

# ELEKTRONIK

Peter Willi's  
Formelbuch

4. November 2008

A Source to „Know How“

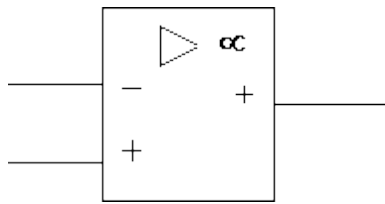
# INHALTSVERZEICHNIS

---

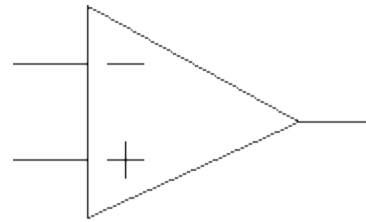
<b>OPERATIONSVERSTÄRKER .....</b>	<b>3</b>
Komparator.....	4
Impedanzwandler / Spannungsfolger.....	4
Summierverstärker / Invertierender Addierer .....	5
Differenzverstärker / Subtrahierverstärker .....	5
Invertierender Verstärker .....	6
Nicht invertierender Verstärker .....	7
Invertierender Schmitt-Trigger.....	8
Nicht invertierender Schmitt-Trigger.....	9
Integrierer.....	10
Differenzierer .....	11
<b>AKTIVE FILTER .....</b>	<b>12</b>
Aktiver Tiefpass.....	12
Aktiver Hochpass .....	13

# OPERATIONSVERSTÄRKER

Aktuelles Schaltzeichen:



Veraltetes Schaltzeichen:



Charakteristische Eigenschaft	Idealer Verstärker	Realer Verstärker
Leerlaufverstärkung $V_0 = \frac{U_A}{U_E}$	$V_0 = \infty$	$V_0 = 20 \cdot 10^3 \dots 100 \cdot 10^3$
Eingangswiderstand $r_e = \frac{U_E}{I_E}$	$r_e = \infty \Omega$	$r_e = 10^6 \Omega \dots 10^{14} \Omega$
Ausgangswiderstand $r_a = \frac{U_A}{I_A}$	$r_a = 0 \Omega$	$r_a = 30 \Omega \dots 100 \Omega$
Temperatureinfluss $\Delta U = f(T)$	-	$-50^\circ \dots +75^\circ$ vernachl. gering
Übertragungsbandbreite	$B = \infty \text{Hz}$	Von V abhängig, $10^3 \dots 10^7 \text{Hz}$
Aussteuerungsbereich $U_A = f(U_E)$	$-\infty \dots +\infty$	$-U_B \dots +U_B$

Leerlaufverstärkung  $V_0$ :

$$R_L = \infty \Omega; I_A = 0 \text{ mA} \Rightarrow U_{A0} = V_0 \cdot U_D$$

Gleichtaktverstärkung  $V_{GL}$  oder  $V_{CM}$ :

*Im Idealfall wäre  $U_{AGL} = 0V$ , real entstehen aber Spannungsdifferenzen welche zu Fehlerspannungen am Ausgang führen.*

$$V_{GL} = \frac{U_{AGL}}{U_{EGL}}; V_{GLdB} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{U_{AGL}}{U_{EGL}}\right)$$

Ideal:  $V_{GL} = 0$

Real:  $V_{GL} = < 10$

Gleichtaktunterdrückung (Güte)  $G$ :

$$G = V_{CMMR} = \frac{V_0}{V_{GL}}; G_{dB} = V_{CMMRdB} = V_{0dB} - V_{GLdB}$$

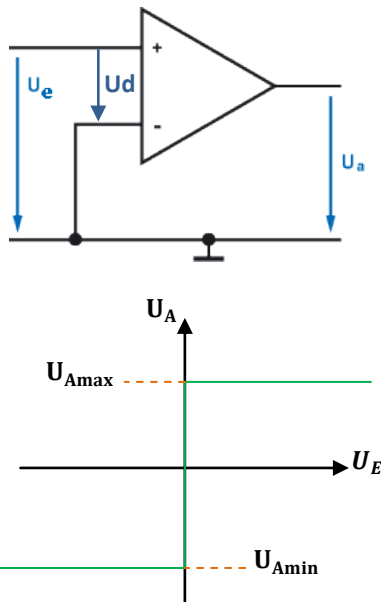
Ein- und Ausgangswiderstand:

$$r_e = \frac{U_E}{I_E}; r_a = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$$

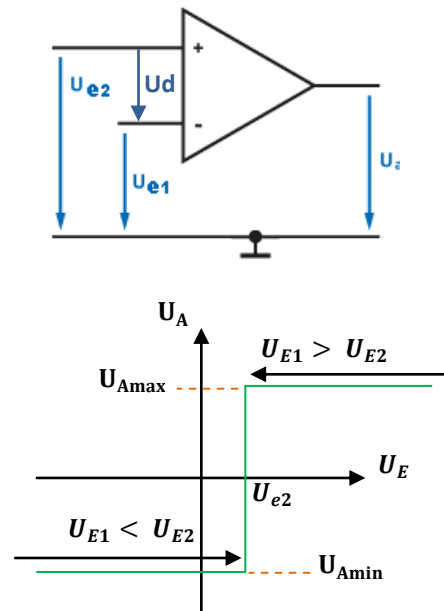
## Komparator

Da der Verstärker nicht gegengekoppelt ist, ist  $V_0$  voll wirksam.  $\rightarrow U_a$  Anschlag  
Der Umschaltvorgang erfolgt bei einer sehr kleinen  $U_d \approx 0$  Spannung.

**Nullkomparator**



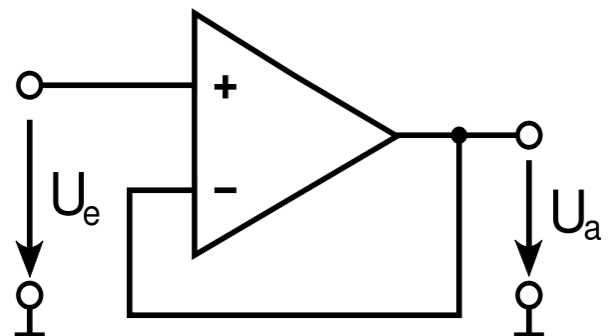
**Differenzkomparator**



Damit beim Schalten keine Schwingungen entstehen, ist oft eine Schalthysterese erwünscht. Dann fallen Ein-/Ausschaltpegel nicht mehr zusammen.  $\rightarrow$  Komparatoren werden mit Mitkopplung erweitert.

## Impedanzwandler / Spannungsfolger

Die Charakteristik eines Spannungsfolgers ist ein **grosser Eingangswiderstand** und ein **kleiner Ausgangswiderstand**

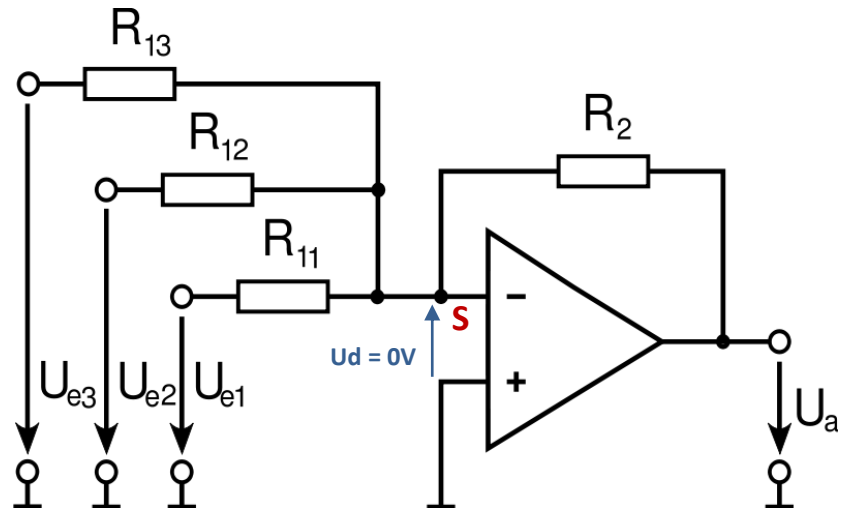


$$U_A = U_E$$

$$V = 1$$

## Summierverstärker / Invertierender Addierer

Der Summierverstärker ist ein invertierender Verstärker mit mehreren Eingängen, welche zueinander addiert werden.



$$U_A = -R_2 \left\{ \frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} + \frac{U_{E3}}{R_{13}} \right\}$$

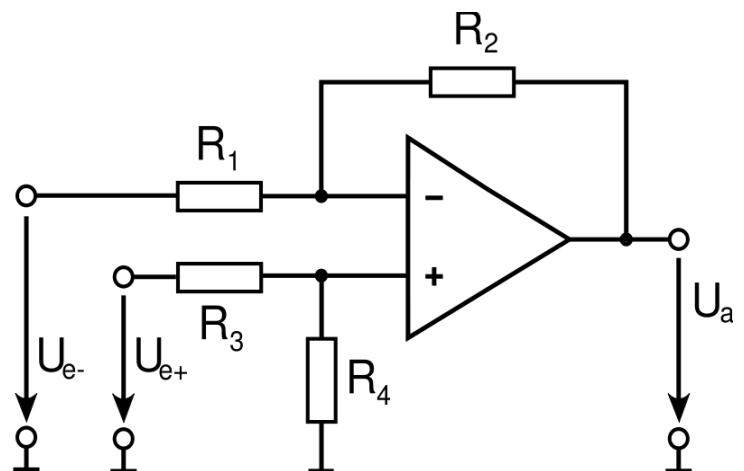
**S:** Virtuelle Masse/Null

wenn  $R_{11} = R_{12} = R_{13} \dots$ :

$$U_A = \frac{-R_2}{R_{e ges}} \{U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}\}$$

## Differenzverstärker / Subtrahierverstärker

Der Differenzverstärker bildet die Differenz zweier Eingänge. Meist als Verstärkung kleiner Messsignale und Eingangsstufe.



$$U_A = U_{E+} \cdot V_2 - U_{E-} \cdot V_1$$

$$V_1 = \frac{R_2}{R_1}$$

$U_{E+}$ : Spannung am nicht inv.

$$V_2 = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}}$$

$U_{E-}$ : Spannung am inv. Eingang

## Invertierender Verstärker

Der Eingangswiderstand ist sehr hochohmig.  
Somit ist der Eingangsstrom = 0mA  
und die Differenzspannung 0V.  
->Ausgangsspannung invertiert zur Eingangsspannung.

**DC:**

$$V = \frac{-U_A}{U_E} = \frac{-R_2}{R_1}$$

**AC:**

$$V = \frac{R_2}{R_1} ; \varphi = 180^\circ$$

$$U_A = -U_E \cdot \frac{R_2}{R_1} = -\frac{U_E}{R_1} \cdot R_2$$

$$U_A = -U_{R2}$$

$$U_{R1} = U_E$$

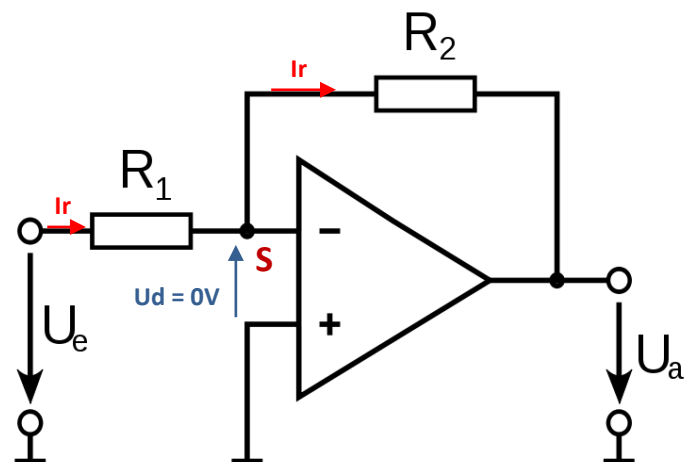
$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_E}{R_1}$$

$$U_{R2} = I_{R2} \cdot R_2$$

$$r_e \approx R_1 = R_1 + \frac{R_2}{V_0}$$

$$r'_a = \frac{r_a \cdot V}{V_0}$$

$$f_g = \frac{f_D}{V}$$



**S:** Virtuelle Masse/Null

$r'_e$ : Eingangswiderstand

$r'_a$ : Ausgangswiderstand

$f_g$ : Grenzfrequenz, (-3dB)

$f_D$ : Durchtrittsfrq. ( $V = 1,0dB$ )

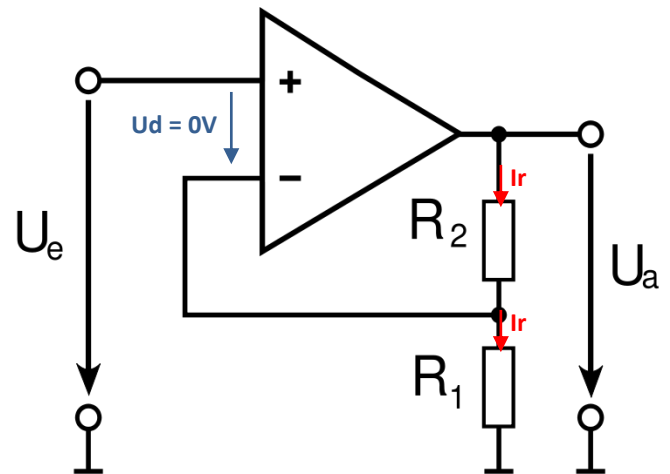
## Nicht invertierender Verstärker

Verstärkung immer grösser

$$\text{als 1: } V = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Sonderfall:

$$R_2 = 0\Omega; R_1 = \infty\Omega$$



$$U_A = U_E \left\{ \frac{R_2}{R_1} + 1 \right\}$$

$$U_E = U_{R_1}$$

$$V = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$I_{R_1} = I_{R_2} = \frac{U_E}{R_1}$$

$$r'_e = \frac{V_0 \cdot R_E}{V}$$

$$r'_a = \frac{r_a \cdot V}{V_0}$$

$R_2$ : Gegenkopplungswiderstand

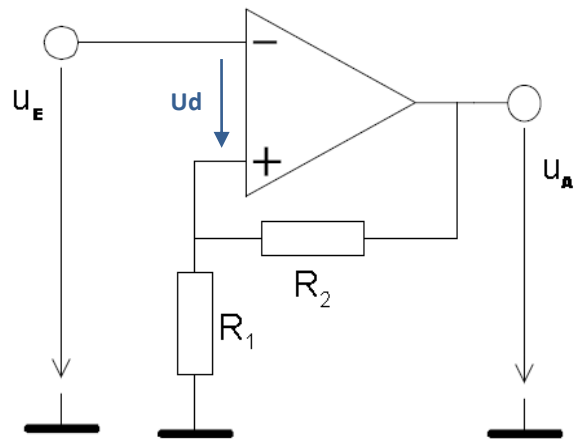
$R_1$ : Eingangsquerswiderstand

$r'_e$ : Eingangswiderstand

$r'_a$ : Ausgangswiderstand

## Invertierender Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger sind Komparatorschaltungen mit **definierter** Hysterese, d.h. die Ein- und Ausschaltpunkte fallen **nicht** zusammen.



$$U_{E_{ein}} = U_{A_{min}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

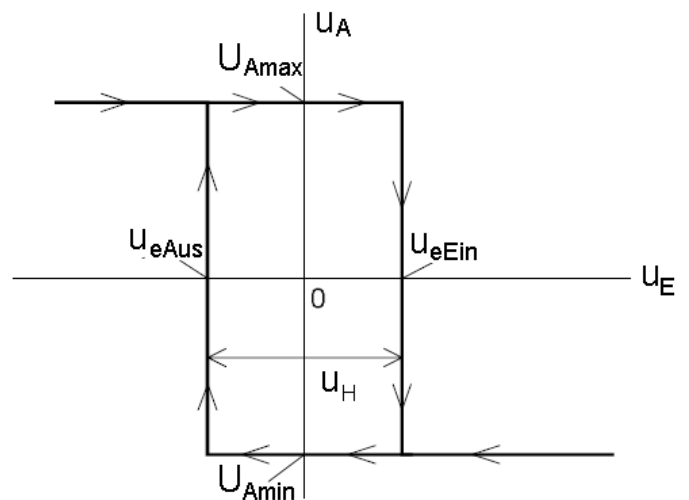
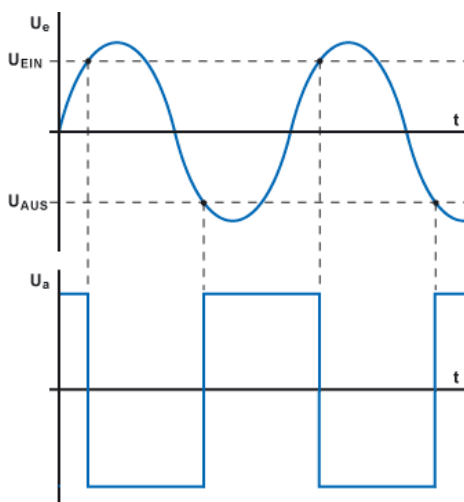
$$U_{E_{aus}} = U_{A_{max}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \{ U_{A_{max}} - U_{A_{min}} \}$$

$$= U_{E_{aus}} - U_{E_{min}}$$

$$U_{R_1} = U_{A_{max}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_E = U_{R_1}$$



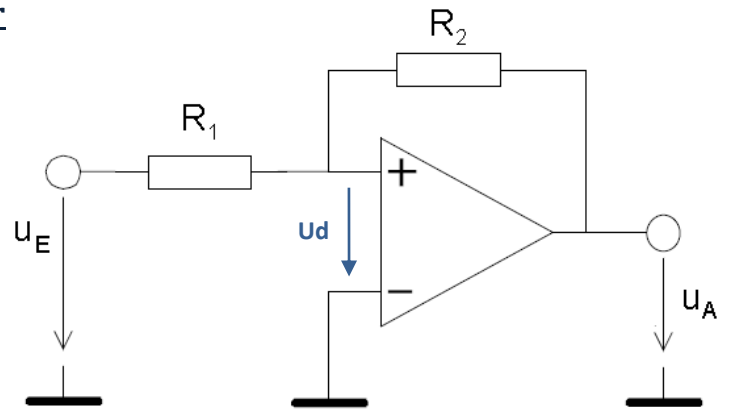
$U_{E_{ein}}$  : Einschaltspiegel, neg. Flk

$U_{E_{aus}}$  : Ausschaltspiegel, pos. Flk

$U_H$  : Hysteresespannung

## Nicht invertierender Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger sind Komparatorschaltungen mit **definierter** Hysterese, d.h. die Ein- und Ausschaltunkte fallen **nicht** zusammen.



$$U_{E_{ein}} = -U_{A_{min}} \frac{R_1}{R_2}$$

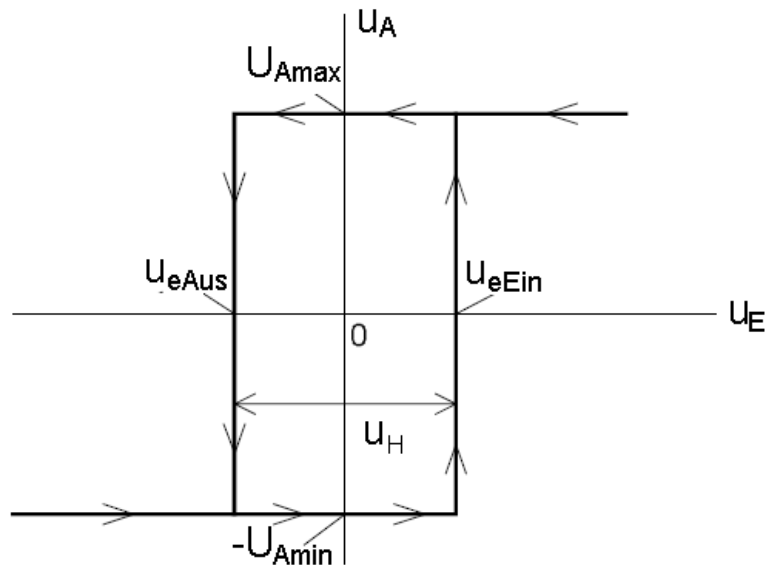
$$U_{E_{aus}} = -U_{A_{max}} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_H = \frac{R_1}{R_2} \{ U_{A_{max}} - U_{A_{min}} \}$$

$$= U_{E_{aus}} - U_{E_{min}}$$

$$U_D = U_{A_{max}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

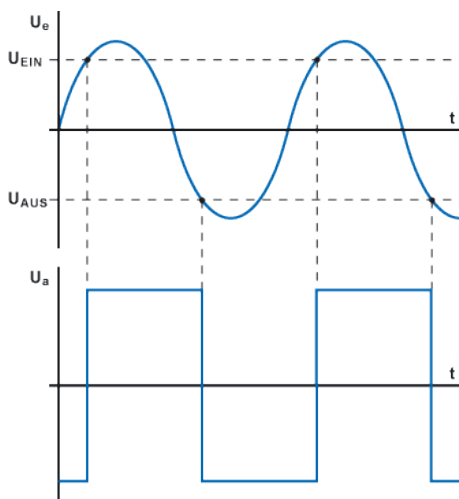
$$U_E = U_{R_1}$$



$U_{E_{ein}}$  : Einschaltpegel, pos. Flk

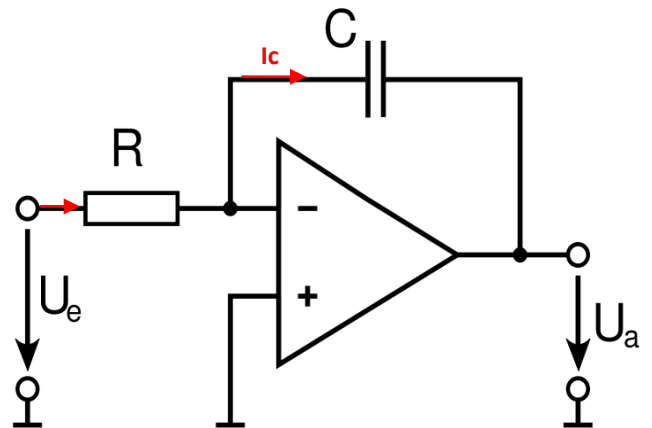
$U_{E_{aus}}$  : Ausschaltpegel, neg. Flk

$U_H$  : Hysteresespannung



## Integrierer

Die Ausgangsspannungsänderung ist proportional zur Spannungs-Zeit Fläche des Eing. Signals. Ein Integrator berechnet die Fläche eines Kurvenverlaufs.



**Sinusförmige Ansteuerung:**

$$V = \frac{-U_A}{U_E} = \frac{-X_C}{R}$$

$$V = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R}$$

$$f_D = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R}$$

$V$ : Verstärkungsfaktor

$f_D$ : Durchtrittsfreq. ( $V = 1, 0dB$ )

⇒ Der Integrator hat „Tiefpass“ Charakteristik

**Rechteckförmige Ansteuerung:**

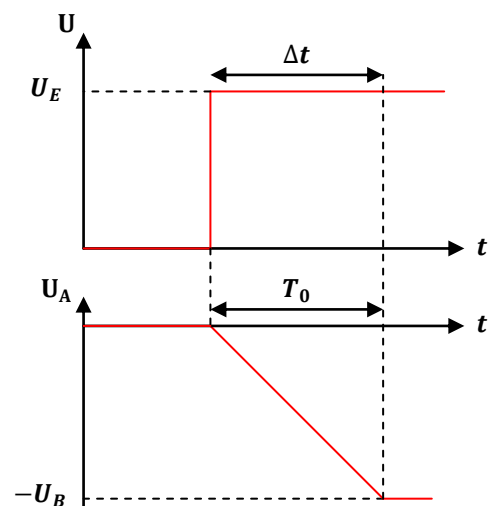
$$\Delta U_A = - \frac{U_e \cdot \Delta t}{R \cdot C}$$

$$T_0 = R \cdot C$$

$$I_R = \frac{U_C}{R} = I_C$$

$$I_C \cdot \Delta t = \Delta U_C \cdot C$$

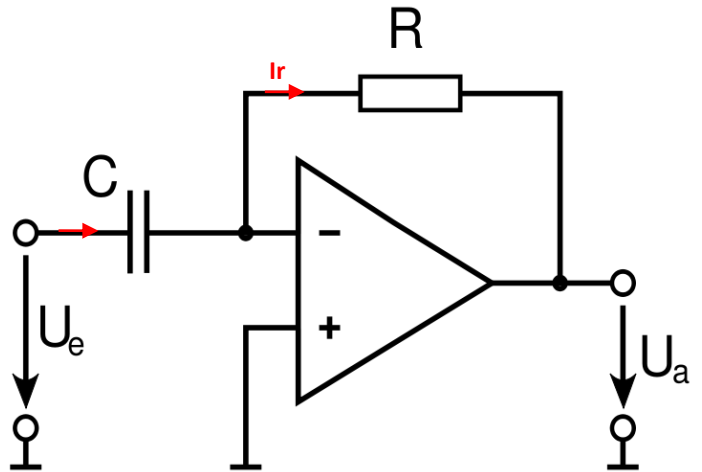
$T_0$ : Zeitkonstante



Da beim Integrator nur eine Ausgangsspannungsänderung berechnet werden kann, ist es wichtig die Anfangsbedingungen zu kennen.

## Differenzierer

Die Ausgangsspannung ist proportional Eingangsspannungs-Änderung. Ein Differenzierer berechnet die Steigung des Eingangssignals.



**Sinusförmige Ansteuerung:**

$$V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R}{-X_C}$$

$V$ : Verstärkungsfaktor

$$V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R$$

$$f_D = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R}$$

$f_D$ : Durchtrittsfreq. ( $V = 1, 0dB$ )

⇒ Der Differenzierer hat „Hochpass“ Charakteristik

**Dreieckförmige Ansteuerung:**

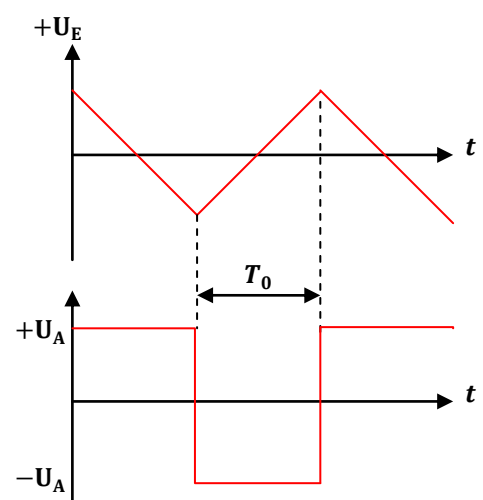
$$U_A = -R \cdot C \frac{\Delta U_E}{\Delta t}$$

$$T_0 = R \cdot C$$

$T_0$ : Zeitkonstante

$$I_C \cdot t = U_C \cdot C$$

$$I_R = \frac{C \cdot U_C}{\Delta t} = I_C$$



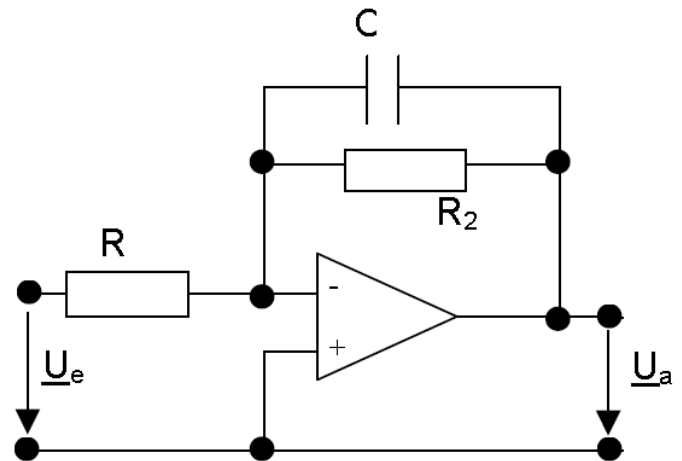
## Aktive Filter

Aktive Filter verwenden Operationsverstärker mit einer frequenzabhängigen Gegenkopplung.

Sie werden eingesetzt, um den Frequenzgang einer Schaltung zu beeinflussen.

### Aktiver Tiefpass

Wenn ein frequenzabhängiges Element zu der Gegenkopplung eines Operationsverstärkers in invertierender Schaltung so eingefügt wird, dass die Gegenkopplung für höhere Frequenzen ansteigt, erhält man einen Tiefpass.



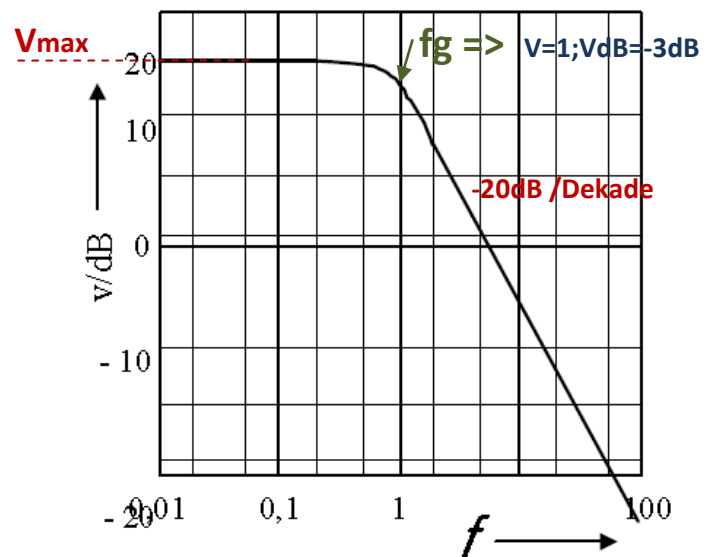
$$\frac{U_C}{U_e} = \frac{X_C}{Z} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

$$\frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R}$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \left( \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R} \right)$$

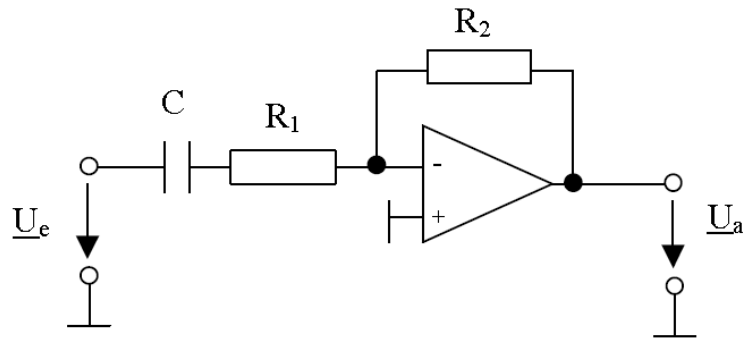
$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C}$$

$$V_{max} = \frac{R_2}{R}$$



## Aktiver Hochpass

Wenn ein frequenzabhängiges Element zu der Gegenkopplung eines Operationsverstärkers in invertierender Schaltung so eingefügt wird, dass die Gegenkopplung für höhere Frequenzen sinkt, erhält man einen Hochpass.



$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C}$$

$$V_{max} = \frac{R}{R_2}$$

$$\frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R}$$

