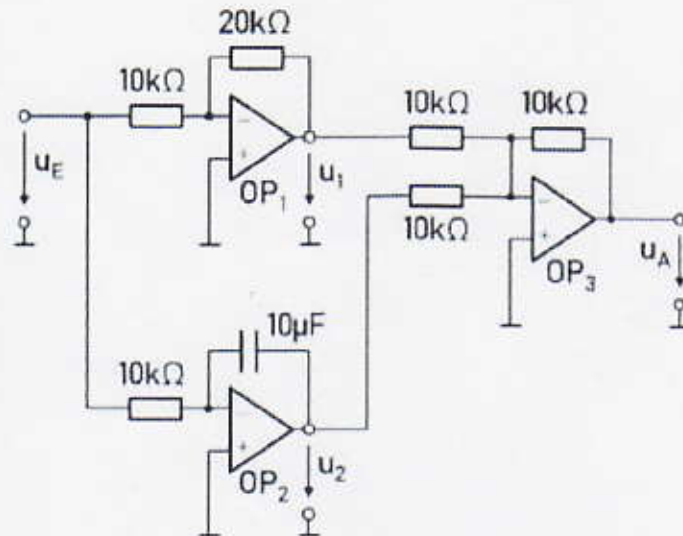


Aufg. 1

~~Aufgabe 2~~ (ca. 15 Punkte)

Die Abbildung zeigt die Schaltung eines „PI-Reglers“, der mit drei Operationsverstärkern aufgebaut wurde. In dieser Aufgabe soll die Reaktion der Schaltung auf einen Sprung der Eingangsspannung u_E analysiert werden – man spricht in diesem Zusammenhang auch von der „Sprungantwort“ der Schaltung.



Alle Operationsverstärker haben eine maximale Ausgangsspannung von ± 10 Volt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist der Kondensator nicht geladen, die Spannung $u_2(t = 0)$ beträgt 0 Volt.

2.1. Geben Sie die genaue Funktion der Verstärkerstufen OP₁, OP₂ und OP₃ an.

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen den Eingangs- und Ausgangsspannungen bei jeder der drei Teilschaltungen? (Formeln oder Skizzen angeben!)

$$\text{OP1: Inv. Verstärker, } v = -\frac{20}{10} = \underline{\underline{-2}}, \quad \underline{\underline{u_1 = -2 \cdot u_E}}$$

$$\text{OP3: Inv. Addierverstärker, } \underline{\underline{u_A = -(u_1 + u_2)}}$$

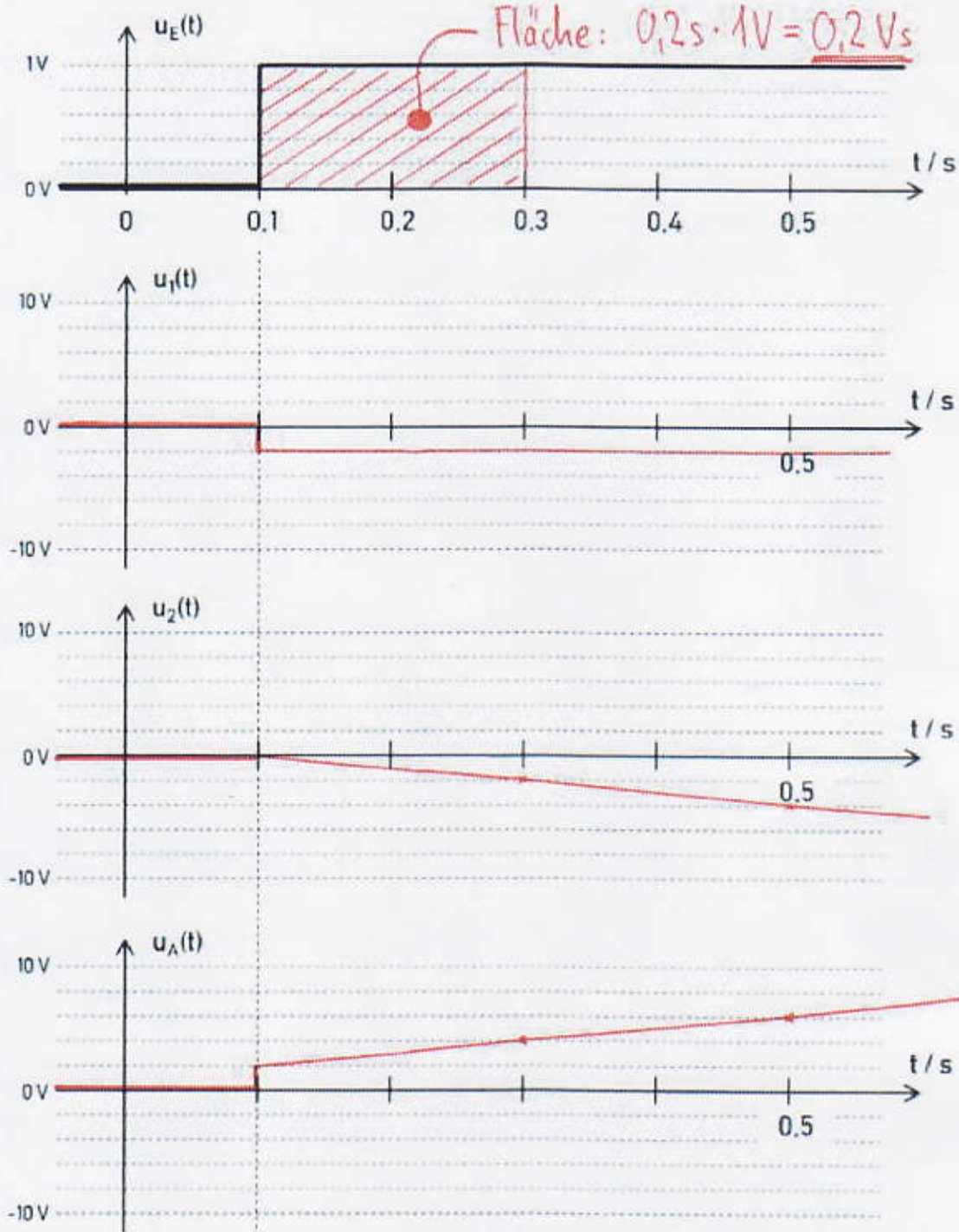
OP2: Inv. Integrator

$$u_2 = -\frac{1}{10\text{k}\Omega \cdot 10\mu\text{F}} \cdot \int u_E(t) dt = \underline{\underline{-\frac{10}{\text{s}} \cdot \int u_E(t) dt}}$$

Zum Zeitpunkt $t = 0,3 \text{ s}$:

$$u_2 = -\frac{10}{\text{s}} \cdot 0,2 \text{ Vs} = \underline{\underline{-2 \text{ V}}}$$

2.2. Zeichnen Sie die Verläufe von u_1 , u_2 und u_A in das folgende Diagramm. (Beachten Sie, dass der Kondensator zunächst nicht geladen ist!)



2.3. Zu welchem Zeitpunkt t_1 wird $u_A = 10$ Volt (maximale Ausgangsspannung)?

Weiterer Verlauf von $u_A(t)$: $\rightarrow \underline{t_1 = 0,9\text{s}}$

t	$0,1\text{s}$	$0,3\text{s}$	$0,5\text{s}$	$0,7\text{s}$	$0,9\text{s}$
$u_A(t)$	2V	4V	6V	8V	10V

Aufg. 2

Aufgabe 2 (ca. 16 Punkte)

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen integrierten ohmschen Widerstand aus Silizium. Er besteht aus vier über Metallbrücken (Widerstand der Brücken vernachlässigbar) in Serie geschalteten Halbleiter-Widerstandstreifen der Länge $l = 12,5 \mu\text{m}$ und Fläche $A = 20 \mu\text{m}^2$.

Legt man bei Raumtemperatur an den Anschlussklemmen eine Spannung $U = 5 \text{ V}$ an, fließt ein Strom von $I = 1 \text{ mA}$.

Das Silizium ist sowohl mit einem Akzeptor als auch mit einem Donator dotiert. Insgesamt handelt es sich um einen n-Halbleiter.

$$(n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}, e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C})$$

3.1. Berechnen Sie den spezifischen Widerstand ρ der Widerstandstreifen.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega, \quad \rho = R \cdot \frac{A}{4l} = \frac{5 \text{ k}\Omega \cdot 20 \cdot (10^{-6} \text{ m})^2}{4 \cdot 12,5 \cdot (10^{-6} \text{ m})} = \underline{\underline{0,002 \Omega \text{ m}}}$$

3.2. Berechnen Sie die Elektronendichte n_0 und die Löcherdichte p_0 des Halbleitermaterials. Hinweis: Der Einfluss der Minoritätsträger auf den spezifischen Widerstand kann vernachlässigt werden.

$$\text{n-Halbleiter} \rightarrow \rho \approx \frac{1}{e \cdot \mu_n \cdot n_0} \quad (\text{nur freie Elektronen berücksichtigt})$$

$$n_0 = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \frac{1 \text{ Vs}}{0,135 \text{ m}^2} \cdot \frac{1 \text{ A}}{0,002 \text{ Vm}} = \underline{\underline{2,312 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}}}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \underline{\underline{9,732 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}}}$$

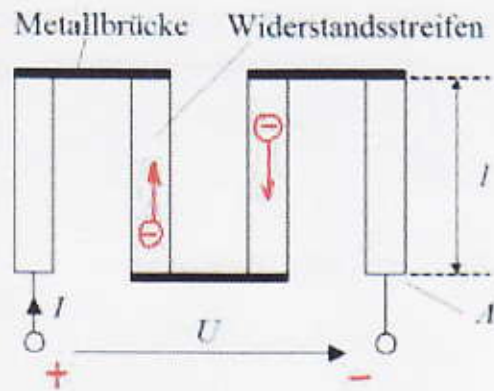
3.3. Für die Unterpunkte 3.3 und 3.4 beträgt $n_0 = 2,25 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ und $p_0 = 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$.

Weisen Sie durch Berechnung des Elektronenstroms I_n und des Löcherstroms I_p nach, dass der Majoritätsträgerstrom gegenüber dem Minoritätsträgerstrom vernachlässigbar gering ist.

$$I_n = n_0 \mu_n \cdot A \cdot e \cdot E \quad I_p = p_0 \mu_p \cdot A \cdot e \cdot E$$

$$\rightarrow I_n = \frac{2,25 \cdot 10^{22}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,135 \text{ m}^2}{\text{Vs}} \cdot 20 (10^{-6} \text{ m})^2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \frac{5 \text{ V}}{4 \cdot 12,5 \cdot (10^{-6} \text{ m})}$$

$$\rightarrow \underline{\underline{I_n = 0,97 \text{ mA}}}, \text{ entsprechend: } \underline{\underline{I_p = 1,54 \cdot 10^{-16} \text{ A}}} \ll I_n$$



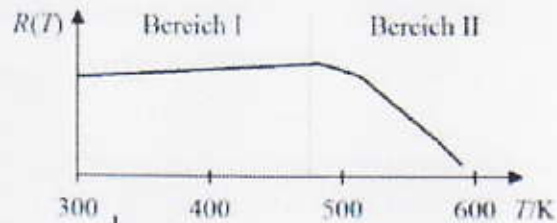
3.4. Die Akzeptordichte beträgt $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Berechnen Sie die Donatordichte N_D .

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

$$\rightarrow N_D = n_0 - p_0 + N_A = \underline{\underline{2,175 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}}}$$

3.5. Tragen Sie die Bewegungsrichtung der Elektronen in die Abbildung auf der vorherigen Seite ein.

3.6. Das nebenstehende Diagramm zeigt die Temperaturabhängigkeit des Halbleiterwiderstands. Erklären Sie den starken Abfall in Bereich II.



Thermische Generation von Ladungsträgerpaaren $\rightarrow n_i$ steigt an $\rightarrow \rho$ fällt ab.

3.7. Nennen Sie je zwei Donator- bzw. Akzeptorstoffe für Silizium (Si).

Donator 1: Arsen

Akzeptor 1: Aluminium

Donator 2: Phosphor

Akzeptor 2: Gallium

3.8. Wie groß ist die Majoritätsträgerdichte in Galliumarsenid (GaAs , $n_i = 1,3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$) bei Raumtemperatur, wenn 10^{14} Galliumatome pro cm^3 durch Arsenatome ersetzt werden? (Hinweis: Betrachten Sie den abgebildeten Ausschnitt aus dem Periodensystem. Werden an den Störstellen Löcher oder freie Elektronen in den Kristall eingebracht? Wie viele?)

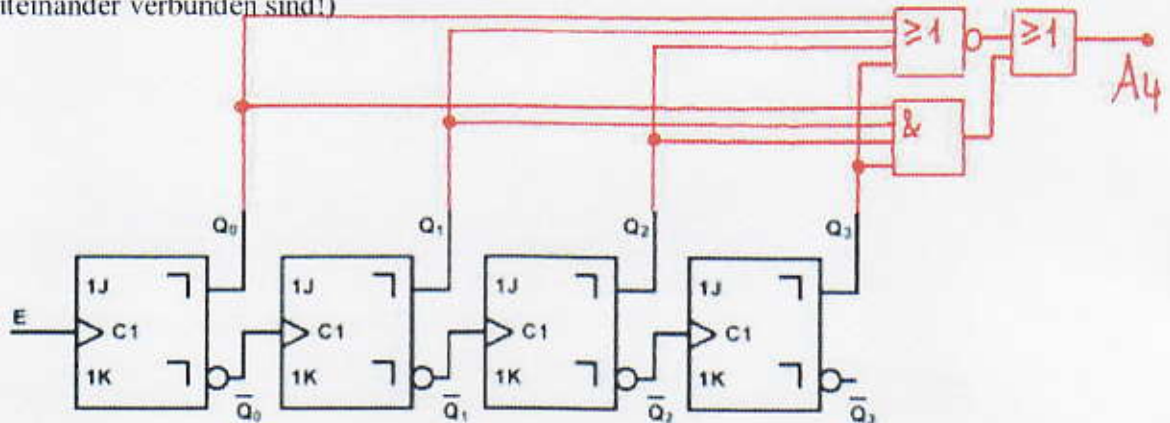
Wenn ein Gallium-Atom (3 Valenzelektronen) durch ein Arsen-Atom (5 Val.-El.) ersetzt wird, werden 2 freie Elektronen eingebracht.

					VIII a
III a	IV a	V a	VI a	VII a	2
5	6	7	8	9	10
B	C	N	O	F	Ne
11	12	14	16	19	20
13	14	15	16	17	18
Al	Si	P	S	Cl	Ar
27	28	31	32	36	40
31	32	33	34	35	36
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
70	73	75	79	80	84
49	50	51	52	53	54
In	Sn	Sb	Te	I	Xe
115	119	122	128	127	131

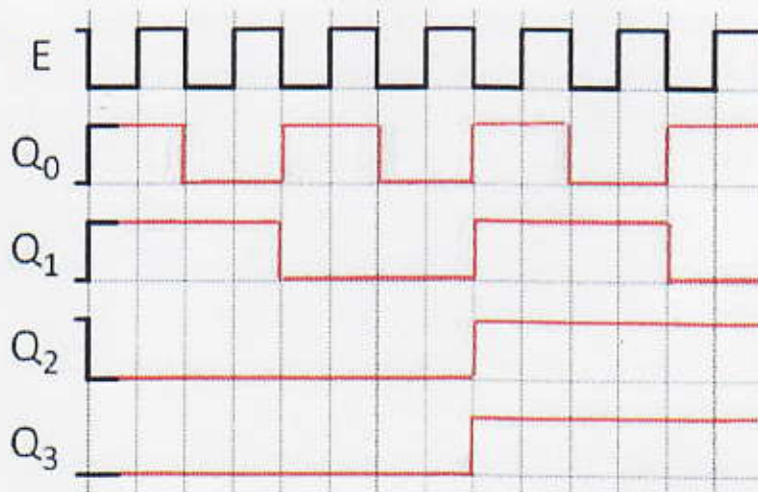
$$\rightarrow \underline{\underline{n_0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}}$$

Aufgabe 3 (ca. 12 Punkte)

Die Abbildung zeigt einen Dualzähler, der aus positiv flankengesteuerten JK-Master/Slave-Flipflops aufgebaut ist. (Hinweis: Beachten Sie, dass die Flipflops über die invertierten Ausgänge \bar{Q} miteinander verbunden sind!)



3.1. Vervollständigen Sie das folgende Zeitdiagramm für die Signale Q_0 , Q_1 , Q_2 und Q_3 .



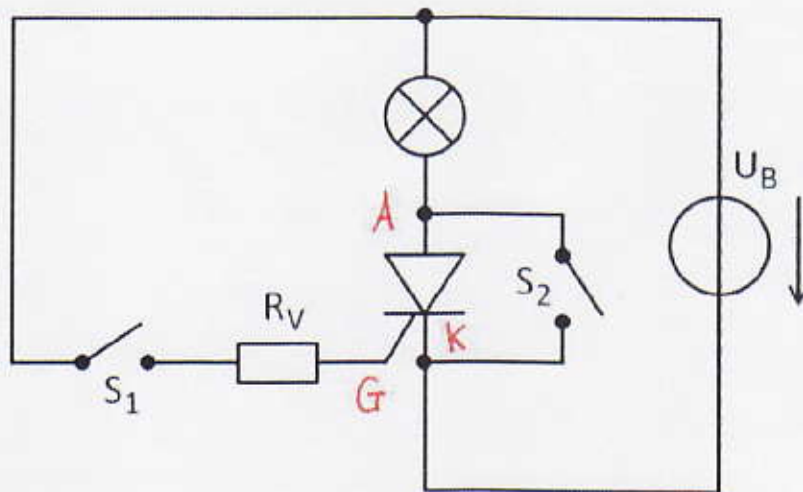
3.2. Handelt es sich bei dieser Schaltung um einen Vorwärts- oder Rückwärtszähler?

Rückwärtszähler!

3.3. Erweitern Sie die Schaltung um einen zusätzlichen Ausgang A_4 . Dieser Ausgang soll immer dann auf 1 gesetzt werden, wenn der Zählerstand 0000 oder 1111 beträgt. Bei allen anderen Zählerständen soll A_4 auf 0 gesetzt werden. (Zeichnen Sie Ihre Erweiterung direkt in die oben abgebildete Schaltung hinein!)

Aufgabe 4 (ca. 3 Punkte)

Eine Glühlampe wird von einer **Gleichspannungsquelle** U_B versorgt. Sie soll mit einem Thyristor ein- und ausgeschaltet werden. Der Thyristor kann gezündet werden, indem einer der beiden Schalter kurz betätigt wird. Das Löschen des Thyristors ist ebenfalls durch eine kurze Betätigung eines Schalters möglich.



- 4.1. Welcher der beiden Schalter S_1 oder S_2 muss (kurz) betätigt werden, um den Thyristor zu zünden? (Begründung erforderlich!)

Der Thyristor wird durch (kurzen) Stromfluss am Gate gezündet \rightarrow Schalter S_1

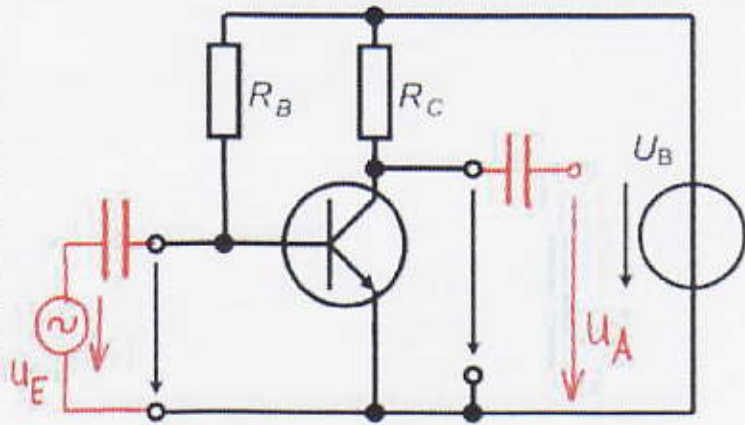
- 4.2. Welcher der beiden Schalter S_1 oder S_2 muss (kurz) betätigt werden, um den Thyristor wieder zu löschen? (Begründung erforderlich!)

Durch Betätigung von Schalter S_2 wird der gesamte Last-Stromfluss am Thyristor vorbei geleitet. Im Thyristor wird der Haltestrom unterschritten. \rightarrow Der Thyristor wird gelöscht.

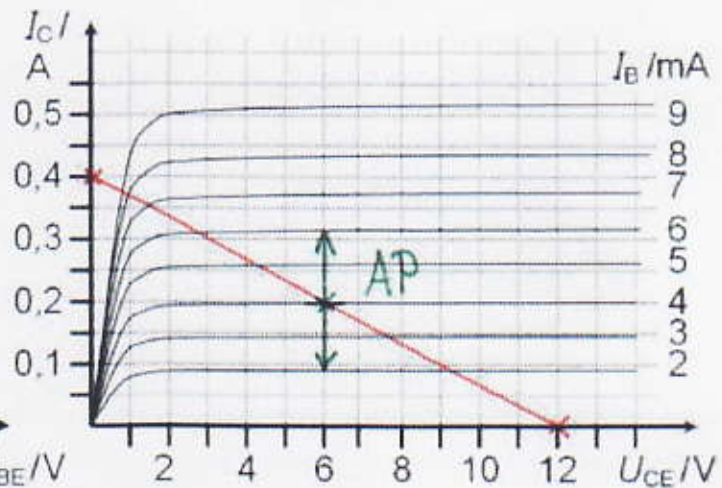
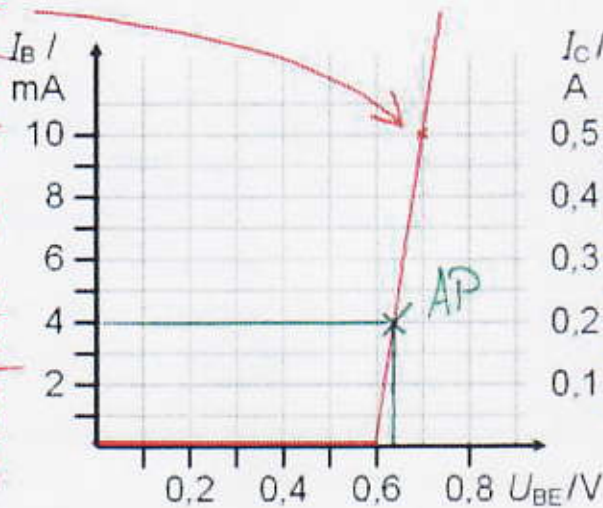
Aufg. 5

Aufgabe 1 (ca. 15 Punkte)

In der dargestellten Verstärkerschaltung ist ein Transistor mit dem abgebildeten Ausgangskennlinienfeld eingesetzt. Die Schaltung wird mit $U_B = 12\text{ V}$ versorgt, der Widerstand R_C hat einen Wert von $30\ \Omega$. Die Kenngrößen der Basis-Emitter-Diode des Transistors sind: $r_{BE} = 10\ \Omega$, Schwellenspannung $U_S = 0.6\text{ V}$.



Schnittpunkt bei 0,7V / 10 mA



4.1. Zeichnen Sie die Eingangskennlinie $I_B(U_{BE})$ des Transistors in das Diagramm ein.

4.2. Zeichnen Sie die Arbeitsgerade in das Ausgangskennlinienfeld des Transistors ein. $\frac{12\text{V}}{30\ \Omega} = 0,4\text{ A}$

4.3. Wählen Sie einen sinnvollen Arbeitspunkt für die Verstärkerschaltung. Zeichnen Sie den Arbeitspunkt in die Eingangskennlinie und in das Ausgangskennlinienfeld ein. $I_B = 4\text{ mA}$

4.4. Bestimmen Sie grafisch oder rechnerisch die Stromverstärkung B , die Kleinsignalstromverstärkung β und die Steilheit S im Arbeitspunkt.

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0,2\text{ A}}{0,004\text{ A}} = \underline{\underline{50}}$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE} = \text{konst.}} = \frac{(0,32 - 0,09)\text{ A}}{(6 - 2)\text{ mA}} = \underline{\underline{57,5}}$$

$$S = \frac{\beta}{r_{BE}} \quad \text{mit} \quad r_{BE} \approx \frac{U_T}{I_B} = \frac{26\text{ mV}}{4\text{ mA}} = 6,5\ \Omega$$

$$\rightarrow S = \frac{57,5}{6,5\ \Omega} = \underline{\underline{8,85\ \frac{1}{\Omega}}}$$

- 4.5. Eine Spannung u_E mit sinusförmigem Verlauf und einer Amplitude von 10 mV (siehe Grafik unten) soll durch die Schaltung verstärkt werden, am Ausgang soll der reine Wechselanteil u_A der verstärkten Wechselspannung abgegriffen werden.

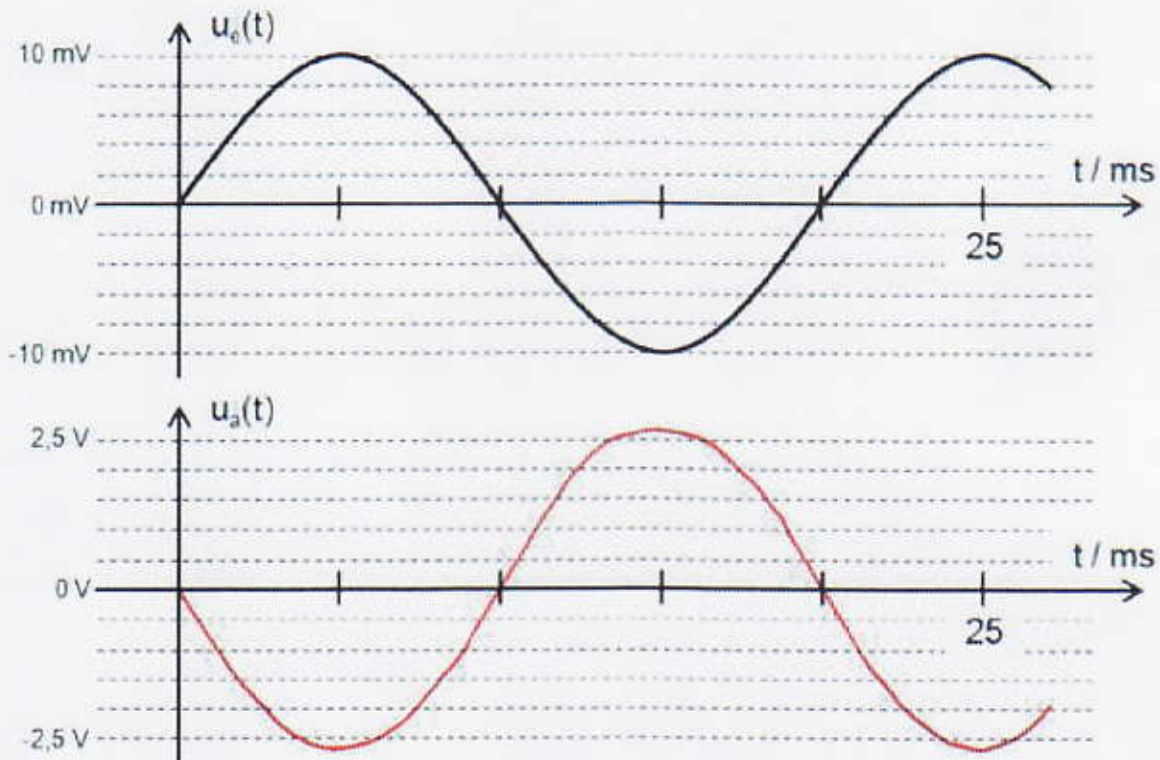
Ergänzen Sie die Schaltung auf der vorherigen Seite entsprechend mit Wechselspannungsquelle und ggf. weiteren Komponenten so, dass der Arbeitspunkt der Schaltung erhalten bleibt und am Ausgang eine reine Wechselspannung anliegt.

- 4.6. Bestimmen Sie grafisch oder rechnerisch die Ausgangsspannung u_A zu dem Zeitpunkt, zu dem die Eingangsspannung +10 mV beträgt.

$$v = -S \cdot R_c = -8,85 \frac{1}{\Omega} \cdot 30 \Omega = -265,5$$

$$u_A = -265,5 \cdot 10 \text{ mV} = \underline{\underline{-2,66 \text{ V}}}$$

- 4.7. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung u_A maßstabsgetreu in das folgende Diagramm ein.



- 4.8. Wie groß ist die Spannungsverstärkung v_u der Verstärkerschaltung?

$$v_u = \underline{\underline{-265,5}} \quad (\text{siehe 4.6})$$

--- Viel Erfolg!!! ---