Grundlagen der Signalverarbeitung	Klausur WiSe 23/24 / Termin 1	BHT Berliner Hochschule für Technik
Name:	Matrikelnr.:	

Hinweise

1. Prüfen Sie, ob Ihre Klausur vollständig ist. Sie muss aus den durchnummerierten Seiten von 1 bis 8 bestehen. Nehmen Sie die Klausur bitte nicht auseinander. Falls Sie ein unvollständiges Exemplar erhalten haben, lassen Sie sich bitte eine einwandfreie Klausur aushändigen.
2. Zum Bestehen der Klausur sind 50% der Punktzahl erforderlich.
3. Die Bearbeitungszeit beträgt 90 Minuten.
4. Außer einfachen (nicht programmierbaren) Taschenrechnern, eine Formelsammlung und die Vorlesungsmaterialien sind keine Hilfsmittel zugelassen.
5. Das Betreiben von Mobiltelefonen und Computern ist im Prüfungsraum bzw. während der Prüfung nicht erlaubt.
6. Schreiben Sie bitte gut leserlich und nicht mit Bleistift. Ihre Klausur wird ansonsten nicht gewertet. Lassen Sie einen Korrekturrand von mindestens 4 cm frei. Nutzen Sie ausschließlich die vorgegebenen Blätter.
7. **Achtung:** Für alle Berechnungen sind die **vollständigen Rechenwege** anzuführen. Sonst wird die Aufgabe nicht gewertet!

Mit der Unterschrift bestätigen Sie, dass Sie prüfungsfähig sind und zu Beginn der Klausur die vollständigen Unterlagen erhalten haben.

Ort und Datum: Unterschrift:

Ab hier bitte keine Eintragungen vornehmen!

Anmerkung: Maximale Punktzahl= 100 Punkte, 100% = 100 Punkte; Note 1.0 $\geq$ 95%
(Punkte/Note: 95/1,0; 90/1,3; 85/1,7; 80/2,0; 75/2,3; 70/2,7; 65/3,0; 60/3,3; 55/3,7; 50/4.0)

Aufgabe:	1	2	3	4	**Summe**
Punkt(e):	40	20	10	40	110
Erreicht:					

Note:

Ort und Datum: Unterschrift:

Seite 1

Aufgabe 1 (40 Punkte)

Charakteristische Kenngrößen einer Wechselgröße

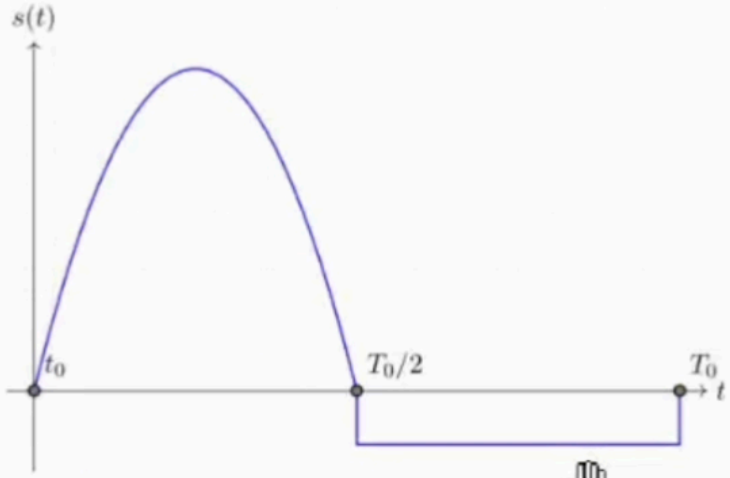
In der Abbildung unten ist eine Wechselspannung dargestellt. Berechnen Sie:

a) den Mittelwert $\overline{s}$ [10 Pkt.],
b) den Gleichrichtwert $\overline{|s|}$ und [10 Pkt.]
c) den Effektivwert S. [20 Pkt.]

analytisch unter Verwendung der Integralrechnung. Für die Funktion $s(t)$ gilt:

$$s(t) = \begin{cases} a \cdot (t-b)^2 + c, & \text{für} \quad t_0 + n \cdot T_0 < t \leq t_0 + (1/2 + n) \cdot T_0 \\ d, & \text{für} \quad t_0 + (1/2 + n) \cdot T_0 < t \leq t_0 + (1 + n) \cdot T_0 \end{cases}$$

$$n \in \{0, 1, 2, \ldots\}$$



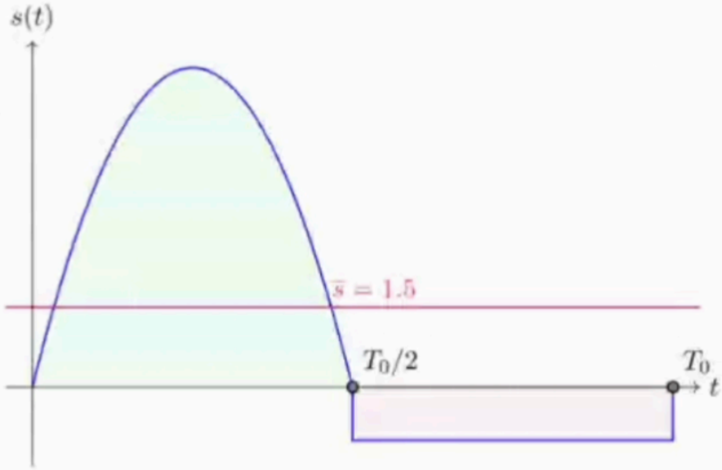
Für die Parameter gilt:

$$a = -\frac{6}{9}$$
$$b = 3$$
$$c = 6$$
$$d = -1$$
$$T_0 = 12$$

Hinweis: Der Rechenweg ist vollständig anzugeben.

Lösung:

a) den Mittelwert $\overline{s}$



Die Funktion $s(t)$ lässt sich in dem Bereich für $0 < t + n \cdot T_0 \leq n \cdot T_0/2$ vereinfachen.

$$
\begin{aligned}
s(t) &= a \cdot (t-b)^2 + c \\
&= a \cdot (t^2 - 2tb + b^2) + c \\
&= a \cdot t^2 - 2ab \cdot t + ab^2 + c \\
&= -\frac{6}{9} \cdot t^2 - 2 \cdot \left(-\frac{6}{9}\right) \cdot 3 \cdot t + \left(-\frac{6}{9}\right) \cdot 3^2 + 6 \\
&= -\frac{6}{9} \cdot t^2 + \left(\frac{36}{9}\right) \cdot t - \left(\frac{6 \cdot 9}{9}\right) + 6 \\
&= -\frac{6}{9} \cdot t^2 + 4 \cdot t - 6 + 6 \\
&= -\frac{6}{9} \cdot t^2 + 4 \cdot t
\end{aligned}
$$

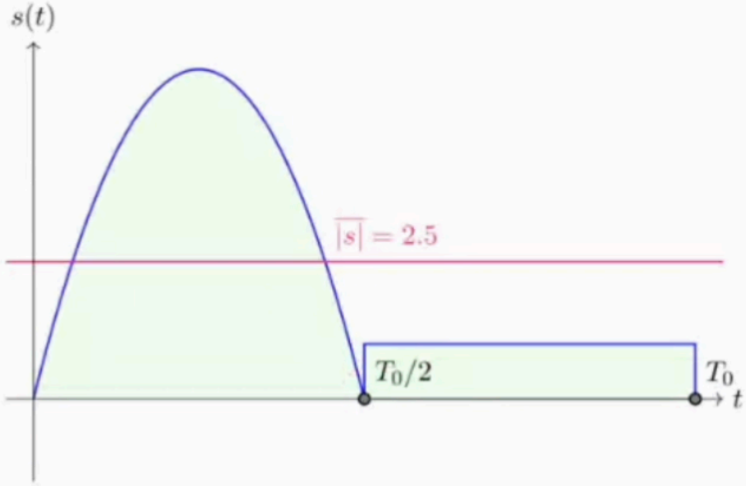
$$\begin{aligned}
\overline{s} &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ -\int\limits_0^{T_0/2} \frac{6}{9} \cdot t^2 \,\mathrm{d}t + \int\limits_0^{T_0/2} 4 \cdot t \,\mathrm{d}t - \int\limits_{T_0/2}^{T_0} 1 \,\mathrm{d}t \right\} \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ -\frac{6}{9 \cdot 3} \cdot t^3 \,\Big|_0^{T_0/2} + 2 \cdot t^2 \,\Big|_0^{T_0/2} - t \Big|_{T_0/2}^{T_0} \right\} \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ -\frac{2}{9} \cdot \left(\frac{T_0}{2}\right)^3 + 2 \cdot \left(\frac{T_0}{2}\right)^2 - \frac{T_0}{2} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \left\{ -\frac{2}{9} \cdot (6)^3 + 2 \cdot (6)^2 - \frac{12}{2} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \{-48 + 72 - 6\} \\
&= \frac{18}{12} = 1,5
\end{aligned}$$

alternativer Rechenweg

$$\begin{aligned}
\overline{s} &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_0^{T_0/2} \left(a \cdot (t-b)^2 + c\right) \,\mathrm{d}t - \int\limits_{T_0/2}^{T_0} d \,\mathrm{d}t \right\} \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \underbrace{\int\limits_0^{T_0/2} a \cdot (t-b)^2 \,\mathrm{d}t}_{s_1} + \int\limits_0^{T_0/2} c \,\mathrm{d}t - \int\limits_{T_0/2}^{T_0} d \,\mathrm{d}t \right\}
\end{aligned}$$

mit $u = t - b \rightarrow \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = 1 \;\rightarrow \mathrm{d}t = \mathrm{d}u$

$$\begin{aligned}
s_1 &= \int\limits_0^{T_0/2} a \cdot u^2 \,\mathrm{d}t = a \cdot \frac{u^3}{3} \,\Big|_0^{T_0/2} = a \cdot \frac{(t-b)^3}{3} \,\Big|_0^{T_0/2} \\
\overline{s} &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ a \cdot \frac{(t-b)^3}{3} \,\Big|_0^{T_0/2} + c \cdot t \,\Big|_0^{T_0/2} - d \cdot t \,\Big|_0^{T_0/2} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \left\{ 6 \cdot t \,\Big|_0^{6} - \frac{2 \cdot (t-3)^3}{9} \,\Big|_0^{6} - 1 \cdot t \,\Big|_0^{6} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \left\{ -\frac{2 \cdot (t-9) \cdot t^2}{9} \,\Big|_0^{6} - 1 \cdot t \,\Big|_0^{6} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \{24 - 6\} \\
&= \frac{18}{12} \\
&= 1,5
\end{aligned}$$



$$\overline{|s|} = \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int_0^{T_0/2} \left(-\frac{6}{9} \cdot t^2 + 4 \cdot t \right) \, \mathrm{d}t + \int_{T_0/2}^{T_0} 1 \, \mathrm{d}t \right\}$$

$$= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ - \int_0^{T_0/2} \frac{6}{9} \cdot t^2 \, \mathrm{d}t + \int_0^{T_0/2} 4 \cdot t \, \mathrm{d}t + \int_{T_0/2}^{T_0} 1 \, \mathrm{d}t \right\}$$

$$= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ -\frac{6}{9 \cdot 3} \cdot t^3 \Big|_0^{T_0/2} + 2 \cdot t^2 \Big|_0^{T_0/2} + t \Big|_{T_0/2}^{T_0} \right\}$$

$$= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ -\frac{2}{9} \cdot \left(\frac{T_0}{2} \right)^3 + 2 \cdot \left(\frac{T_0}{2} \right)^2 + \frac{T_0}{2} \right\}$$

$$= \frac{1}{12} \cdot \left\{ -\frac{2}{9} \cdot (6)^3 + 2 \cdot (6)^2 + \frac{12}{2} \right\}$$

$$= \frac{1}{12} \cdot \{-48 + 72 + 6\}$$

$$= \frac{30}{12}$$

$$= 2,5$$

alternativer Rechenweg

alternativer Rechenweg

$$\overline{|s|} = \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_0^{T_0/2} \left(a \cdot (t-b)^2 + c\right) \mathrm{d}t + \int\limits_{T_0/2}^{T_0} d \ \mathrm{d}t \right\}$$

$$= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \underbrace{\int\limits_0^{T_0/2} a \cdot (t-b)^2 \ \mathrm{d}t}_{s_1} + \int\limits_0^{T_0/2} c \ \mathrm{d}t - \int\limits_{T_0/2}^{T_0} d \ \mathrm{d}t \right\}$$

$$\text{mit } u = t - b \rightarrow \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = 1 \ \rightarrow \mathrm{d}t = \mathrm{d}u$$

$$s_1 = \int\limits_0^{T_0/2} a \cdot u^2 \ \mathrm{d}t = a \cdot \frac{u^3}{3} \Bigg|_0^{T_0/2} = a \cdot \frac{(t-b)^3}{3} \Bigg|_0^{T_0/2}$$

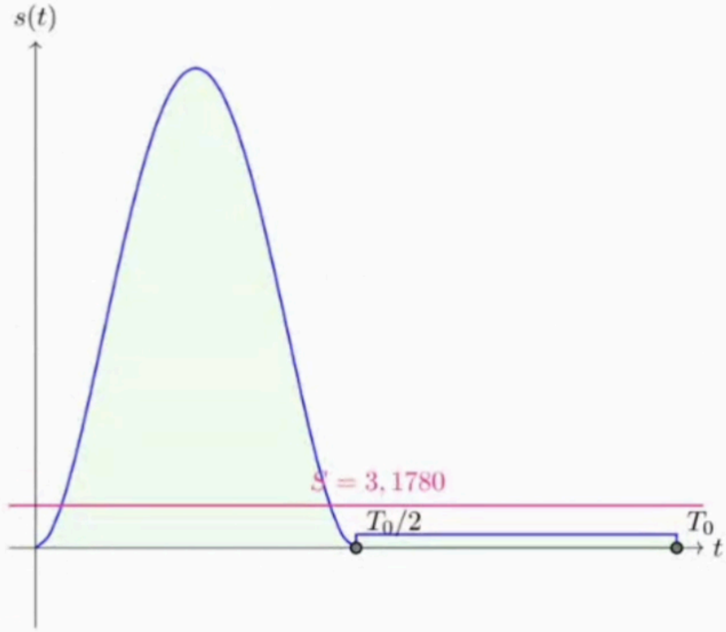
$$\overline{|s|} = \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ a \cdot \frac{(t-b)^3}{3} \Bigg|_0^{T_0/2} + c \cdot t \Bigg|_0^{T_0/2} + d \cdot t \Bigg|_0^{T_0/2} \right\}$$

$$= \frac{1}{12} \cdot \left\{ -\frac{2 \cdot (t-9) \cdot t^2}{9} \Bigg|_0^6 + 1 \cdot t \Bigg|_0^6 \right\}$$

$$= \frac{1}{12} \cdot \{24 + 6\}$$

$$= \frac{30}{12}$$

$$= 2,5$$



$$S = \sqrt{\frac{1}{T_0} \cdot \int\limits_{t_0}^{t_0+T_0} s^2(t)\ \mathrm{d}t}$$

$$S^2 = \frac{1}{T_0} \cdot \int\limits_{t_0}^{t_0+T_0} s^2(t)\ \mathrm{d}t$$

$$\begin{aligned} s'(t)^2 &= \left(-\frac{6}{9} \cdot t^2 + 4 \cdot t\right) \\ &= \frac{4}{9} \cdot t^4 - \frac{16}{3} \cdot t^3 + 16 \cdot t^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^2 &= \frac{1}{T_0} \cdot \int\limits_{t_0}^{t_0+T_0} s^2(t)\ \mathrm{d}t \\ &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_0^{T_0/2} \left(\frac{4}{9} \cdot t^4 - \frac{16}{3} \cdot t^3 + 16 \cdot t^2\right)\ \mathrm{d}t + \int\limits_{T_0/2}^{T_0} 1\ \mathrm{d}t \right\} \\ &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_0^{T_0/2} \frac{4}{9} \cdot t^4\ \mathrm{d}t - \int\limits_0^{T_0/2} \frac{16}{3} \cdot t^3\ \mathrm{d}t + \int\limits_0^{T_0/2} 16 \cdot t^2\ \mathrm{d}t + \int\limits_{T_0/2}^{T_0} 1\ \mathrm{d}t \right\} \\ &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \frac{4}{9 \cdot 5} \cdot t^5 \Big|_0^{T_0/2} - \frac{16}{3 \cdot 4} \cdot t^4 \Big|_0^{T_0/2} + \frac{16}{3} \cdot t^3 \Big|_0^{T_0/2} + t \Big|_{T_0/2}^{T_0} \right\} \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
S^2 &= \frac{1}{T_0} \cdot \int\limits_{t_0}^{t_0+T_0} s^2(t)\ \mathrm{d}t \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_{0}^{T_0/2} \left(\frac{4}{9} \cdot t^4 - \frac{16}{3} \cdot t^3 + 16 \cdot t^2 \right)\ \mathrm{d}t + \int\limits_{T_0/2}^{T_0} 1\ \mathrm{d}t \right\} \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \int\limits_{0}^{T_0/2} \frac{4}{9} \cdot t^4\ \mathrm{d}t - \int\limits_{0}^{T_0/2} \frac{16}{3} \cdot t^3\ \mathrm{d}t + \int\limits_{0}^{T_0/2} 16 \cdot t^2\ \mathrm{d}t + \int\limits_{T_0/2}^{T_0} 1\ \mathrm{d}t \right\} \\
&= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \frac{4}{9 \cdot 5} \cdot t^5 \Big|_0^{T_0/2} - \frac{16}{3 \cdot 4} \cdot t^4 \Big|_0^{T_0/2} + \frac{16}{3} \cdot t^3 \Big|_0^{T_0/2} + t \Big|_{T_0/2}^{T_0} \right\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
S^2 &= \frac{1}{T_0} \cdot \left\{ \frac{4}{9 \cdot 5} \cdot t^5 \Big|_0^{T_0/2} - \frac{16}{3 \cdot 4} \cdot t^4 \Big|_0^{T_0/2} + \frac{16}{3} \cdot t^3 \Big|_0^{T_0/2} + t \Big|_{T_0/2}^{T_0} \right\} \\
&= \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{4}{9 \cdot 5} \cdot 6^5 - \frac{16}{3 \cdot 4} \cdot 6^4 + \frac{16}{3} \cdot 6^3 + 6 \right\} \\
&= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{4}{9 \cdot 5} \cdot 6^4 - \frac{16}{3 \cdot 4} \cdot 6^3 + \frac{16}{3} \cdot 6^2 + 1 \right\} \\
&= \frac{2}{9 \cdot 5} \cdot 6^4 - \frac{2}{3} \cdot 6^3 + \frac{8}{3} \cdot 6^2 + \frac{1}{2} \\
&= \frac{2 \cdot 36 \cdot 36}{9 \cdot 5} - \frac{2 \cdot 6 \cdot 36}{3} + \frac{8 \cdot 36}{3} + \frac{1}{2} \\
&= \frac{2 \cdot 4 \cdot 36}{5} - 2 \cdot 2 \cdot 36 + 8 \cdot 12 + \frac{1}{2} \\
&= \frac{101}{10} \\
&= 10,1 \\
S &= \sqrt{\frac{101}{10}} \\
&= 3,1780
\end{aligned}
$$

Aufgabe 2 (20 Punkte)

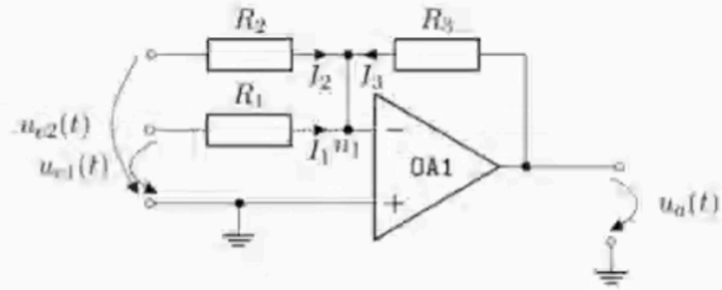
Invertierender Addierverstärker

In der Abbildung unten ist eine Cosinus-förmige Wechselspannung $u_{e1}(t)$ und eine Cosinus-förmige Wechselspannung $u_{e2}(t)$ mit Phasenanschnitt dargestellt. Für die Amplitude gilt: $\hat{u}_{e2} = -\frac{\hat{u}_{e1}}{2}$.

Bestimmen Sie

a) analytisch die Ausgangsspannung $u_a(t)$ und [15 Pkt.],

b) zeichen Sie den Kurvenverlauf von $u_a(t)$ in das dafür vorgesehene Diagramm. [5 Pkt.]



Für die OPV-Schaltung gilt:

- $R_1 = 20\ k\Omega$
- $R_2 = 10\ k\Omega$
- $R_3 = 20\ k\Omega$

Der OPV kann als ideal angenommen werden.

Hinweis: Beschreiben Sie $u_{e2}(t)$ und $u_a(t)$ abschnittweise!

Lösung:

Für die Übertragungsfunktion gilt:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= -\left[\frac{R_3}{R_1}\cdot u_{e1}(t) + \frac{R_3}{R_2}\cdot u_{e2}(t)\right] \\ &= -\left[\frac{20}{20}\cdot u_{e1}(t) + \frac{20}{10}\cdot u_{e2}(t)\right] \\ &= -[u_{e1}(t) + 2\cdot u_{e2}(t)] \end{aligned}$$

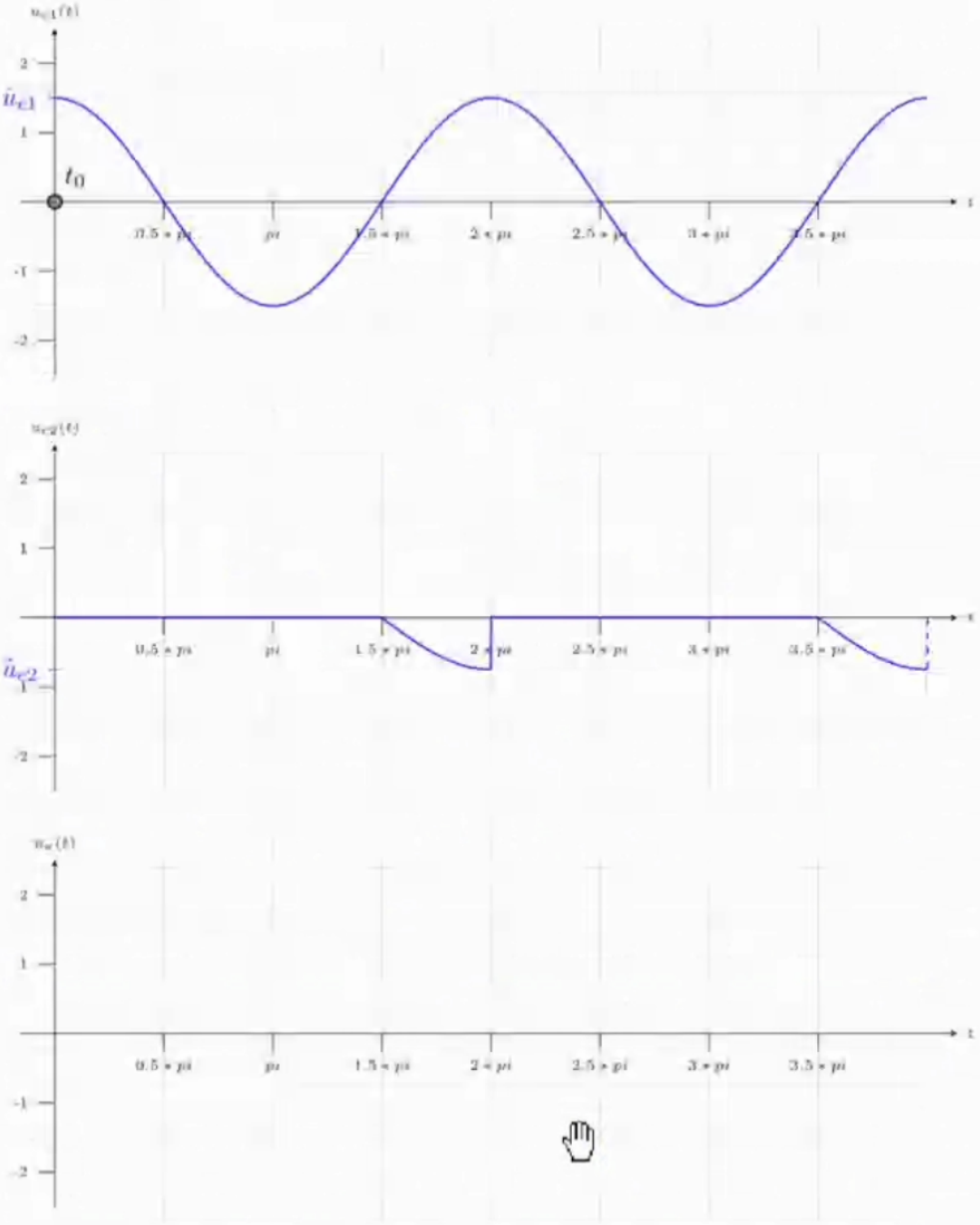
Für die beiden Wechselspannungen gilt:

$$u_{e1}(t) = \hat{u}_{e1}\cdot\cos(t)$$

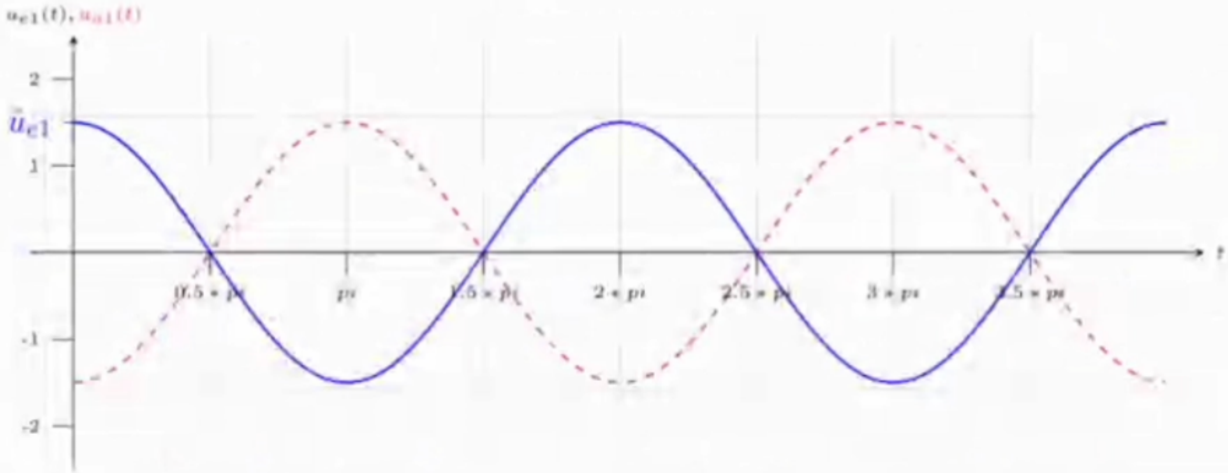
$$u_{e2}(t) = \begin{cases} 0, & \text{für} \quad t_0 + n\cdot T_0 < t \leq t_0 + (2/3+n)\cdot T_0 \\ -\hat{u}_{e2}\cdot\cos(t), & \text{für} \quad t_0 + (2/3+n)\cdot T_0 < t \leq t_0 + (1+n)\cdot T_0 \end{cases}$$

$$n \in \{0, 1, 2, \ldots\}$$

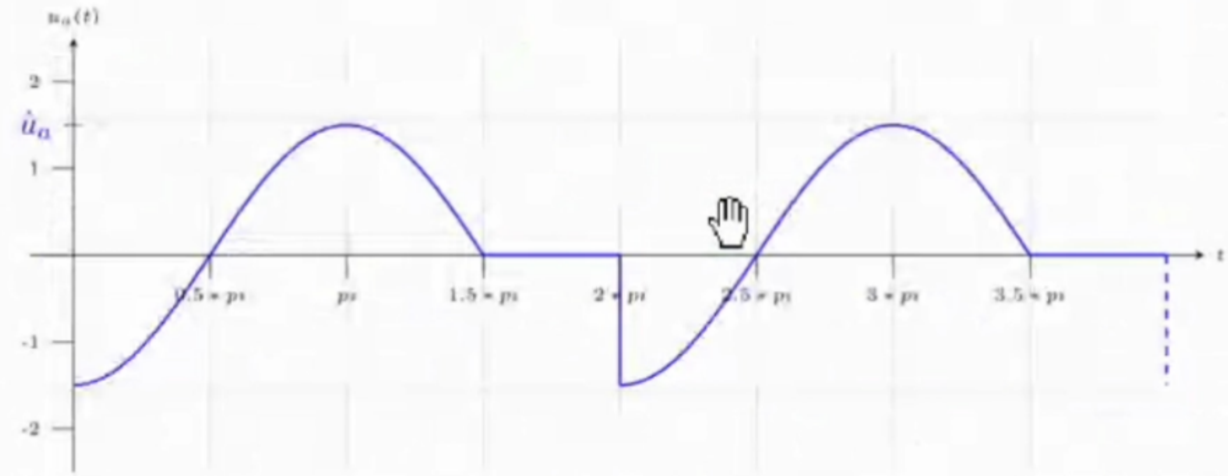
$$u_a(t) = \begin{cases} -(\hat{u}_{e1} + 2\cdot 0)\cdot\cos(t), & \text{für} \quad t_0 + n\cdot T_0 < t \leq t_0 + (2/3+n)\cdot T_0 \\ -\underbrace{(\hat{u}_{e1} + 2\cdot\hat{u}_{e2})}_{=0}\cdot\cos(t), & \text{für} \quad t_0 + (2/3+n)\cdot T_0 < t \leq t_0 + (1+n)\cdot T_0 \end{cases}$$


$u_{e1}(t)$
$\hat{u}_{e1}$
t_0
0.5 * pi
pi
1.5 * pi
2 * pi
2.5 * pi
3 * pi
3.5 * pi
t
$u_{e2}(t)$
$\hat{u}_{e2}$
$u_e(t)$

Lösung:

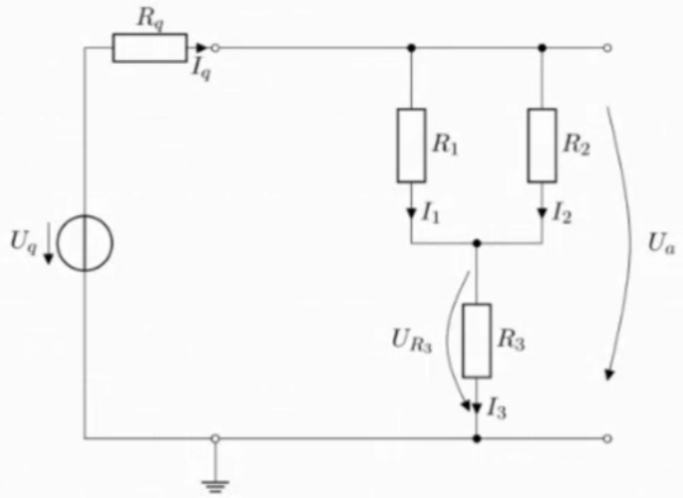

$u_{e1}(t)$, $u_{a1}(t)$
2
$\hat{u}_{e1}$
1
-1
-2
0.5 * pi
pi
1.5 * pi
2 * pi
2.5 * pi
3 * pi
3.5 * pi
t


$u_{e2}(t)$, $u_{a2}(t)$
2
1
$\hat{u}_{e2}$
-1
-2
0.5 * pi
pi
1.5 * pi
2 * pi
2.5 * pi
3 * pi
3.5 * pi
t


$u_a(t)$
2
$\hat{u}_a$
1
-1
-2
0.5 * pi
pi
1.5 * pi
2 * pi
2.5 * pi
3 * pi
3.5 * pi
t

Aufgabe 3 (10 Punkte)

Gegeben ist folgender Grundstromkreis:



Für die Spannungsquelle und die Widerstände gelten folgende Werte:

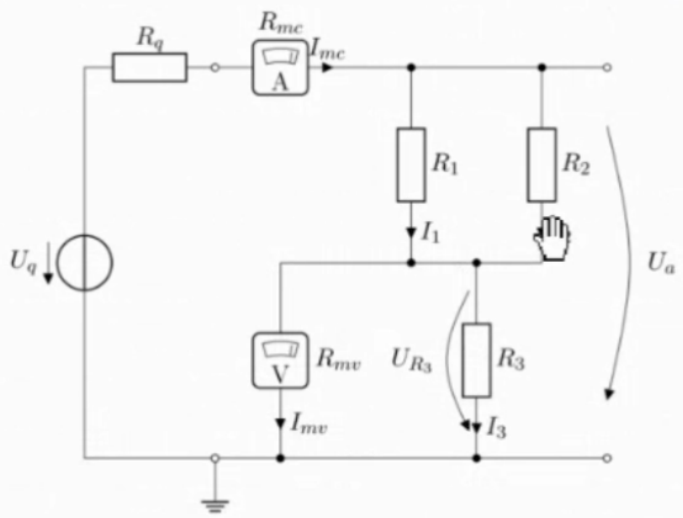
- $U_q = 10\ V$, $R_q = 2\ \Omega$
- $R_1 = 20\ k\Omega$, $R_2 = 30\ k\Omega$ und $R_3 = 15\ k\Omega$

Bestimmen Sie

a) die Ströme I_1, I_2 und I_3. [2.5 Pkt.]

b) Bestimmen Sie den Spannungsabfall über dem Widerstand R_3. [2.5 Pkt.]

Der Schaltkreis wird ergänzt um ein Ampermeter und einem Spannungsmessgerät.



Für die Widerstände der Messgeräte gelten folgende Werte: $R_{mc} = 8\ \Omega,\ R_{mv} = 200\ k\Omega$

Bestimmen Sie

c) die Ströme I_1', I_2' und I_3'. [2.5 Pkt.]

d) Bestimmen Sie den absoluten Fehler zu den Strömen aus Aufgabenteil a). [2.5 Pkt.]

Lösung:

Der Gesamtstrom I_q berechnet sich wie folgt:

$$
\begin{aligned}
R_{ges} &= R_q + (R_1||R_2) + R_3 \\
&= 2\ \Omega + \frac{20\ k\Omega \cdot 30\ k\Omega}{20\ k\Omega + 30\ k\Omega} + 15\ k\Omega \\
&= 2\ \Omega + 12\ k\Omega + 15\ k\Omega \\
&= 27,002\ k\Omega
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
I_q &= \frac{10\ V}{27,002\ k\Omega} \\
&= 0,37034\ mA \\
&= 370,34\ \mu A
\end{aligned}
$$

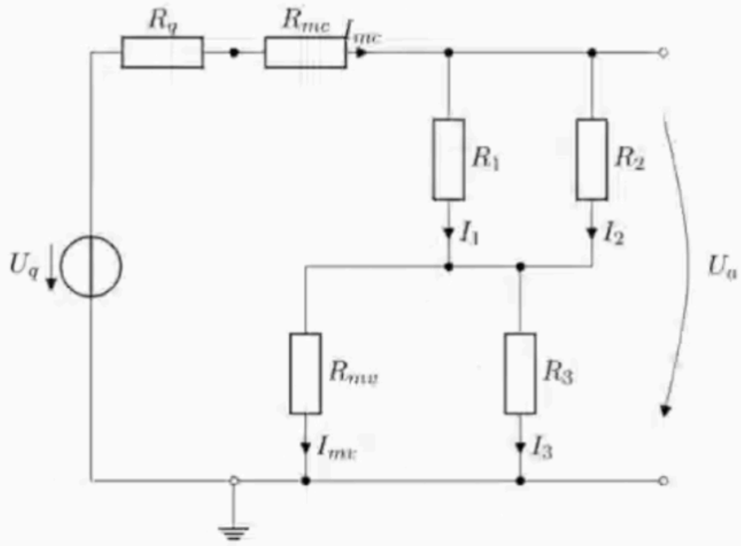
Somit berechnet sich I_3 und U_{R_3} wie folgt:

$$
\begin{aligned}
I_{R_3} &= I_q \\
&= 370,34\ \mu A \\
U_{R_3} &= R_3 \cdot I_{R_3} \\
&= 15\ k\Omega \cdot 370,34\ \mu A \\
&= 5,5551\ V
\end{aligned}
$$

Die Ströme I_1 und I_2 berechnen sich wie folgt:

$$
\begin{aligned}
U_{R_2} = U_{R_1} &= U_q - (I_q \cdot R_q) - U_{R_3} \\
&= 10\ V - 370,34\ \mu A \cdot 2\ \Omega - 5,5551\ V \\
&= 4,4441\ V
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
I_2 &= \frac{U_{R_2}}{R_2} \\
&= \frac{4,4441\ V}{30\ k\Omega} \\
&= 148,14\ \mu A \\
I_1 &= I_3 - I_2 \\
&= 370,34\ \mu A - 148,14\ \mu A \\
&= 222,20\ \mu A
\end{aligned}
$$



Der Gesamtstrom I_{mc} berechnet sich wie folgt:

$$
\begin{aligned}
R_{ges} &= R_q + R_{mc} + (R_1||R_2) + (R_3||R_{mv}) \\
&= 2\ \Omega + 8\ \Omega + \frac{20\ k\Omega \cdot 30\ k\Omega}{20\ k\Omega + 30\ k\Omega} + \frac{200\ k\Omega \cdot 15\ k\Omega}{200\ k\Omega + 15\ k\Omega} \\
&= 10\ \Omega + 12\ k\Omega + 13,953\ k\Omega \\
&= 25,963\ k\Omega \\
I_{mc} &= \frac{10\ V}{25,963\ k\Omega} \\
&= 385,16\ \mu A
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
I_3' &= I_{mc} \cdot \frac{R_{mv}}{R_{mv} + R_3} \\
&= 385,16\ \mu A \cdot \frac{200\ k\Omega}{200\ k\Omega + 15\ k\Omega} \\
&= 358,29 \mu A \\
I_2' &= I_{mc} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\
&= 385,16\ \mu A \cdot \frac{20\ k\Omega}{20\ k\Omega + 30\ k\Omega} \\
&= 154,06 \mu A \\
I_1' &= I_{mc} - I_2' \\
&= 385,16\ \mu A - 154,06 \mu A \\
&= 231,10 \mu A
\end{aligned}
$$

Der Gesamtstrom I_{mc} berechnet sich wie folgt:

$$
\begin{aligned}
R_{ges} &= R_q + R_{mc} + (R_1||R_2) + (R_3||R_{mv}) \\
&= 2\ \Omega + 8\ \Omega + \frac{20\ k\Omega \cdot 30\ k\Omega}{20\ k\Omega + 30\ k\Omega} + \frac{200\ k\Omega \cdot 15\ k\Omega}{200\ k\Omega + 15\ k\Omega} \\
&= 10\ \Omega + 12\ k\Omega + 13,953\ k\Omega \\
&= 25,963\ k\Omega \\
I_{mc} &= \frac{10\ V}{25,963\ k\Omega} \\
&= 385,16\ \mu A
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
I_3' &= I_{mc} \cdot \frac{R_{mv}}{R_{mv} + R_3} \\
&= 385,16\ \mu A \cdot \frac{200\ k\Omega}{200\ k\Omega + 15\ k\Omega} \\
&= 358,29 \mu A \\
I_2' &= I_{mc} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\
&= 385,16\ \mu A \cdot \frac{20\ k\Omega}{20\ k\Omega + 30\ k\Omega} \\
&= 154,06 \mu A \\
I_1' &= I_{mc} - I_2' \\
&= 385,16\ \mu A - 154,06 \mu A \\
&= 231,10 \mu A
\end{aligned}
$$

$I_3 = 370,34\ \mu A$	$I_3' = 358,29 \mu A$	$\epsilon_3 = 12,05\ \mu A$
$I_2 = 148,14 \mu A$	$I_2' = 154,06 \mu A$	$\epsilon_2 = -5,92\ \mu A$
$I_1 = 222,20\ \mu A$	$I_1' = 231,10 \mu A$	$\epsilon_1 = -8,90\ \mu A$