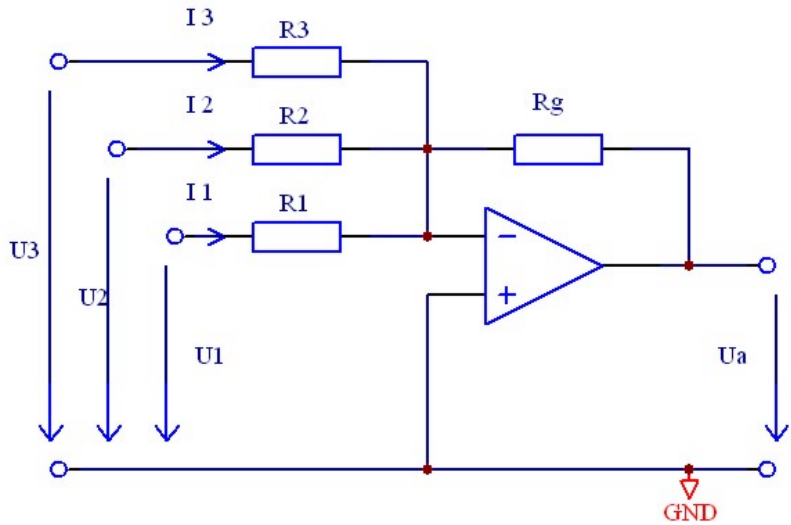
$$k = -R_G$$

$$u_A = -\left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} + \dots + \frac{u_X}{R_X}\right) \cdot R_G$$

$$\Rightarrow u_A = -(i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_X) \cdot R_G$$

Mit $R_1 = R_2 = R_3 = R_X = R_G$ gilt:

$$u_A = -(u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_X)$$



k = Verstärkungsfaktor. **Ohne Einheit !**

$u_{1,2,3,X}$ = Eingangsspannungen in V

u_A = Ausgangsspannung in V

$i_{1,2,3,X}$ = Eingangsströme in A

R_G = Rückkopplungswiderstand in Ω

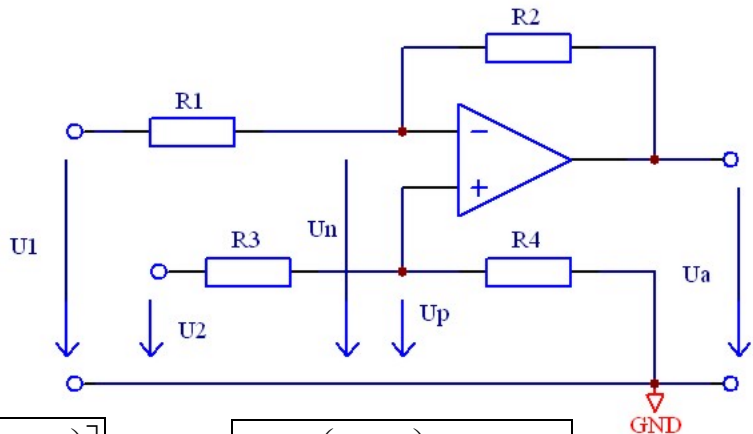
$R_{1,2,3,X}$ = Eingangswiderstände in Ω

Subtrahierer (Differenzverstärker):

Berechnungen:

$$u_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_1$$

$$u_P = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_2$$



$$u_A = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left[\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_1\right) - \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot u_2\right)\right] \Rightarrow u_A = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot (u_N - u_P)$$

Für $R_1 = R_3 = R_2 = R_4$ gilt:

$$u_A = -(u_1 - u_2) \Rightarrow u_A = u_2 - u_1$$

u_1 = Eingangsspannung in V ; u_2 = Eingangsspannung in V

R_2, R_4 = Rückkopplungswiderstände in Ω

R_1, R_3 = Eingangswiderstände in Ω

u_N = Spannung am - Eingang des OP in V

u_P = Spannung am + Eingang des OP in V

u_A = Ausgangsspannung in V

Differenzierer:

Ausgangsspannung abhängig von der Steigungsänderung des Eingangssignales im Zeitabschnitt Δt

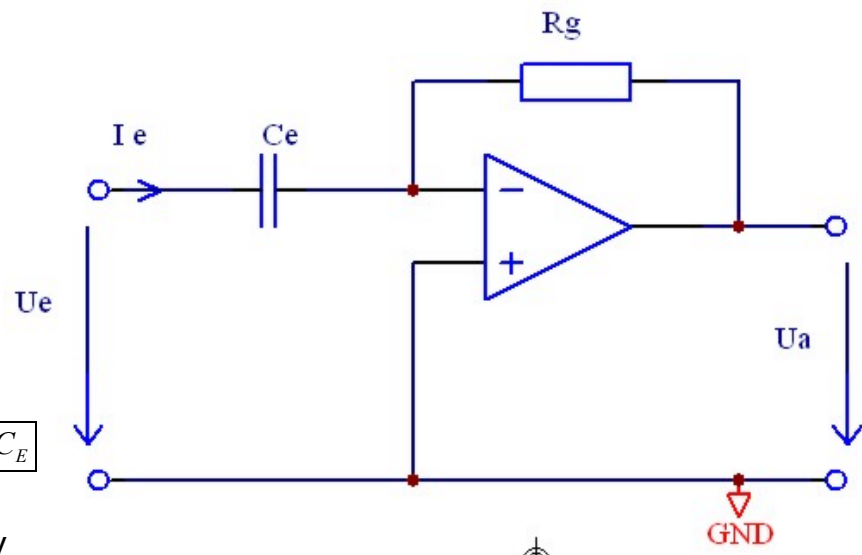
Berechnungen:

$$u_A = - \left(R_G \cdot C_E \cdot \frac{du_E}{dt} \right)$$

$$u_A = - \left(R_G \cdot C_E \cdot \frac{\Delta u_E}{\Delta t} \right)$$

$$u_A = - \left(\tau \cdot \frac{\Delta u_E}{\Delta t} \right)$$

$$\tau = R_G \cdot C_E$$



u_A = Ausgangsspannung in V

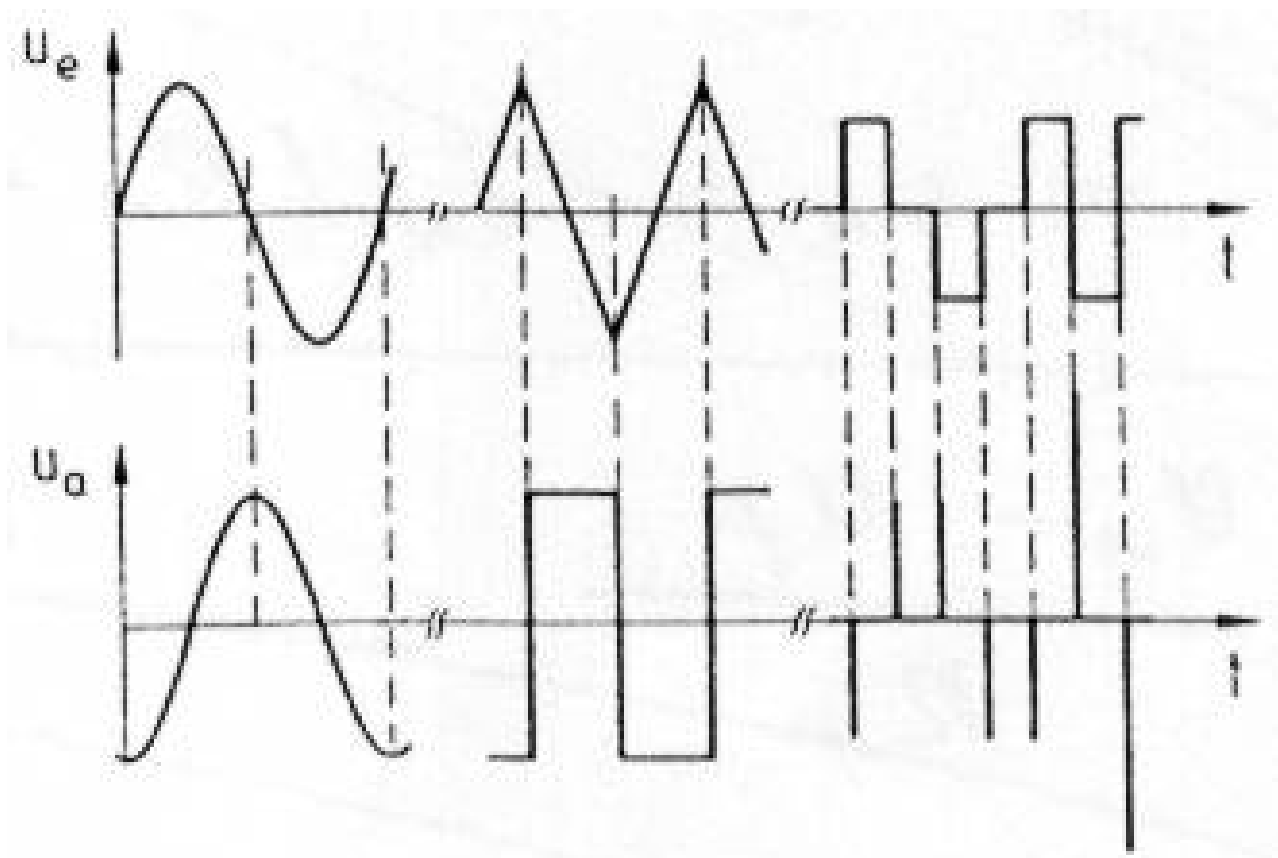
R_G = Rückkopplungswiderstand in Ω

C_E = Eingangskondensator in F

Δu_E = Änderung der Eingangsspannung in der Zeit Δt in V

Δt = Zeitspanne in s

Diagramme:



Integrierer:

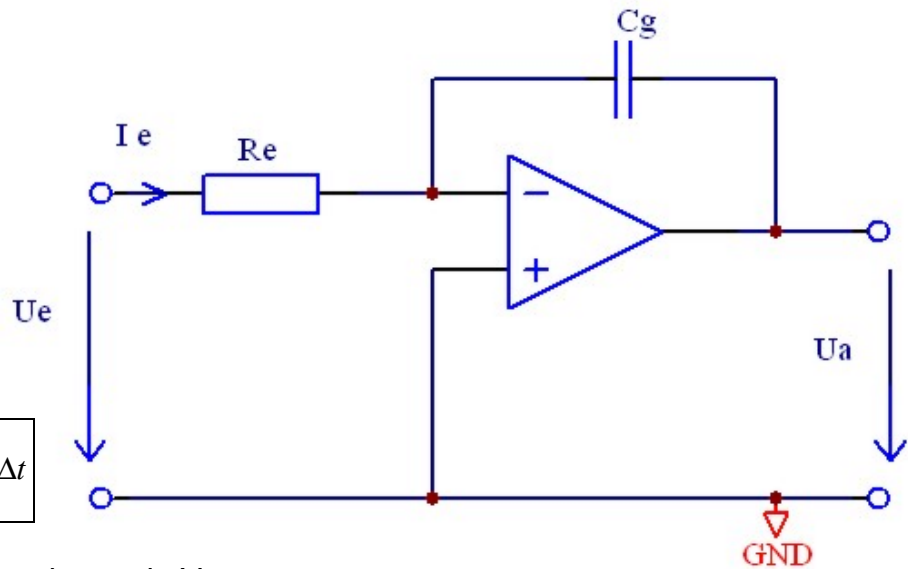
Ausgangsspannungsänderung abhängig von der Fläche des Eingangssignales über die Zeit Δt

Berechnungen:

$$u_A = -\left(\frac{1}{C_G}\right) \cdot \int i_E \cdot dt$$

$$u_A = -\left(\frac{1}{R_E \cdot C_G}\right) \cdot \int u_E \cdot dt$$

$$\Rightarrow \Delta u_A = -\left(\frac{1}{R_E \cdot C_G}\right) \cdot u_E \cdot \Delta t$$



- Δu_A = Ausgangsspannungsänderung in V
- C_G = Rückkopplungskondensator in F
- R_E = Eingangswiderstand in Ω
- u_E = Eingangsspannung in V
- Δt = Zeitspanne in s

Diagramme:

