Aufgabe 12:

12.1. Wenn $U_{GS} = 1{,}5$ V ist, und $u_e = 0V + \hat{u}_e \sin \omega t$ folgt: $U_{e=} = 0$ V

U_a im Arbeitspunkt: $U_a = +U_b - U_{DS,T5} = +3{,}3\ V - 2{,}3\ V = +1\ V$

12.2. Steilheit:

$S = \beta\,(U_{GS} - U_{th}) = 1\ mA / V^2\ (1{,}5\ V - 0{,}5\ V) = 1\ mS$

12.3 Aus den angegebenen Steigungen der Ausgangskennlinien im Arbeitspunkt können die differentiellen Drain-Source Widerstände r_{DS} der Transistoren bestimmt werden

p-Kanal:

$$\left|\frac{\partial \mathrm{I_D}}{\partial \mathrm{U_{DS}}}\right| = \frac{5\mu\mathrm{A}}{1\mathrm{V}} = \frac{1}{\mathrm{r_{DS,p}}} = 5 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\Omega} \quad \rightarrow\ \mathrm{r_{DS,p}} = 200\ \mathrm{k\Omega}$$

n-Kanal:

$$\frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} = \frac{2\mu A}{1V} = \frac{1}{r_{DS,n}} = 2 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\Omega} \quad \rightarrow \quad r_{DS,n} = 500\ k\Omega$$

Definitionen:

Gegentaktverstärkung:

$$A_D = \frac{u_{a2}}{u_{e1}} = \frac{u_{a1}}{u_{e2}} = A_{Drain} \cdot A_{Gate} = \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S} \cdot S \cdot R_D \approx S \cdot R_D|_{S \cdot R_S \gg 1} \approx S \cdot r_{DS,p}$$

Gleichtaktverstärkung:

$$A_G = \frac{u_{a1}}{u_{e1}} = \frac{u_{a2}}{u_{e2}} \approx -\frac{R_D}{2R_S} = -\frac{r_{DS,p}}{2r_{DS,n}}$$

In dieser Aufgabe ist: $u_{e2} = 0V$ und $u_{e1} = u_e$. Damit ergibt sich

Damit werden:

12.4 Gegentaktverstärkung: $A_D \approx S \cdot r_{DS,p} = 1\ mS \cdot 200\ k\Omega = 200$

da $S\,R_S = 200 >> 1$

12.5 Gleichtaktverstärkung: $A_G = -\dfrac{r_{DS,p}}{2 \cdot r_{DS,n}} = -\dfrac{200\ k\Omega}{2 \cdot 500\ k\Omega} = -0{,}2$

12.6 Gleichtaktunterdrückung: $CMRR = \dfrac{|A_D|}{|A_G|} = \dfrac{200}{0{,}2} = 1000$

Aufgabe 13:

13.1 Idealer OP: $r_e \Rightarrow \infty$, $r_a \Rightarrow 0$, $A \Rightarrow \infty$,

13.2 Eingangssignal liegt am invertierenden Eingang an
$\Rightarrow$ invertierender Verstärker

13.3 $U_0 = U_+ = 0\ V$

$$u_a = A \cdot u_e$$

Verstärkung: $$A = -\frac{R_2}{R_1} = -2$$

$$u_a = -2u_e$$

13.4 $U_0 = U_+ = 5\ V$

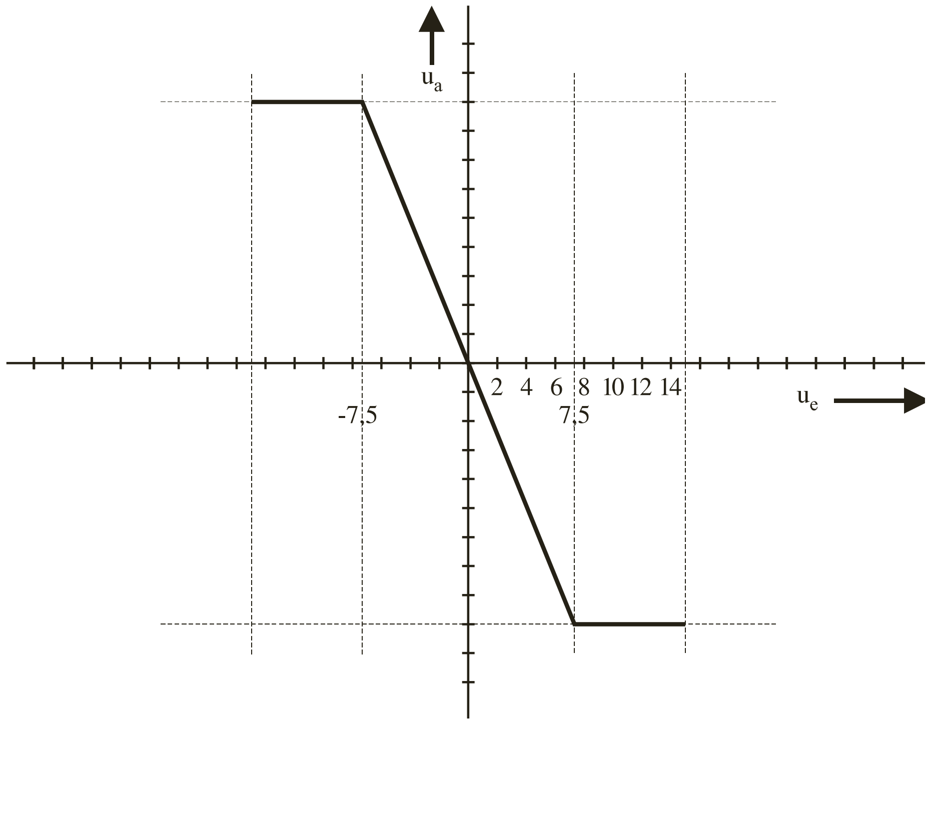
$$u_a = U_0 - R_2 \cdot I = 5V - 20k\Omega \cdot I$$

$$U_0 + R_1 \cdot I - u_e = 0 \quad \Rightarrow \quad I = \frac{u_e - U_0}{R_1} = \frac{u_e - 5V}{R_1}$$

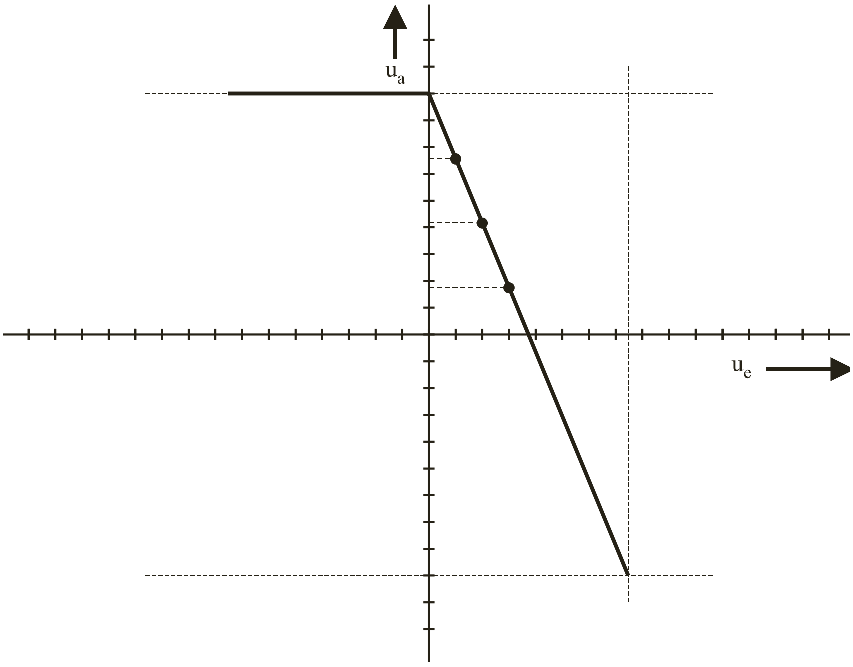
$$u_a = U_0 - R_2 \frac{u_e - U_0}{R_1} = 5V - 20k\Omega \cdot \frac{u_e - 5V}{10k\Omega} = 5V - 2(u_e - 5V) = 5V - 2u_e + 10V$$

$$u_a = 15V - 2u_e$$

13.5 Übertragungskennlinie $u_a = f(u_e)$, $u_a = -2u_e$
Aussteuergrenzen: $\pm 15V$
1. $U_0 = 0V$



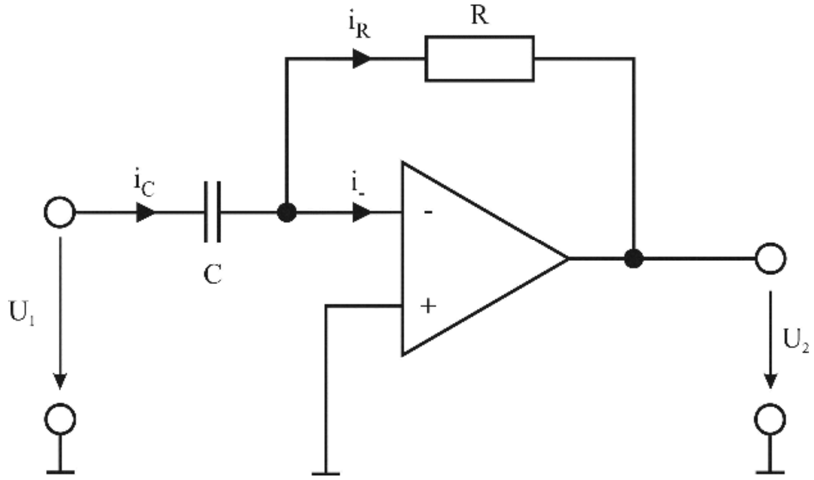
2. $U_0 = 5V$



Aufgabe 14:

14.1 invertierender Differenzierer

14.2



Gegenkopplung: $\rightarrow \quad u_+ = u_- = 0$

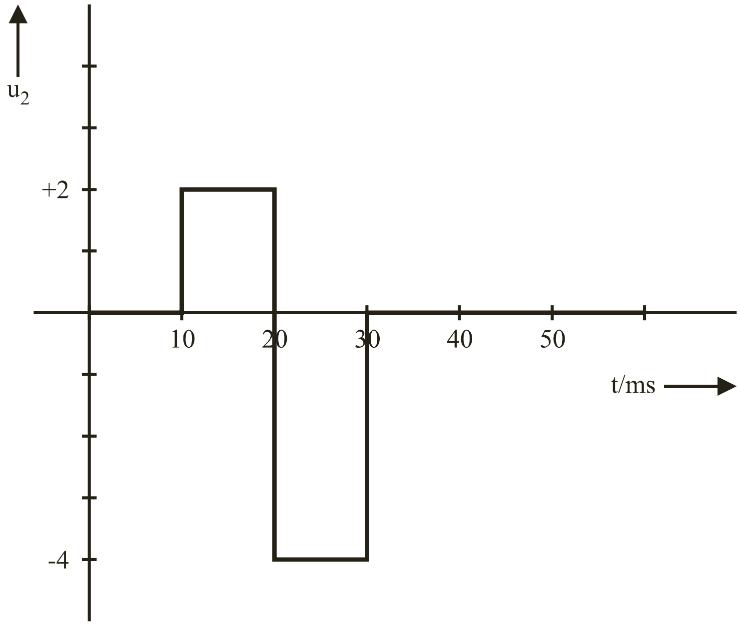
$$i_- = 0 \Rightarrow i_C = i_R$$

$$i_C = C\frac{du_1}{dt} = i_R$$

$$u_2 = -Ri_R = Ri_C = RC\frac{du_1}{dt} = -10\,\text{ms}\frac{du_1}{dt}$$

14.3

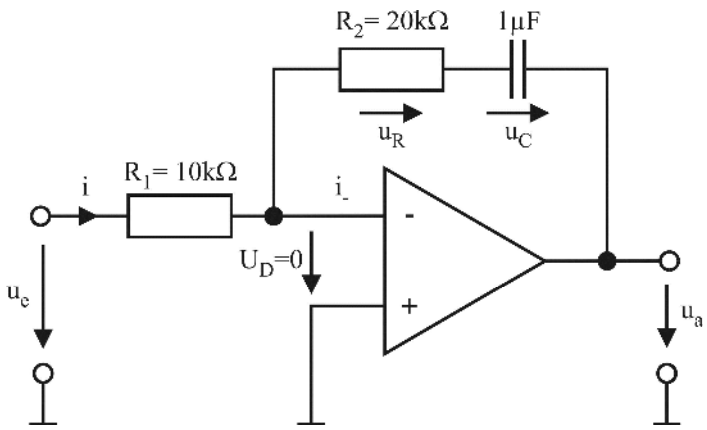
Zeitbereich	Eingangsspannung	Ausgangsspannung
$0 < t < 10\text{ms}$	$\frac{du_1}{dt} = 0$	$u_2 = 0$
$10\text{ms} < t < 20\text{ms}$	$\frac{du_1}{dt} = \frac{-2\,\text{V}}{10\,\text{ms}}$	$u_2 = -10\,\text{ms} \cdot \frac{-2\,\text{V}}{10\,\text{ms}} = +2\,\text{V}$
$20\text{ms} < t < 30\text{ms}$	$\frac{du_1}{dt} = \frac{4\,\text{V}}{10\,\text{ms}}$	$u_2 = -10\,\text{ms} \cdot \frac{4\,\text{V}}{10\,\text{ms}} = -4\,\text{V}$
$30\text{ms} < t < 60\text{ms}$	$\frac{du_1}{dt} = 0$	$u_2 = 0$



14.4 Berechnung der Ausgangsspannung

Gegenkopplung $\Rightarrow$ $U_D = 0$

C ungeladen $\Rightarrow$ $u_{C(t=0)} = 0$



$$u_a = -\left(u_R + u_C\right)$$

$$u_a = -R_2 \cdot i - \frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + \underbrace{u_C(t=0)}_{=0} \qquad i = \frac{u_e}{R_1} \quad ;$$

$$u_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_e - \frac{1}{R_1 C}\int_0^t u_e\,dt + u_C(t=0) \;; \quad u_a = -2u_e - \frac{1}{10ms}\int_0^t u_e\,dt + u_C(t=0)\,;$$

$$u_a = -2u_e - \frac{1}{10ms} \cdot u_e \cdot \Delta t + u_C(t=0)$$

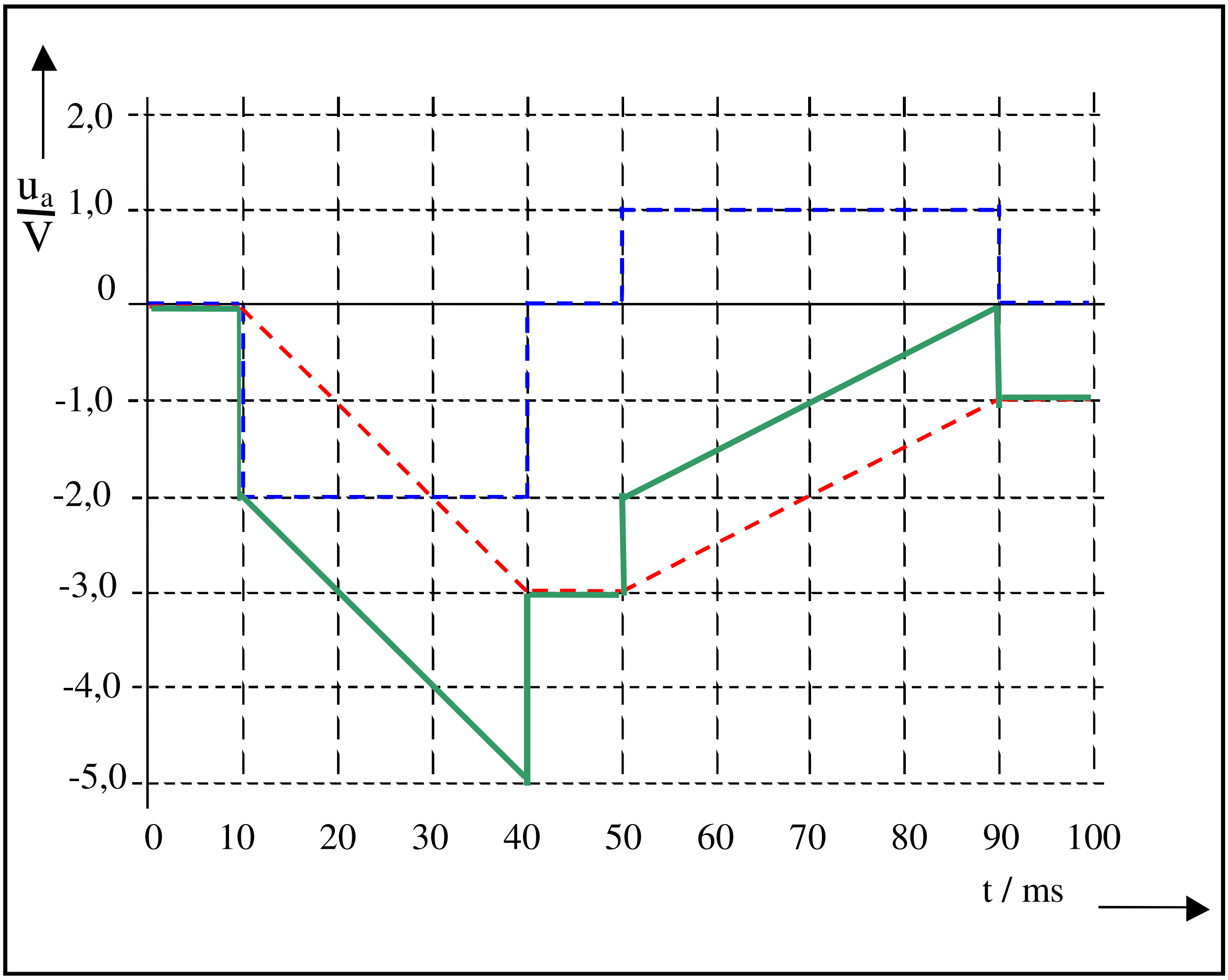
Allgemein:

$$u_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_e - \frac{1}{R_1 C}\int_{t0}^{t1} u_e dt \; + \; u_C(t = t0)$$

$$u_a = -2 \cdot u_e - \frac{1}{10\ ms} \cdot u_e \cdot \Delta t + u_C(t = tn) \quad mit \;\; tn = 10ms, 40ms, 50ms, 90ms, 100ms$$

Zeitbereich (t in ms) bzw. Zeitpunkt	Δt	u_e	u_a	u_C
0 < t <10	10 ms	0V	0V	u_C(0ms)= 0V
10 < t < 40 t=10 ms: t=40 ms:	30 ms	1V	 $u_a = -2 \cdot 1\text{V} - \frac{1}{10\text{ms}} \cdot 1\,\text{V} \cdot 0ms + 0\text{V} =$ -2V $u_a = -2 \cdot 1\text{V} - \frac{1}{10\text{ms}} \cdot 1\,\text{V} \cdot 30ms + 0\text{V} =$ -5V	 u_C(10ms)= 0V u_C(40ms)= -3V
40 < t < 50	10 ms	0V	$u_a = -2 \cdot 0\text{V} - \frac{1}{10\text{ms}} \cdot 0\,\text{V} \cdot 10ms + (-3\text{V}) =$ -3 V	u_C(50ms)= -3V
50 < t < 90 t=50 ms: t=90 ms:	40 ms	-0,5V	 -3V $u_a = -2 \cdot -0{,}5\text{V} - \frac{1}{10\text{ms}} \cdot -0{,}5\,\text{V} \cdot 40\text{ms}$ $+(-3\text{V}) = 0\,\text{V}$	 u_C(50ms)= -3V u_C(90ms)= -1V
90 < t < 100	10 ms	0V	$u_a = -2 \cdot 0\text{V} - \frac{1}{10\text{ms}} \cdot 0\,\text{V} \cdot 10\ ms + (-1\text{V}) =$ -1V	u_C(90ms)= -1V

Skizze:



.... Anteil invertierender Verstärker

-------- Anteil Integrator (nach 40 ms ist der Kondensator auf –3 V geladen, bei 50 ms beginnt die Entladung, bei 90 ms ist u_C=-1V)

_____ Ausgangsspannung

Lösung Aufgabe 15

15.1 **Schaltung [1]**: invertierender Verstärker

$$u_a = -\frac{R_2}{R_1} u_e = -\frac{20\ k\Omega}{10\ k\Omega}\ u_e = -2\ u_e$$

Schaltung [2]: nichtinvertierender Verstärker

$$u_a = (1+\frac{R_2}{R_1})\ u_e = (1+\frac{20\ k\Omega}{10\ k\Omega})\ u_e = 3\ u_e$$

Grenzen: ±12V!! ⇒ u_a = +12 V für $u_e \geq$ 4V
u_a = -12 V für $u_e \leq$ - 4V
u_a = 3 u_e für –4 V $\leq u_e \leq$ +4 V

Schaltung [3]: invertierender Differenzierer

$$u_a = -R_1 C_1\ \frac{du_e}{dt} = -5\ ms\ \frac{du_e}{dt} \quad ; \quad \frac{du_e}{dt} = \frac{2\ V}{ms} \quad (0\ ms < t < 5\ ms)$$

$$\frac{du_e}{dt} = -\frac{2\ V}{ms} \quad (5\ ms < t < 10\ ms)$$

u_a = -10 V (0 ms < t < 5 ms), u_a = +10 V (5 ms < t < 10 ms)

Schaltung [4]: invertierender Integrierer bzw. Integrator

$$u_a = -\frac{1}{R\ C}\int_0^t u_e(t)\ dt + u_a(t=0) = -\frac{1}{1\cdot 10^4\ \Omega \cdot 0{,}1\cdot 10^{-6}\ \ F}\int_0^t u_e(t)\ dt + 0\ V$$

$$u_a = -\frac{1}{1\ ms}\int_0^t u_e(t)\ dt + 0\ V$$

1. *0 ms < t < 5 ms:* *u_e = +(2 V / ms) t – 5 V*

$$U_a = -\frac{1}{1\ ms}\int_0^t (2\frac{V}{ms}\ t - 5\ V)\ dt = -\frac{1}{1\ ms}\left[\frac{1}{2}\ 2\ \frac{V}{ms}\ t^2 - 5\ V\cdot t\right]_0^t$$

$$U_a = -\frac{1}{1\ ms}\left[\ \frac{1\ V}{ms}\ t^2 - 5\ V\cdot t\right]$$

t = 0 ms: u_a = 0,00 V
t = 1 ms: u_a = 4,0 V
t = 2 ms: u_a = 6,0 V
t = 2,5 ms: u_a = 6,25 V
t = 3 ms: u_a = 6,0 V
t = 4 ms: u_a = 4 V
t = 5 ms: u_a = 0,00 V

Wiederholt sich mit negativem Vorzeichen
für: *5 ms < t < 10 ms:*
u_e = - t (2 V / ms) +5 V
usw. …

Schaltung [5]: nichtinvertierender Schmitt –Trigger

Einschaltschwelle: $U_D = 0$, $u_{a-} = -12$ V $\quad U_{K1} = -\frac{10\,k\Omega}{30\,k\Omega}\,u_{a-} = -\frac{1}{3}\,(-12\,V) = +\,4\,V$

Ausschaltschwelle: $U_D = 0$, $u_{a+} = +12$ V $\quad U_{K2} = -\frac{10\,k\Omega}{30\,k\Omega}\,u_{a+} = -\frac{1}{3}\,(+12\,V) = -\,4\,V$

Schaltung [6]: invertierender Schmitt -Trigger

$u_{amax} = \pm\, 12$ V
$U_k = \pm\, u_{amax}$ (10 kΩ / (10 kΩ +30 kΩ)) = ± 12 V (1/4) = ± 3 V

Schaltung [7]: Subtrahierer

$$u_a = \frac{R_2}{R_1}\left(u_{e2} - u_{e2}\right) = \frac{20\,k\Omega}{10\,k\Omega}\cdot\left(u_{e2} - u_{e1}\right) = 2\cdot\left(u_{e2} - u_{e1}\right)$$

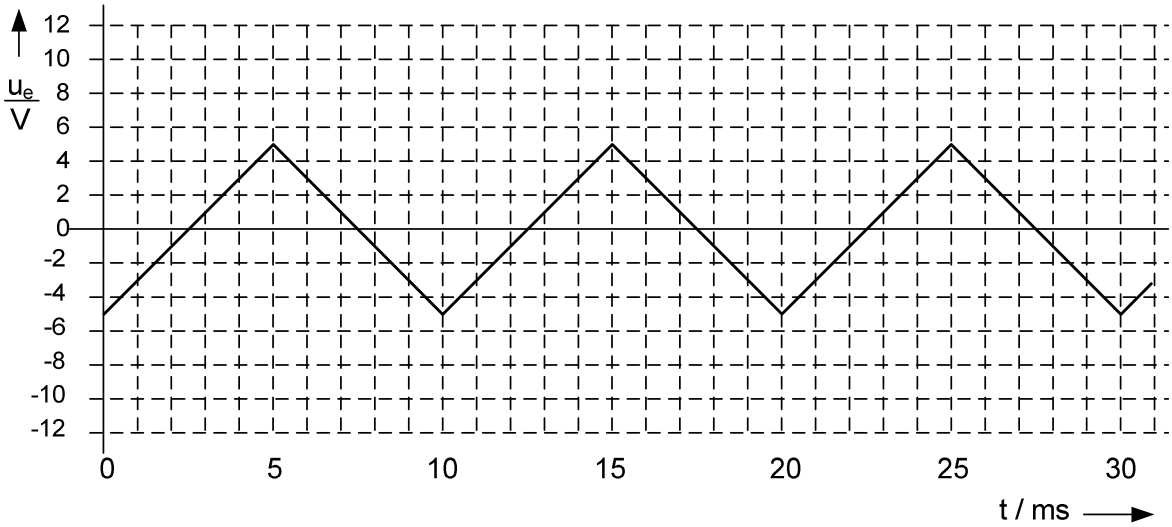
Schaltung [8]: invertierender Addierer

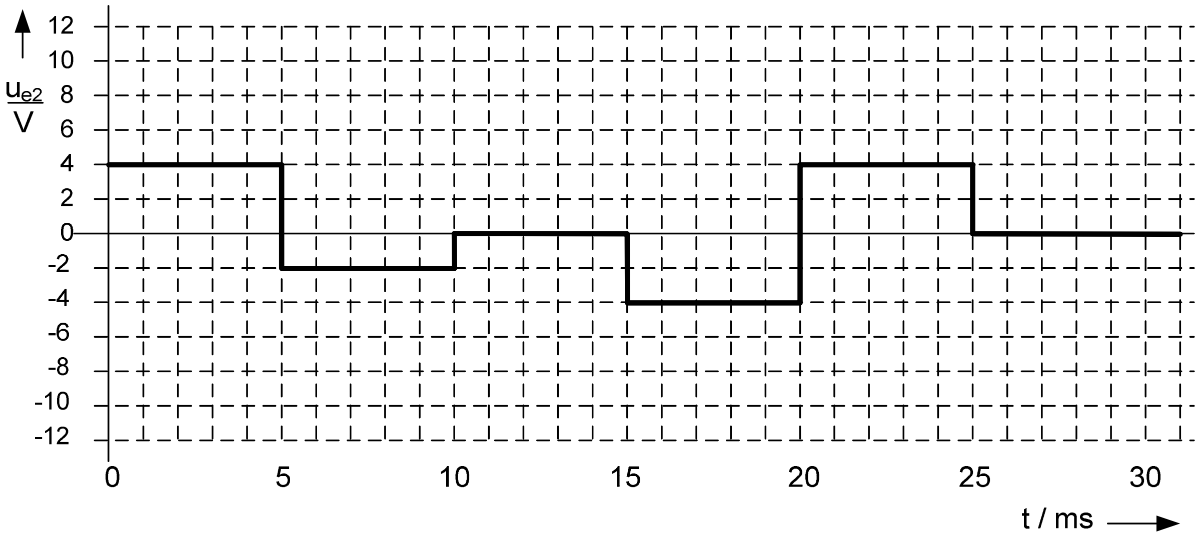
$$u_a = -\left(u_{e1}\,\frac{R_2}{R_1} + u_{e2}\,\frac{R_2}{R_3}\right)$$
$$u_a = -\,(\,2\,u_{e1} + 1{,}5\,u_{e2})$$

Schaltung [9]: Komparator

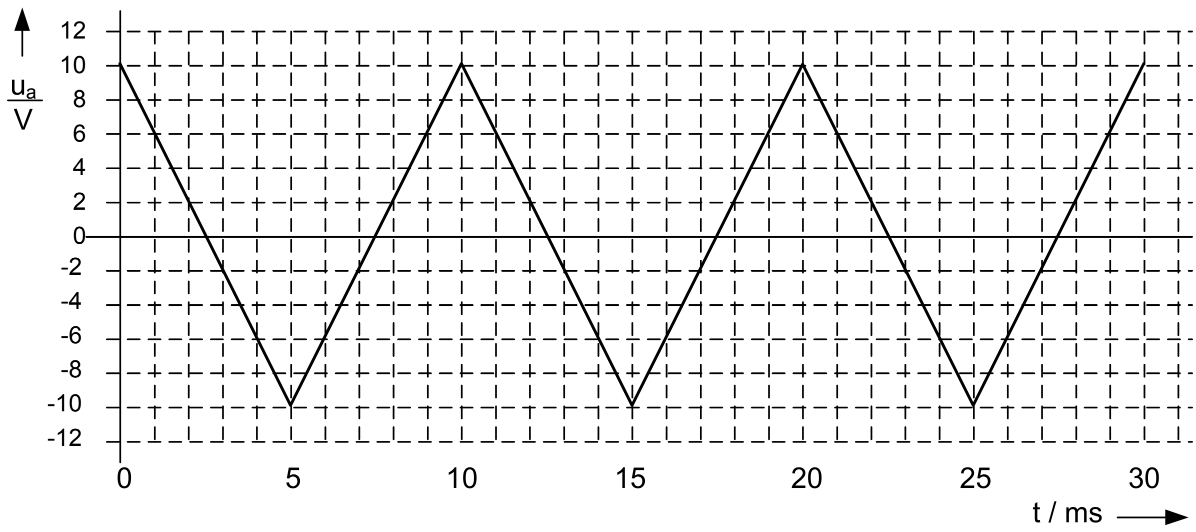
$$u_a = u_{a\max}\ \ f\ddot{u}r\ U_D > 0 \quad\Rightarrow\quad u_a = +12\,V \quad f\ddot{u}r\ \ u_e > +2\,V$$
$$u_a = u_{a\min}\ \ f\ddot{u}r\ U_D < 0 \quad\Rightarrow\quad u_a = -12\,V \quad f\ddot{u}r\ \ u_e < +2\,V$$

Graphische Lösungen:

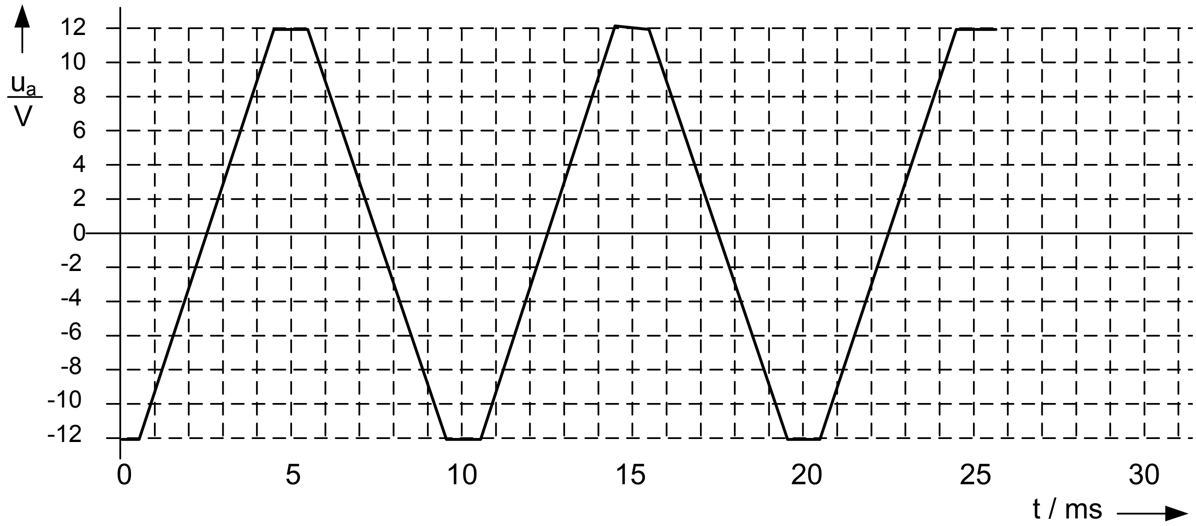




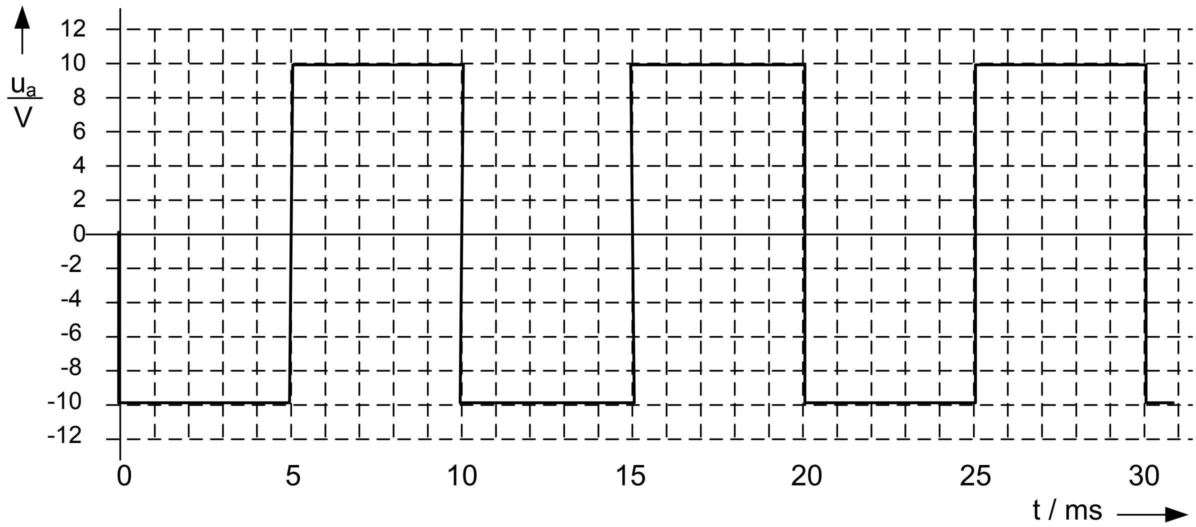
Schaltung [1]



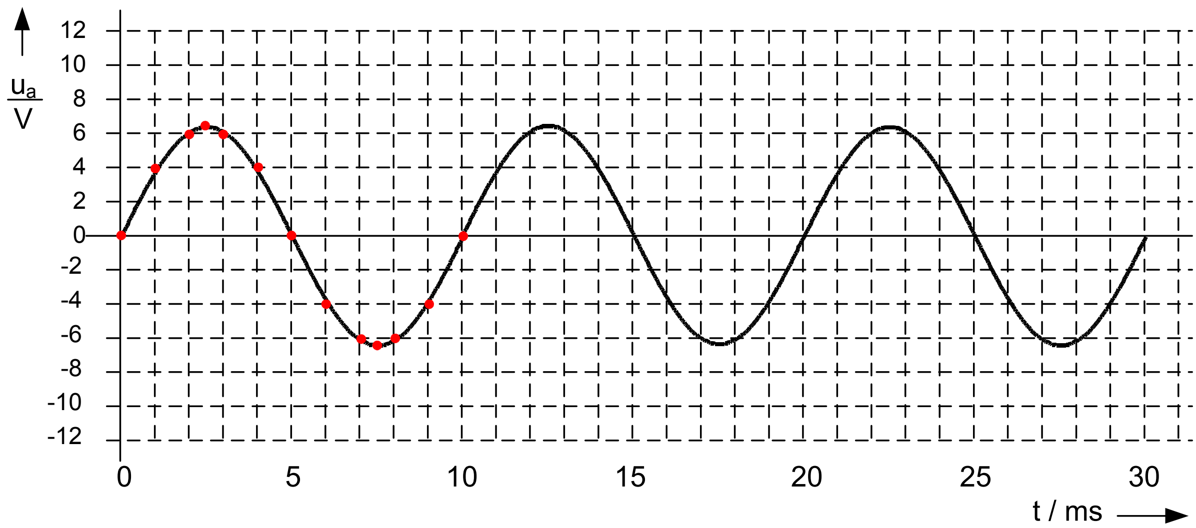
Schaltung [2]



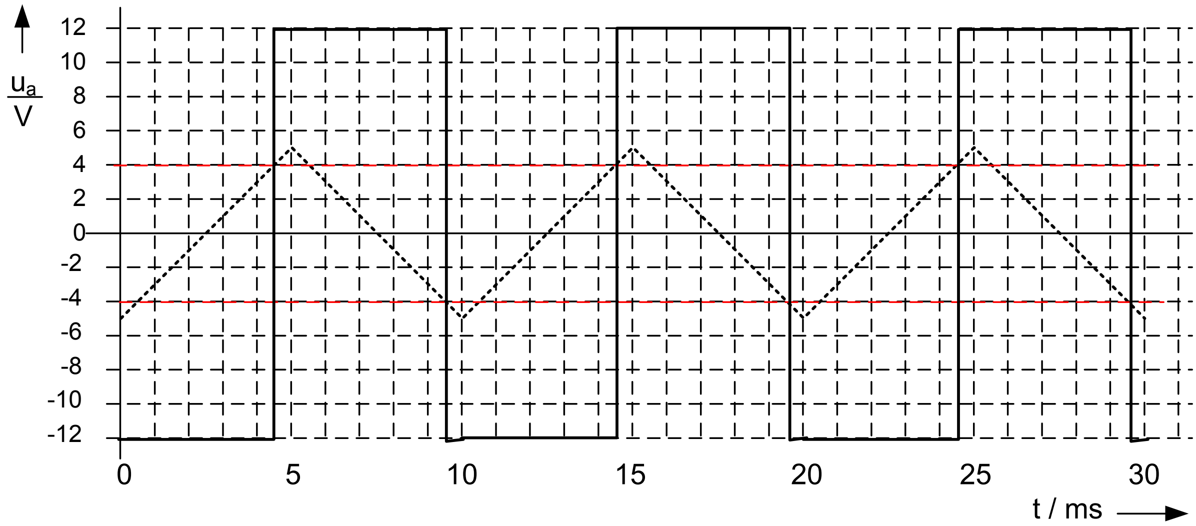
Schaltung [3]



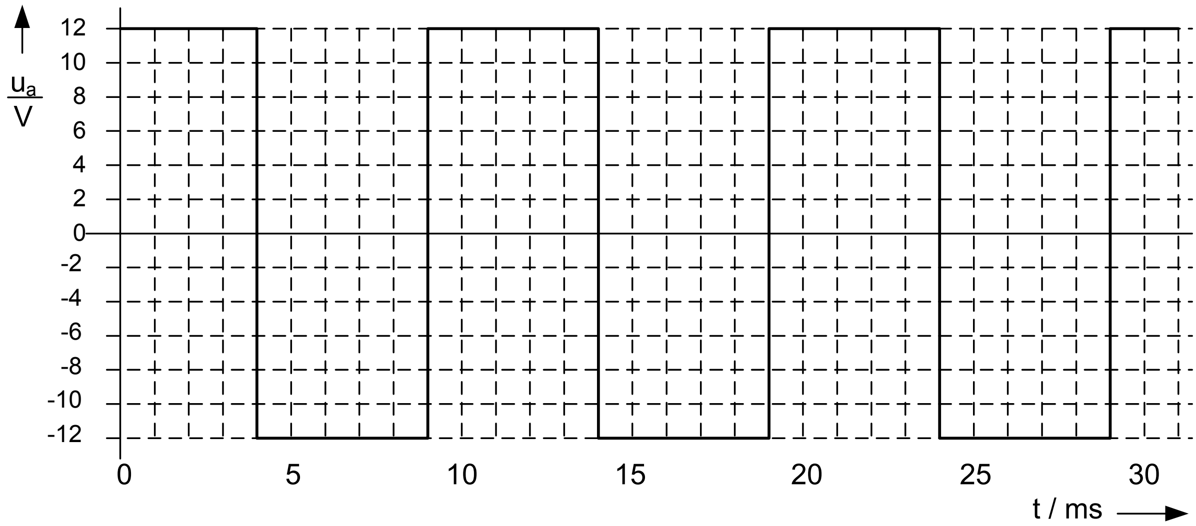
Schaltung [4]



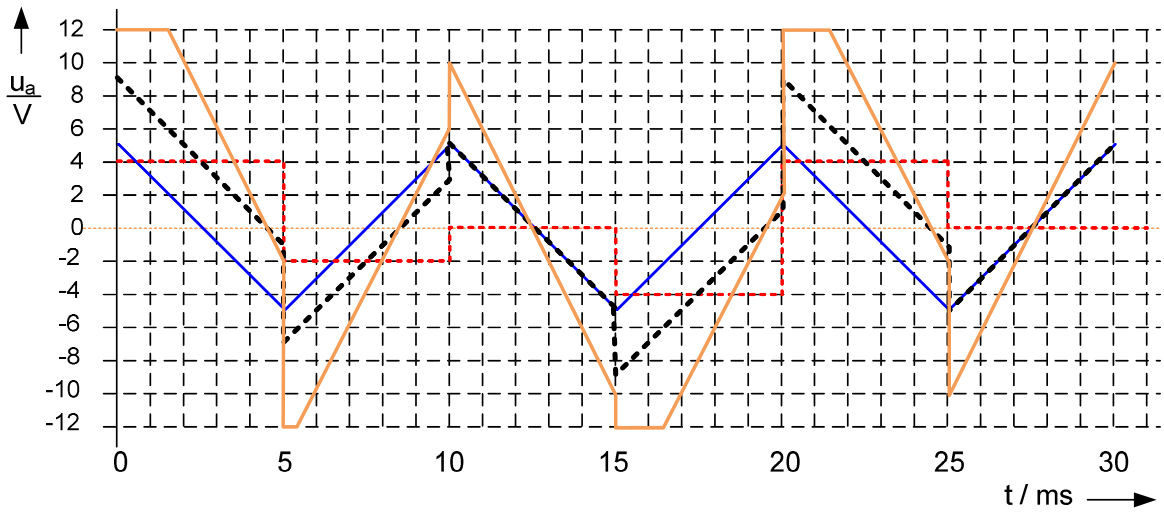
Schaltung [5]



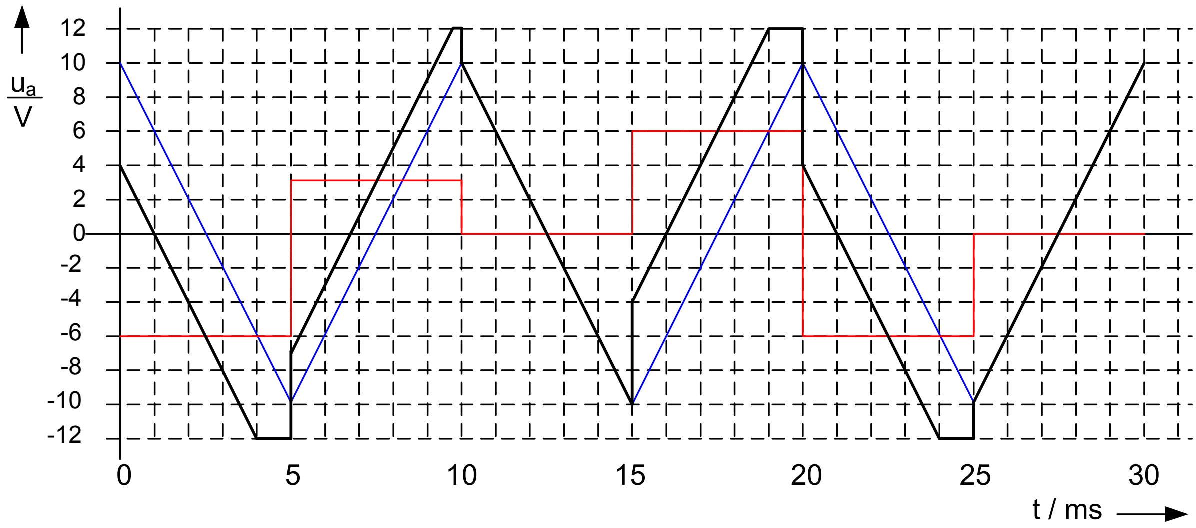
Schaltung [6]



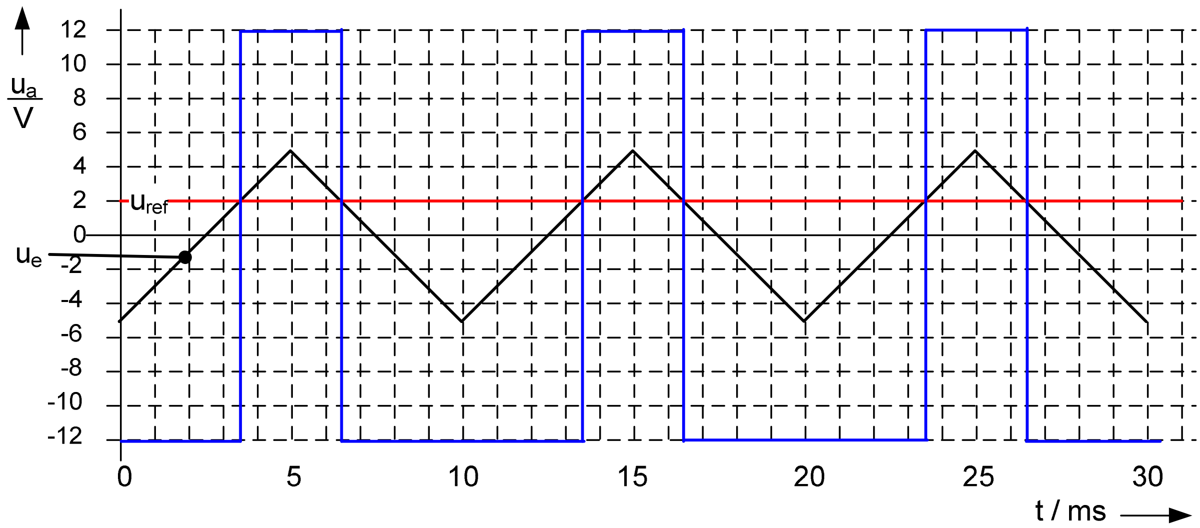
Schaltung [7] rot: u_{e2}, blau: $-u_{e1}=-u_e$, schwarz: $(u_{e2} - u_{e1})$, orange: $2(u_{e2} - u_{e1})$



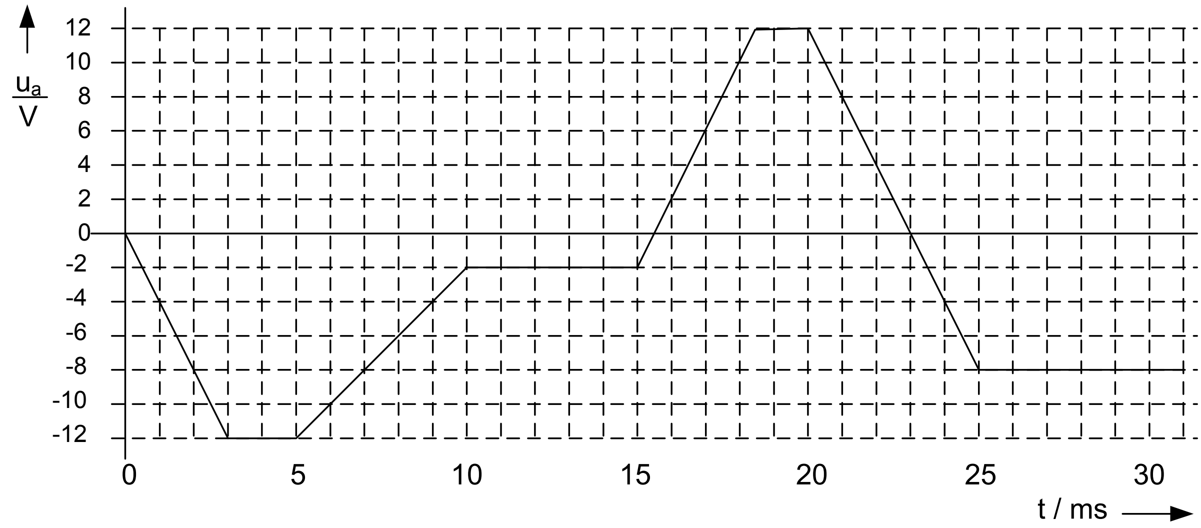
Schaltung [8]



Schaltung [9]



Schaltung [4] mit (u_e=u_{e2})



Schaltung [4]: für $u_e = u_{e2}$

$$u_a = -\frac{1}{1\,ms}\int_0^t u_{e2}(t)\,dt + 0\,V = -\frac{1}{1\,ms}\cdot u_{e2}\cdot \Delta t + u_C$$

1. $0 < t < 5ms \qquad u_a\big|_{t=5ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,4V\cdot 5ms + 0 = 20V \;\; aber: u_{\min} = -12V = u_{C(t=5ms)}$

$$deshalb: \frac{\Delta u_a}{\Delta t} = -\frac{1}{1\,ms}\,4V = -4V\,/\,ms \;\Rightarrow u_a \;erreicht\; -12V \;nach\; 3\,ms$$

2. $5ms < t < 10ms \qquad u_a\big|_{t=10ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,(-2V)\cdot 5ms + (-12V) = -2V = u_{C(t=10ms)}$

3. $10ms < t < 15ms \qquad u_a\big|_{t=15ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,(0V)\cdot 5ms + (-2V) = -2V = u_{C(t=15ms)}$

4. $15ms < t < 20ms \qquad u_a\big|_{t=20ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,(-4V)\cdot 5ms + (-2V) = 18V \;\; aber: u_{\max} = 12V = u_{C(t=20ms)}$

$$deshalb: \frac{\Delta u_a}{\Delta t} = -\frac{1}{1\,ms}\,(-4V) = +4V\,/\,ms \;\Rightarrow u_a \;erreicht\; +12V \;nach\; 3{,}5\,ms$$

5. $20ms < t < 25ms \qquad u_a\big|_{t=25ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,4V\cdot 5ms + 12V = -8V = u_{C(t=25ms)}$

6. $25ms < t < 30ms \qquad u_a\big|_{t=30ms} = -\frac{1}{1\,ms}\,(0V)\cdot 5ms + (-8V) = -8V = u_{C(t=30ms)}$

Lösung Aufgabe 16

16.1 Schaltschwellen berechnen
Zur Berechnung der Einschaltschwelle nehmen wir an, dass u_e= 0V ist, d.h. T_1 sperrt und T_2 leitet.
Dann ist:

$$I_E = I_{E2} \approx I_{C2} \quad , \qquad I_{E2} = \frac{U_b - U_{CE}}{R_{C2} + R_E} = \frac{14{,}8\,V}{4\,k\Omega} = 3{,}7\,mA$$

$$u_{e,ein} = u_{BE1} + I_{E2} \cdot R_E = 0{,}7\,V + (U_b - U_{CE}) \cdot \frac{R_E}{R_{C2} + R_E}$$

$$= 0{,}7\,V + 14{,}8\,V \cdot \frac{1\,k\Omega}{4\,k\Omega} = 0{,}7\,V + 3{,}7\,V = 4{,}4\,V$$

Zur Berechnung der Ausschaltschwelle nehmen wir an, dass $u_e > 4{,}4$ V ist, d.h. T_2 sperrt und T_1 leitet.
Dann ist:

$$I_E = I_{E1} \approx I_{C1} \quad , \qquad I_{E1} = \frac{U_b - U_{CE}}{R_{C1} + R_E} = \frac{14{,}8\,V}{10\,k\Omega} = 1{,}48\,mA$$

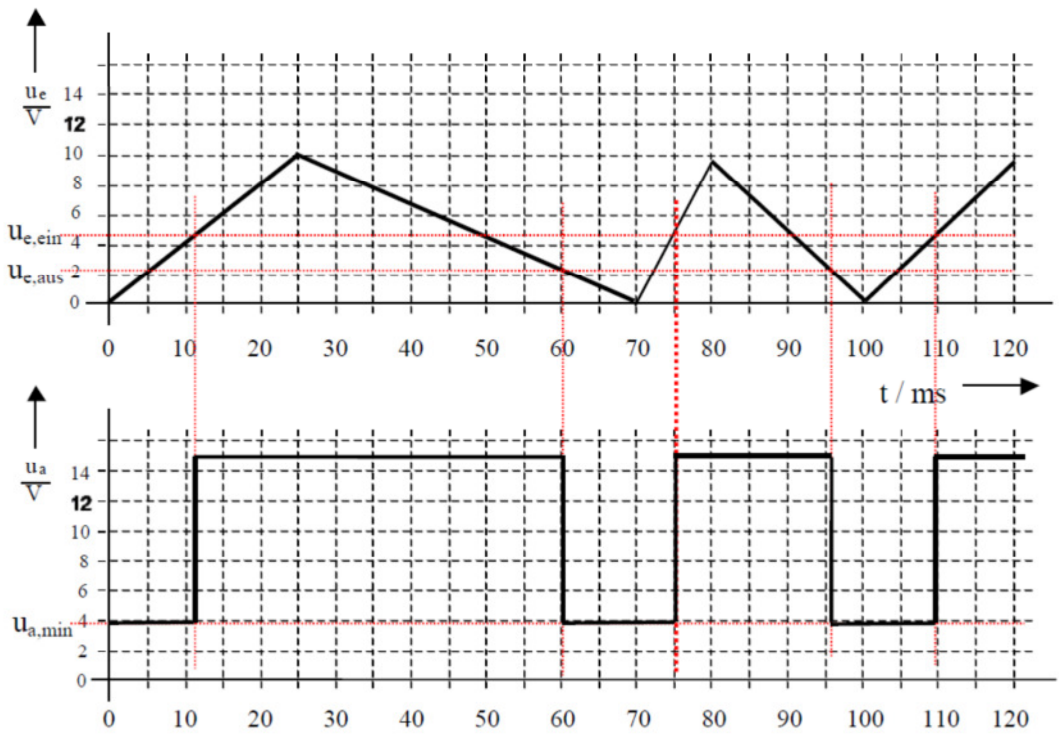
$$u_{e,aus} = u_{BE1} + I_{E1} \cdot R_E = 0{,}7\,V + 1{,}48\,mA \cdot 1\,k\Omega = 2{,}18\,V$$

16.2 Ausgangsspannungen berechnen
Annahme: T_1 sperrt und T_2 leitet $\Rightarrow u_a = u_{a,min}$

$$u_{a,\min} = I_{E2} \cdot R_{E2} + U_{CE2} = 3{,}7\,mA \cdot 1\,k\Omega + 0{,}2\,V = 3{,}7\,V + 0{,}2\,V = 3{,}9\,V$$

Annahme: T_2 sperrt und T_1 leitet, d.h. $I_{C2} = 0 \Rightarrow u_a = u_{a,max}$

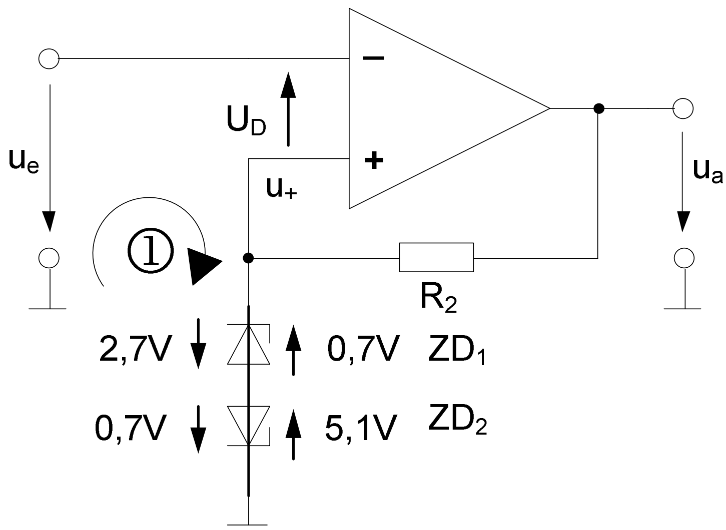
$$u_{a,\max} = U_b - I_{C2} \cdot R_{C2} = 15\,V - 0\,V = 15\,V$$



Lösung Aufgabe 17

17.1 Schaltung analysieren:
Ausgang ist auf den nichtinvertierenden Eingang zurückgekoppelt: Mitkopplung
Eingang liegt am invertierenden Eingang des OP: **Invertierender Schmitt-Trigger**

17.2



Bedingung: **Schaltpunkt des Schmitt-Triggers, wenn U_D = 0 V, d.h. $u_e = u_+$**

1. u_e = -12 V und damit u_a = +12 V

① Masche 1:

$$-U_D + U_{Z1} + 0{,}7\,V - u_e = 0$$

$$\Rightarrow \textit{für } U_D = 0: \; u_e = u_+ = U_{Z1} + 0{,}7\,V = 2{,}7\,V + 0{,}7\,V = 3{,}4\,V$$

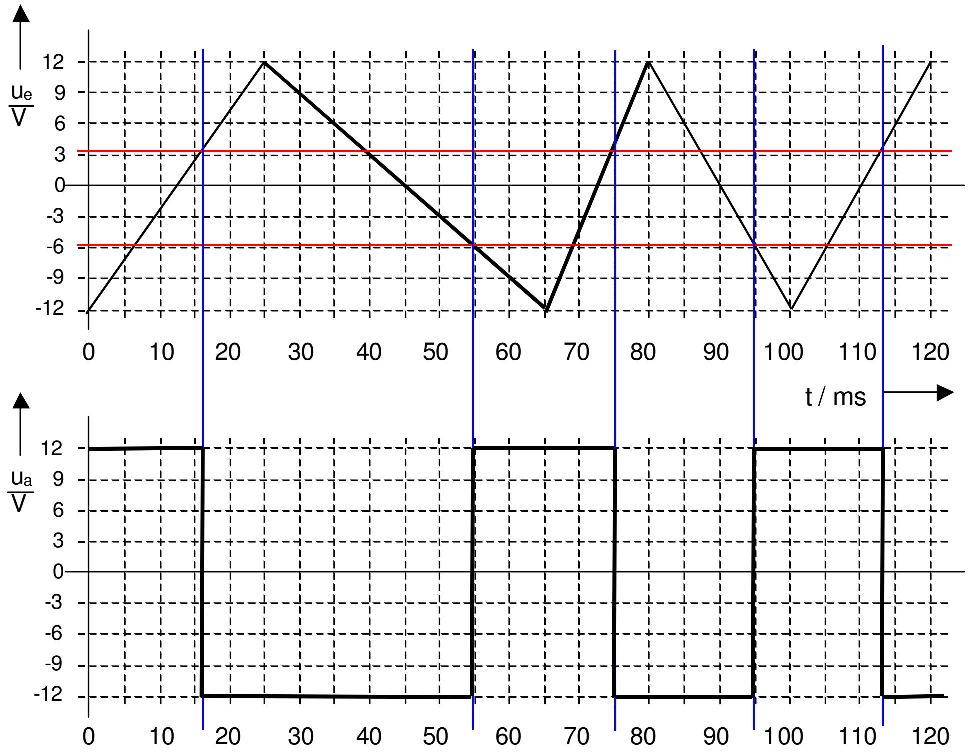
2. u_e = +12 V und damit u_a = -12 V

① Masche 1:

$$-U_D - U_{Z2} - 0{,}7\,V - u_e = 0$$

$$\Rightarrow \textit{für } U_D = 0: \quad u_e = u_+ = -U_{Z1} - 0{,}7\,V = -5{,}1\,V - 0{,}7\,V = -5{,}8\,V$$

17.3 Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung u_a!



17.4 Skizze Ausgangsspannung über Eingangsspannung