

**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
Impedanzwandler	Grundschaltung und Berechnung	2-8
Invertierer	Grundschaltung und Berechnung	2-8
Addierer	Grundschaltung 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):**

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

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

$$U_A = U_E \bullet v_U$$

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

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

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

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

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

**Für Leistungsgrößen (z.B. P, W):**

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

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

$$P_A = P_E \bullet v_P$$

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

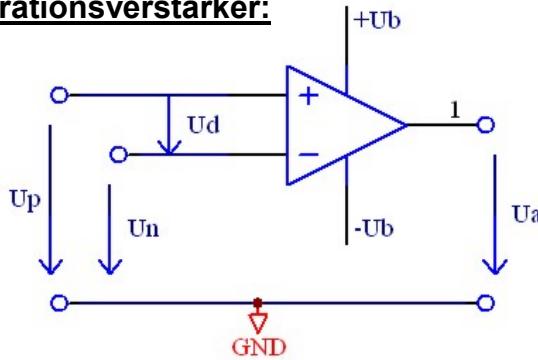
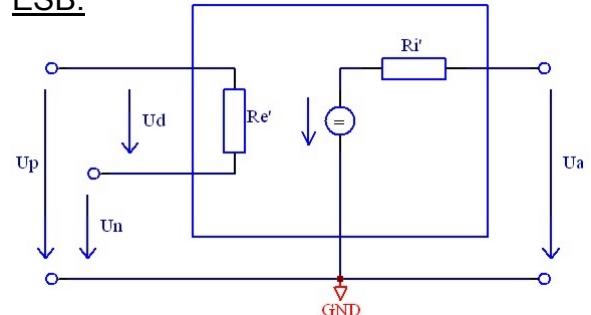
$$U_A = U_E \bullet 10^{\frac{(a_P)}{10dB}}$$

$$U_E = \frac{U_A}{10^{\frac{(a_P)}{10dB}}}$$

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

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

 **$v_U$  = 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

$$u_{A\max} = \pm U_B - 3V$$

$u_{A\max}$  = 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:

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

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

$$u_A = k_U \cdot u_E$$

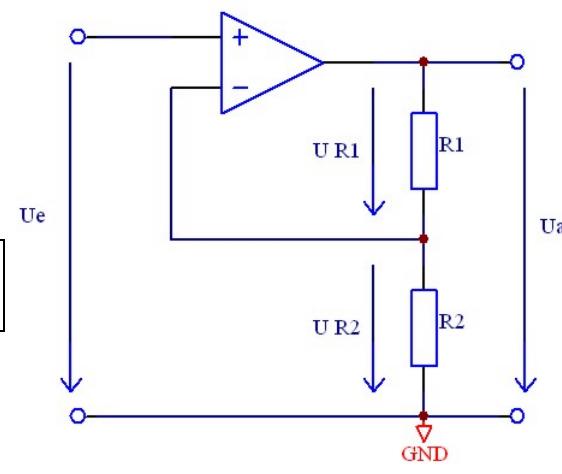
$$k_U = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

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

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

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

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



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

$u_A$  = Ausgangsspannung in V

$u_E$  = Eingangsspannung in V

$R_1$  = Rückkopplungs-Widerstand in  $\Omega$

$R_2$  = Widerstand in  $\Omega$

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  $\Omega$

$R_L$  = Lastwiderstand in  $\Omega$

Dimensionierung:

$$(R_1 + R_2) \gg R'_i ; (R_1 + R_2) \gg R_L$$

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

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

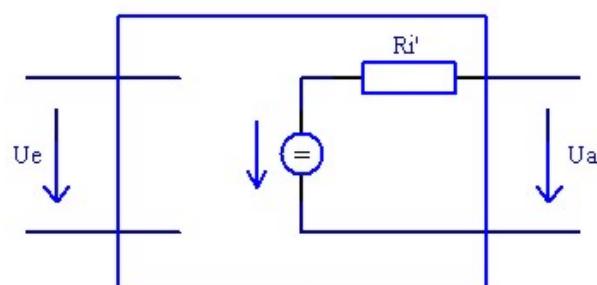
$R_i$  = Ausgangswiderstand des beschalteten OP in  $\Omega$  (ideal = 0)

$R_E$  = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

$R_E$  = Eingangswiderstand des beschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

ESB des beschalteten OP:

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



**u / i – OP-Verstärker, nichtinvertierend:**idealer Verstärkungsfaktor:

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

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

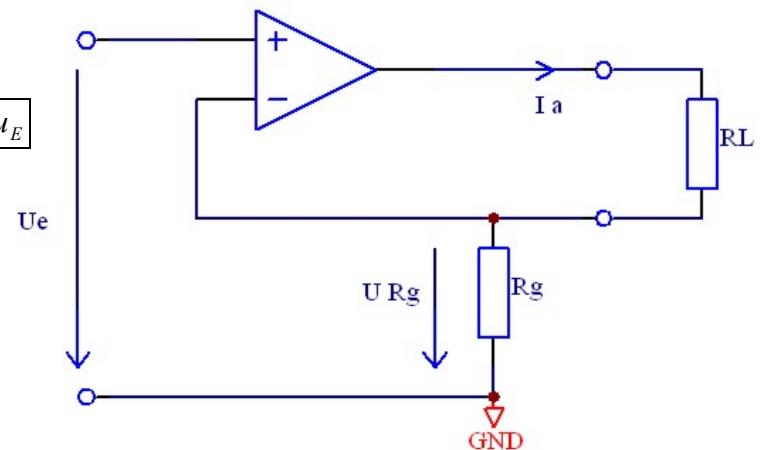
$$i_A = k_G \cdot u_E$$

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

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

$$u_E = i_A \cdot R_G$$

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



$k_G$  = 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  $\Omega$

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  $\Omega$

$R_L$  = Lastwiderstand in  $\Omega$

Dimensionierung:

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

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

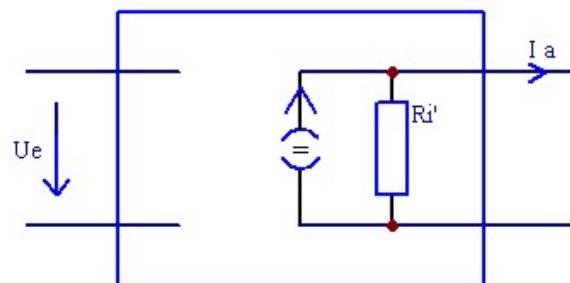
$R_i$  = Ausgangswiderstand des beschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

$R_E'$  = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

$R_E$  = Eingangswiderstand des beschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

ESB des beschalteten OP:

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



i / u – OP-Verstärker, invertierend:idealer Verstärkungsfaktor:

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

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

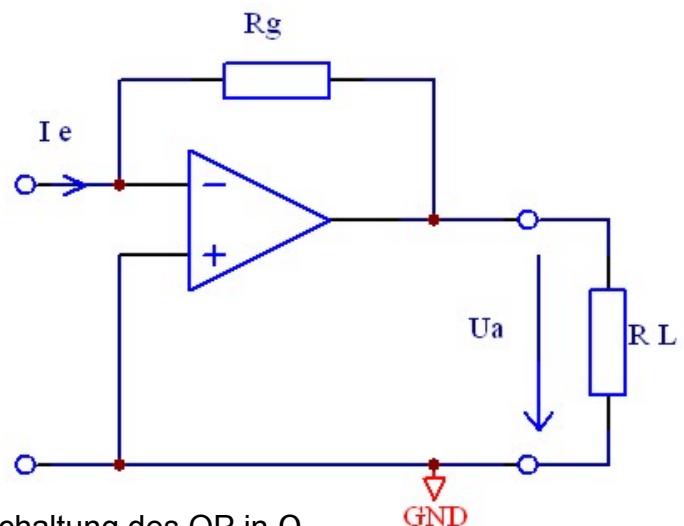
$$u_A = k_R \cdot i_E$$

$$k_R = -R_G$$

$$R_G = -k_R$$

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

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



$k_R$  = Verstärkungsfaktor durch äußere Beschaltung des OP in  $\Omega$

$u_A$  = Ausgangsspannung in V

$i_E$  = Eingangsstrom in A

$R_G$  = Rückkopplungs-Widerstand in  $\Omega$

$R_i'$  = Ausgangswiderstand des unbeschalteten OP in  $\Omega$

$R_E'$  = Eingangswiderstand des unbeschalteten OP in  $\Omega$  (ideal =  $\infty$ )

Dimensionierung:

$$R_G \gg R_i' ; R_G \ll R_E'$$

Aus- und Eingangswiderstand des beschalteten idealen OP:

$$R_i = 0$$

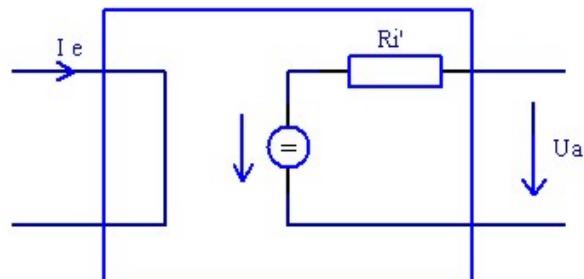
$$R_E = 0$$

Besonderheiten:

Da der + Eingang des OP auf Masse geschalten 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 **Konstantspannungsquelle** dar.

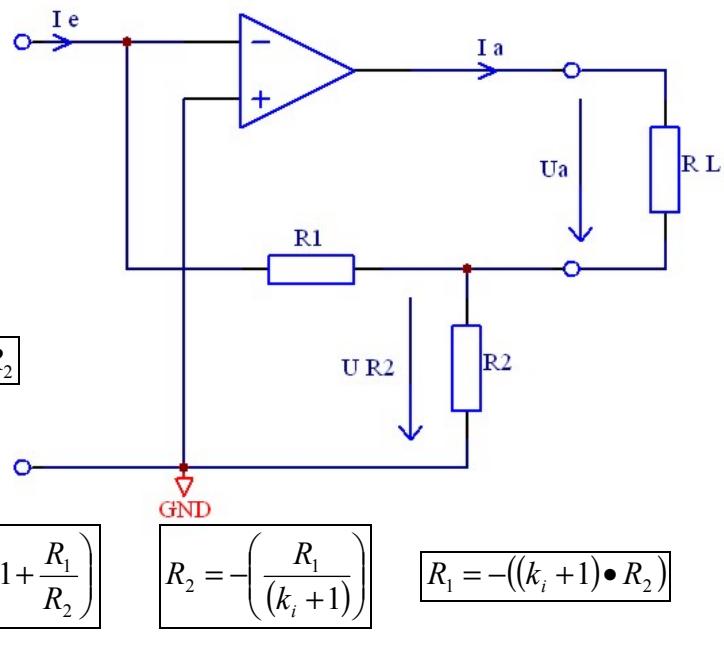


i / i - OP-Verstärker, invertierend:idealer Verstärkungsfaktor:

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

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

$$i_A = k_i \cdot i_E$$



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

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

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

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

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

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

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

$i_A$  = Ausgangsstrom in A

$i_E$  = Eingangsstrom in A

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

$R_1$  = Rückkopplungs-Widerstand in  $\Omega$

$R_2$  = Widerstand in  $\Omega$

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  $\Omega$

$R_L$  = Lastwiderstand in  $\Omega$

Dimensionierung:

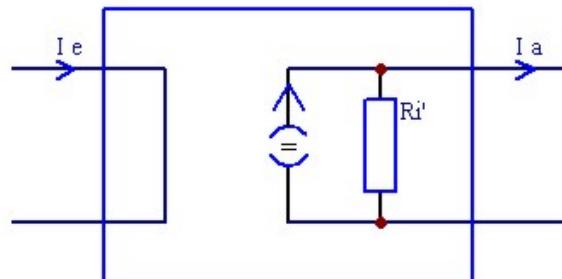
$R_1 \ll R_E'$ ;  $R_2 \ll R_E'$

Aus- und Eingangswiderstand des beschalteten idealen OP:

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

Besonderheiten:

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

ESB des beschalteten OP:

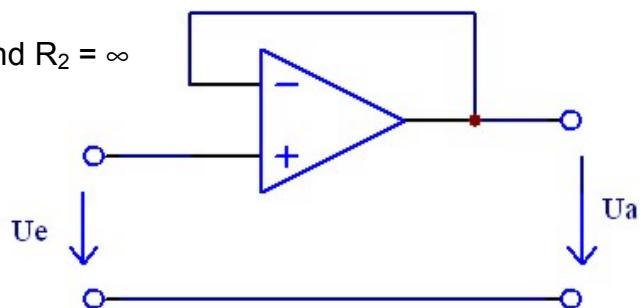
Der **Ausgang** des beschalteten OP stellt eine **Konstantstromquelle** dar.

**Impedanzwandler:**Grundschaltung: u/u-Verstärker mit  $R_1 = 0$  und  $R_2 = \infty$ Berechnungen:

$$k = 1$$

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

$$u_A = u_E$$

 $k$  = Verstärkungsfaktor. **Ohne Einheit !!** $u_E$  = Eingangsspannung in V $u_A$  = Ausgangsspannung in V**Invertierer:**Grundschaltung: i/u-Verstärker mit  $k_R = -R_G$ Berechnungen:

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

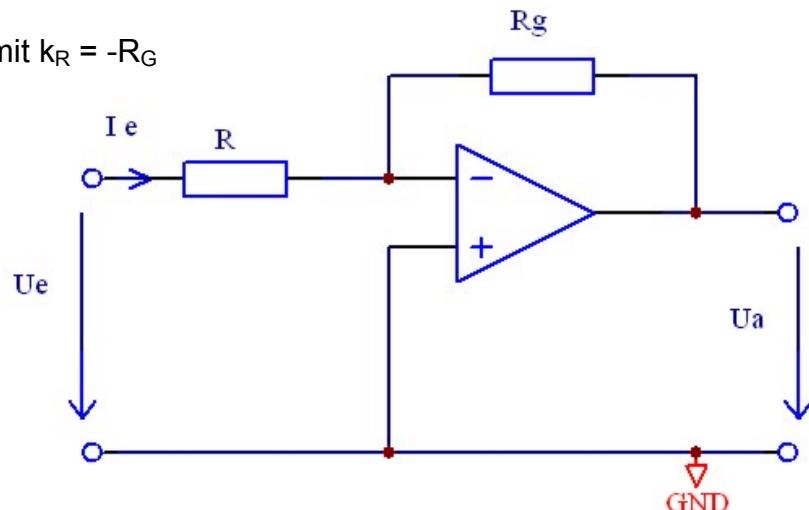
$$\frac{u_A}{-R_G} = \frac{u_E}{R}$$

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

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

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  $\Omega$  $R$  = Widerstand in  $\Omega$

**Addierer:**Grundschaltung: i/u-Verstärker mit  $k_R = -R_G$ Berechnungen:

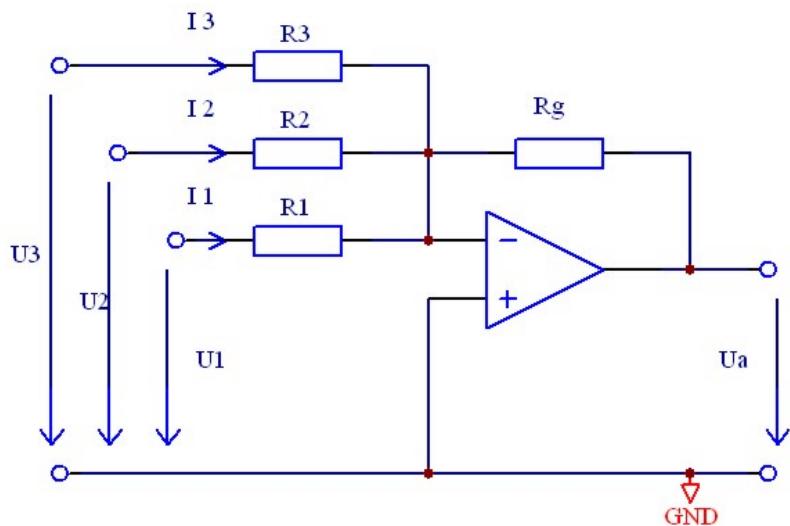
$$k = -R_G$$

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

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

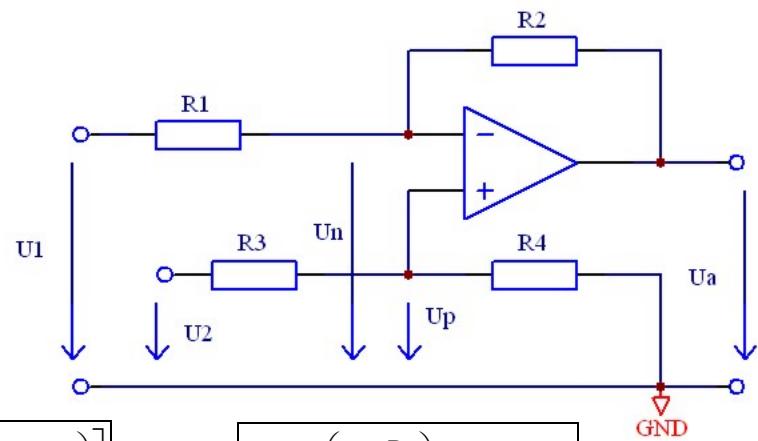
Mit  $R_1 = R_2 = R_3 = R_X = R_G$  gilt:

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

 **$k$  = 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  $\Omega$  $R_{1,2,3,X}$  = Eingangswiderstände in  $\Omega$ **Subtrahierer (Differenzverstärker):**Berechnungen:

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

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

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  $\Omega$  $R_1, R_3$  = Eingangswiderstände in  $\Omega$  $u_N$  = Spannung am - Eingang des OP in V $u_P$  = Spannung am + Eingang des OP in V $u_A$  = Ausgangsspannung in V

**Differenzierer:**

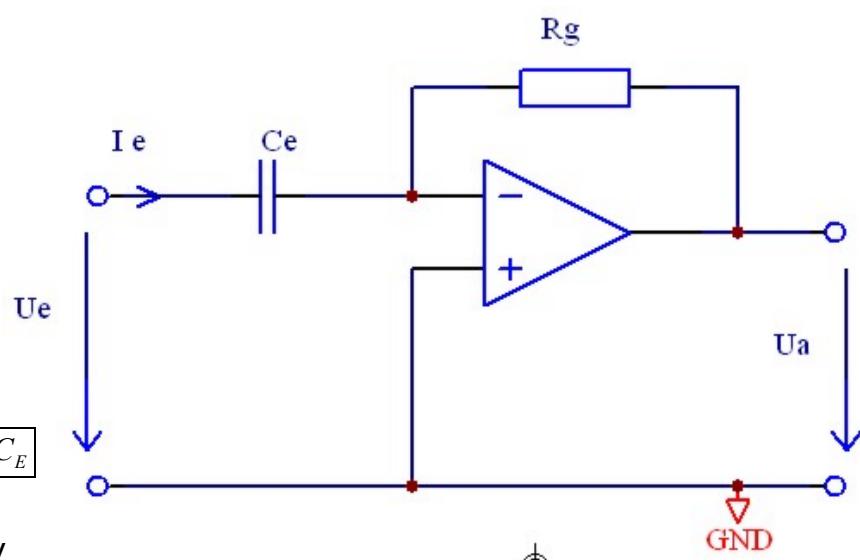
Ausgangsspannung abhängig von der Steigungsänderung des Eingangssignales im Zeitabschnitt  $\Delta t$

**Berechnungen:**

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

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

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



$u_A$  = Ausgangsspannung in V

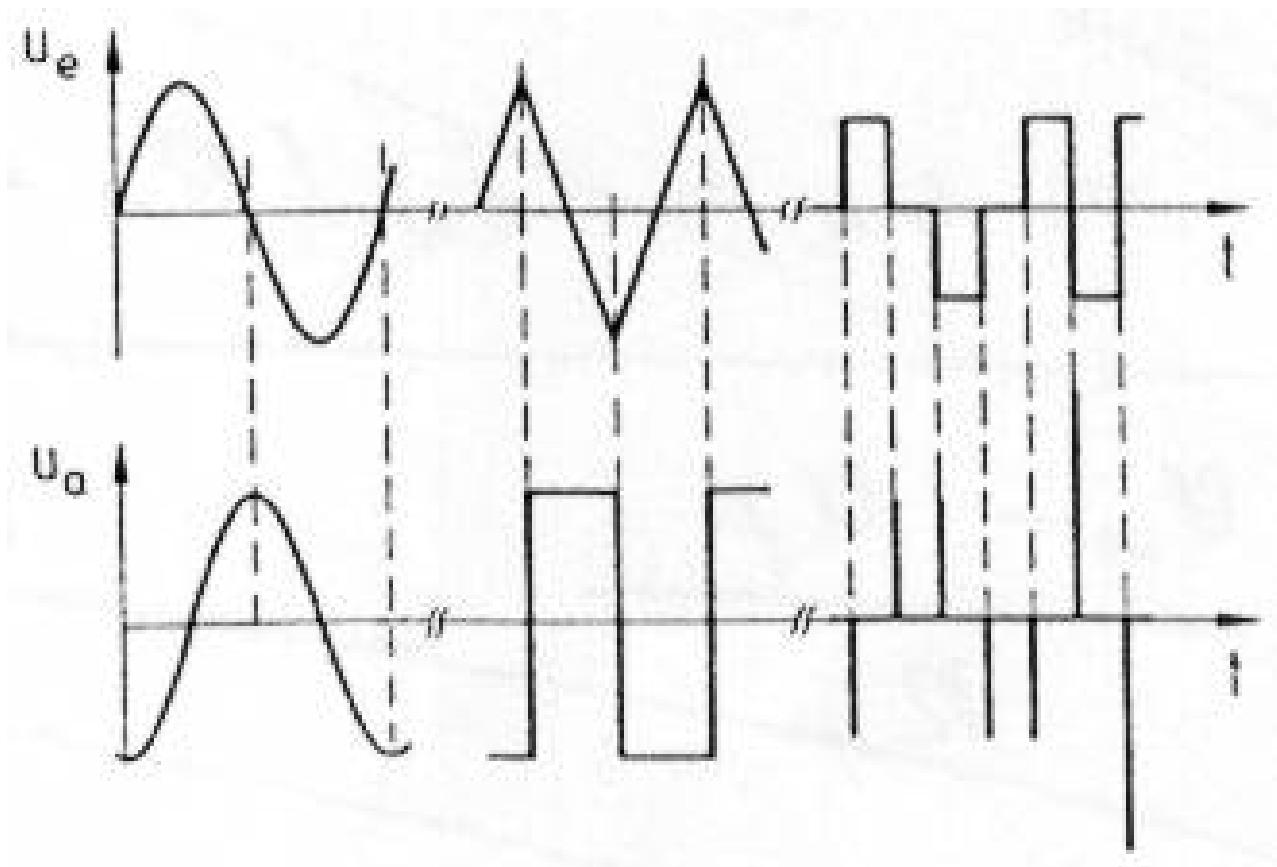
$R_G$  = Rückkopplungswiderstand in  $\Omega$

$C_E$  = Eingangskondensator in F

$\Delta u_E$  = Änderung der Eingangsspannung in der Zeit  $\Delta t$  in V

$\Delta t$  = Zeitspanne in s

Diagramme:



Integrierer:

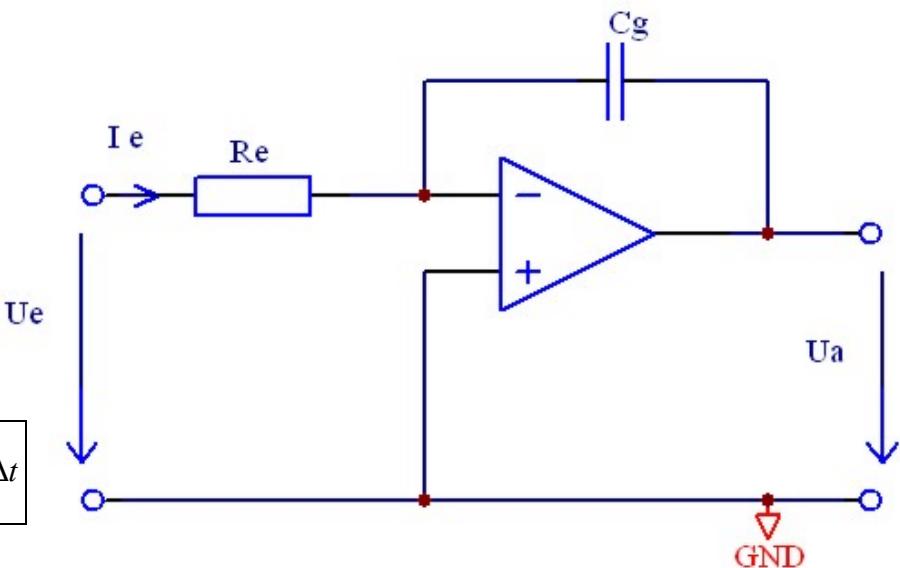
Ausgangsspannungsänderung abhängig von der Fläche des Eingangssignales über die Zeit  $\Delta t$

Berechnungen:

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

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

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



$\Delta u_A$  = Ausgangsspannungänderung in V

$C_G$  = Rückkopplungskondensator in F

$R_E$  = Eingangswiderstand in  $\Omega$

$u_E$  = Eingangsspannung in V

$\Delta t$  = Zeitspanne in s

Diagramme: