

**„Mess- und Schaltungstechnik“**

Beachten Sie folgende Hinweise:

- Füllen Sie als Erstes das Deckblatt aus.
- Prüfen Sie die Vollständigkeit der Klausur. (8 Aufgabenblätter)
- Es sind keine Hilfsmittel (z.B. Formelsammlung oder Taschenrechner) erlaubt. Smartwatches und Telefone sind im Rucksack oder in der Tasche zu verstauen.
- Verwenden Sie keinen Bleistift oder Rotstift.
- Benutzen Sie für eine neue Aufgabe ein neues Blatt.
- In den Aufgaben können 118 Punkte erreicht werden. Die Note 1,0 ist ab 96 Punkten erreicht.
- Die Zahlen vor den Unterpunkten geben die Teilpunkte der jeweiligen Teilaufgabe an.

**Viel Erfolg!**

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Matrikelnummer: Musterlösung

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Aufgabe	Punkte
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
Zusatzpkt.	
Summe	

Note	
------	--

## Aufgabe 1: (18 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 1.1 mit den idealen Transistoren  $T_1$  und  $T_2$ . Es gelte  $U_{BE,1} = U_{BE,2} = 0,6\text{ V}$ ,  $U_A \rightarrow \infty$ ,  $B_1 = \beta_1 = 100$  und  $B_2 = \beta_2 \rightarrow \infty$ . Die Betriebsspannung beträgt  $U_B = 10\text{ V}$ . Für die Kondensatoren gelte  $C_{in} = C_{out} = C_1 \rightarrow \infty$ .

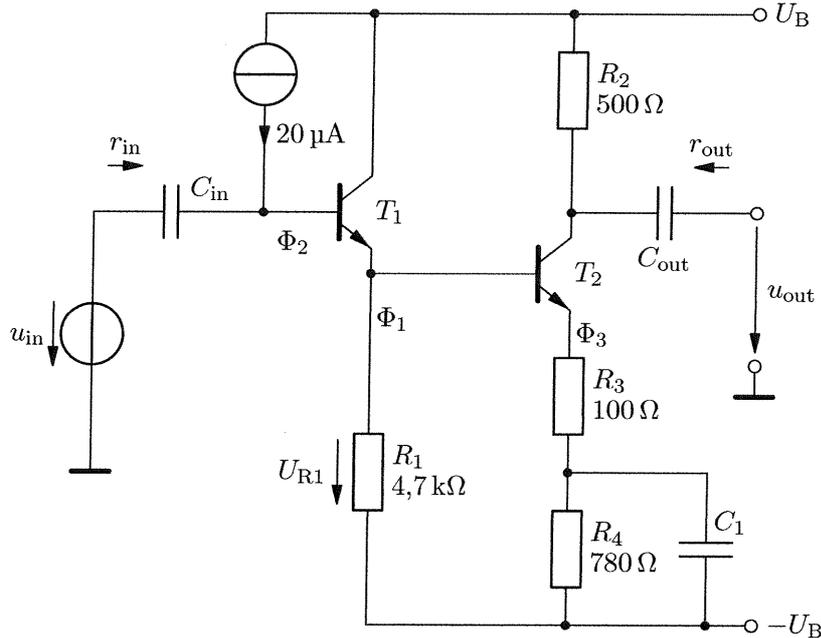


Abbildung 1.1

- 2 a) In welchen Grundschaltungsarten werden die Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  betrieben?
- 2 b) Bestimmen Sie den Kollektorstrom  $I_{C1}$  des Transistors  $T_1$ , die Spannung  $U_{R1}$  und das Potential  $\Phi_1$  im Arbeitspunkt.
- 1 c) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_2$  im Arbeitspunkt.
- 2 d) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_3$  und den Kollektorstrom  $I_{C2}$  des Transistors  $T_2$  im Arbeitspunkt.
- 4 e) Zeichnen Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung.
- 2 f) Welche Verstärkung  $v = \frac{u_{out}}{u_{in}}$  ergibt sich in dieser Schaltung?  
*Hinweis: Verwenden Sie Ihnen bekannte, geeignete Näherungen.*
- 2 g) Wie groß sind der Eingangswiderstand  $r_{in}$  und der Ausgangswiderstand  $r_{out}$ ?
- 1 h) Bestimmen Sie die Verlustleistung  $P_{V,T2}$  des Transistors  $T_2$  im Arbeitspunkt. *Hinweis: Vernachlässigen Sie den Basisstrom.*
- 1 i) Bestimmen Sie die Verlustleistung  $P_{V,ges}$  der gesamten Schaltung im Arbeitspunkt. *Hinweis: Vernachlässigen Sie die Basisströme.*
- 1 j) Nun ist der Kondensator  $C_{in}$  kurzgeschlossen. Welche Auswirkung hat dies auf die Funktion der Schaltung?

Aufgabe: 1

a)  $T_1$  Kollektorschaltung,  $T_2$  Emitterschaltung

b)  $I_{C1} = I_{B1} \cdot \beta_1 = 100 \cdot 90 \mu\text{A} = 9 \text{ mA}$

$$U_{R1} = I_{C1} \cdot R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ mA} = 9,4 \text{ V}$$

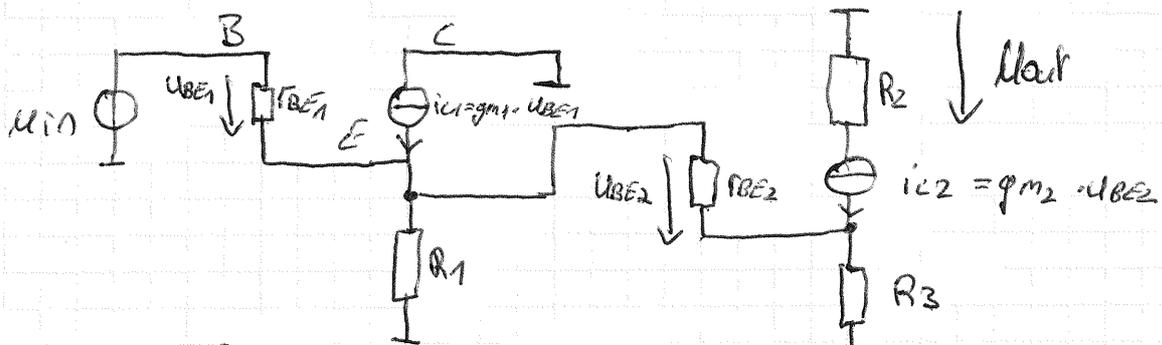
$$\phi_1 = -U_B + U_{R1} = -0,6 \text{ V}$$

c)  $\phi_2 = \phi_1 + U_{BE1} = 0 \text{ V}$

d)  $\phi_3 = \phi_1 - U_{BE2} = -1,2 \text{ V}$

$$I_{E2} = \frac{\phi_3 - (-U_B)}{R_3 + R_4} = \frac{8,8 \text{ V}}{880 \Omega} = 10 \text{ mA} = I_{C2}$$

e)



f) 
$$V_1 = \frac{R_1}{\frac{1}{g_{m1}} + R_1} = \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{\frac{25 \text{ mA}}{2 \text{ mA}} + 4,7 \text{ k}\Omega} \approx 1$$

$$V_2 = \frac{-R_2}{R_3} \approx -5$$

$$V = V_1 \cdot V_2 \approx -5$$

Aufgabe: 1

$$\begin{aligned}h) U_{CE} &= U_{ges} - U_{R2} - U_{R3, R4} \\ &= 2U_B - U_{R2} - U_{R3, R4} \\ &= 20V - 5V - 8,8V = 6,2V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{V_{T2}} &= U_{CE} \cdot I_{C2} \\ &= 6,2V \cdot 10mA = 62mW\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i) P_{V_{ges}} &= U_{ges} \cdot I_{ges} = 2 \cdot U_B \cdot (I_{C1} + I_{C2}) \\ &= 20V \cdot 12mA \\ &= 240mW\end{aligned}$$

j) Dies hat keine Auswirkung, da das Basispotential des Transistors  $T_1$  bereits zuvor 0V beträgt.  
Ohne  $C_{in}$  liegt  $\phi_1$  durch  $U_{in}$  im AP ebenfalls auf 0V, sodass der AP nicht verändert wird.



Aufgabe: 2

a)  $\phi_1 = \phi_2 = 2,5V$

b)  $I_1 = 5mA$  ,  $I_2 = 0mA$  ,  $I_7 = 5mA$  ,  $I_8 = 0mA$

c) Stromspiegel

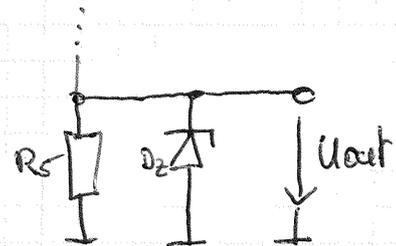
d)  $I_4 = 0mA$  ,  $I_5 = 5mA$

e)  $U_{out} = R_5 (I_4 + I_5) = 5V$

f)  $I_4 = 5mA$  ,  $I_5 = 0mA$

g)  $U_{out} = 5V$

h) siehe Tabelle 1

i) Bauelement: z-Diode  
mit  $U_z = 5V$ 

j) NAUD

### Aufgabe 3: (16 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 3.1 mit den Transistoren  $T_1$  bis  $T_4$ . Die Transistoren seien vom gleichen Typ mit folgenden Eigenschaften:  $B = \beta \rightarrow \infty$ ,  $U_A \rightarrow \infty$ ,  $U_T = 25 \text{ mV}$  und  $I_{S,1} = I_{S,2} = I_{S,3} = I_{S,4} = I_S$ .

Hinweis:  $\ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b)$ ,  $\ln\left(\frac{a}{b}\right) = \ln(a) - \ln(b)$

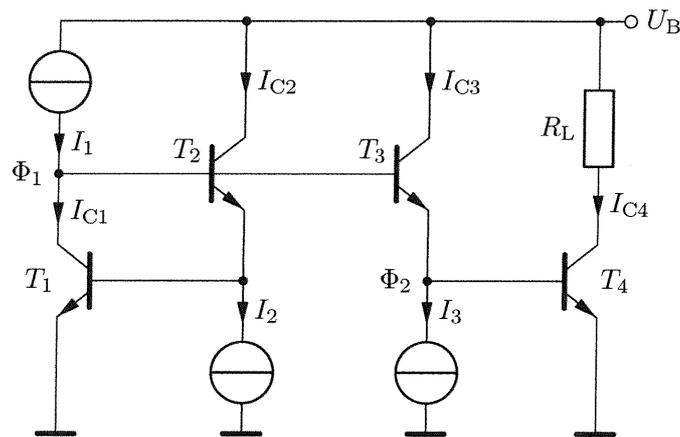


Abbildung 3.1

Geben Sie alle Ergebnisse (sofern nicht anders angegeben) als Funktion von  $I_1, I_2, I_3, I_S$  und  $U_T$  an.

- 2 a) Bestimmen Sie den Strom  $I_{C1}$ .
- 2 b) Bestimmen Sie den Strom  $I_{C2}$ .
- 2 c) Bestimmen Sie die Basis-Emitter-Spannungen  $U_{BE,1}$  und  $U_{BE,2}$  der Transistoren  $T_1$  sowie  $T_2$ . Hinweis: Nutzen Sie die vereinfachte Shockley-Gleichung.
- 2 d) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_1$ .
- 2 e) Bestimmen Sie den Strom  $I_{C3}$ .
- 2 f) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_2$ .
- 2 g) Bestimmen Sie allgemein den Strom  $I_{C4} = f(\Phi_2, I_S, U_T)$ .
- 2 h) Geben Sie den Strom  $I_{C4}$  als Funktion der Ströme  $I_1$  bis  $I_3$  an,  $I_{C4} = f(I_1, I_2, I_3)$ .

Aufgabe: 3

$$a) I_{C1} = I_1$$

$$b) I_{C2} = I_2$$

$$c) I_{C1} = I_S \cdot e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}}$$

$$U_{BE1} = U_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right) = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_S}\right)$$

$$I_{C2} = I_S \cdot e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}}$$

$$U_{BE2} = U_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right) = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_S}\right)$$

$$d) \phi_1 = U_{BE1} + U_{BE2}$$

$$= U_T \cdot \ln\left(\frac{I_1 I_2}{I_S^2}\right)$$

$$e) I_{C3} = I_3$$

$$f) \phi_2 = \phi_1 - U_{BE3}$$

$$= U_T \left( \ln\left(\frac{I_1 I_2}{I_S^2}\right) - \ln\left(\frac{I_3}{I_S}\right) \right)$$

$$= U_T \cdot \ln\left(\frac{I_1 \cdot I_2}{I_S \cdot I_3}\right)$$

$$g) I_{C4} = I_S \cdot e^{\frac{\phi_2}{U_T}}$$

$$h) I_{C4} = \frac{I_1 \cdot I_2}{I_3}$$

### Aufgabe 4: (16 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 4.1 mit idealen Bauelementen. Weiterhin gelte für den Transistor  $B = \beta \rightarrow \infty$ , für die Widerstände  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 10 \Omega$  und für die Eingangsquelle  $U_{\text{in}} \geq 1 \text{ V}$ .  $R_2$  ist ein Potentiometer mit der Stellung  $0 \leq x \leq 1$ .

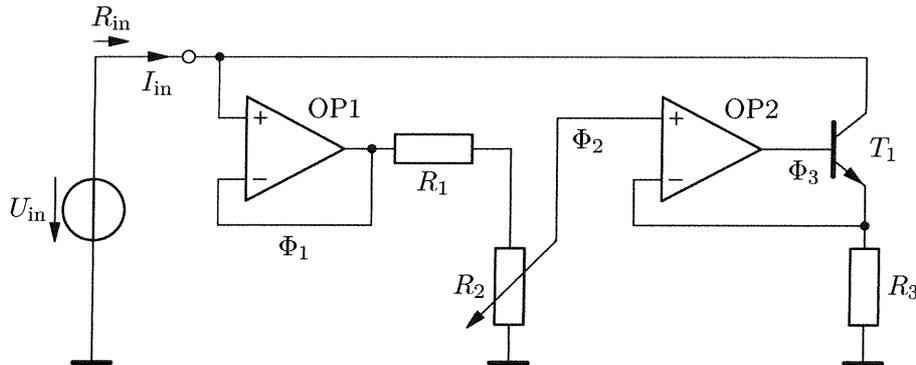
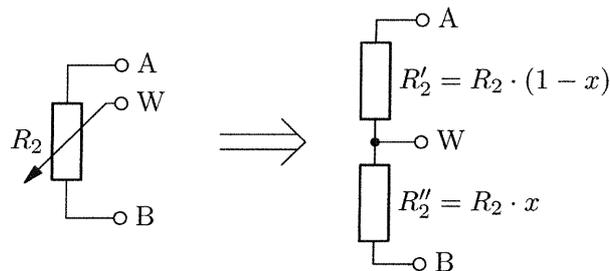


Abbildung 4.1

- 2 a) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_1$  am Ausgang des Operationsverstärkers OP1 als Funktion von  $U_{\text{in}}$ .
- 3 b) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_2$  am positiven Eingang des Operationsverstärkers OP2 als Funktion der Potentiometerstellung  $x$  und der Eingangsspannung  $U_{\text{in}}$ . *Hinweis: Das Potentiometer kann durch nachfolgendes Ersatzschaltbild ersetzt werden.*



- 2 c) Bestimmen Sie die Spannung  $U_{R_3}$  am Widerstand  $R_3$  als Funktion von  $x$  und  $U_{\text{in}}$ .
- 3 d) Bestimmen Sie den Eingangsstrom  $I_{\text{in}}$  als Funktion von  $x$  und  $U_{\text{in}}$ .
- 4 e) Bestimmen Sie den Großsignal-Eingangswiderstand  $R_{\text{in}}$  als Funktion von  $x$ . *Hinweis: Verwenden Sie das Ergebnis aus Aufgabe d).*
- 2 f) Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit  $\frac{d\Phi_3}{dT}$  des Potentials am Ausgang des Operationsverstärkers OP2.

Aufgabe: 4

$$a) \phi_1 = U_{in}$$

$$b) \phi_2 = U_{in} \cdot \frac{x R_2}{R_1 + x R_2 + R_2 (1-x)}$$
$$= U_{in} \cdot \frac{x R_2}{R_1 + R_2} = \frac{x}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \cdot U_{in}$$

da  $R_1 = R_2$

$$= \frac{1}{2} x \cdot U_{in}$$

$$c) U_{R_3} = \phi_2 = \frac{1}{2} x \cdot U_{in}$$

$$d) I_{R_3} = \frac{1}{2} x \cdot \frac{U_{in}}{R_3}$$

$$e) R_{in} = \frac{U_{in}}{\frac{1}{2} x \cdot \frac{U_{in}}{R_3}} = \frac{2 R_3}{x}$$

$$f) \frac{d\phi_3}{dt} = -2 \text{ mV/k}$$

### Aufgabe 5: (14 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 5.1 mit idealen Bauelementen. Für die Widerstände gelte  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \gg R_L$ .

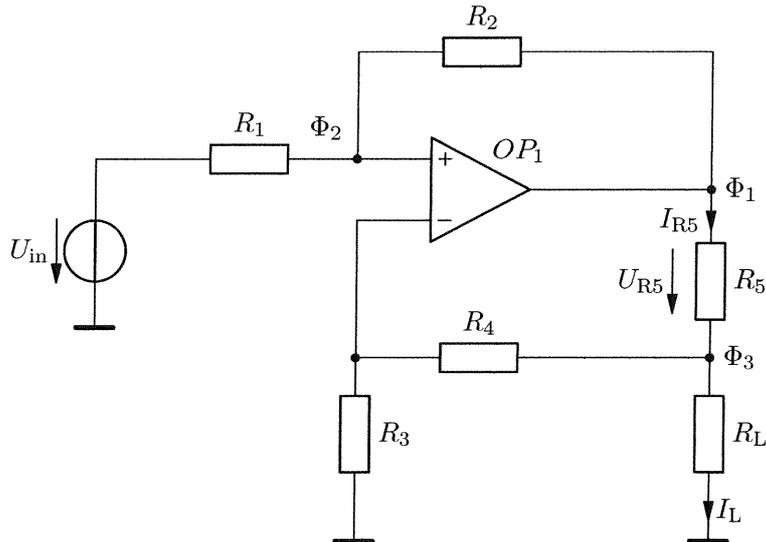


Abbildung 5.1

- 3 a) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_2 = f(U_{\text{in}}, \Phi_1, R)$ . *Hinweis: Das Superpositionsverfahren kann angewendet werden.*
- 2 b) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_3 = f(\Phi_2, R)$ .
- 1 c) Bestimmen Sie das Potential  $\Phi_3 = f(U_{\text{in}}, \Phi_1, R)$ . *Hinweis: Verwenden Sie die Ergebnisse aus Aufgabe a) und b).*
- 2 d) Bestimmen Sie die Spannung  $U_{R5}$  und den Strom  $I_{R5}$ .
- 2 e) Bestimmen Sie den Strom  $I_L$ . *Hinweis:  $R \gg R_L$ .*
- 2 f) Der Lastwiderstand ist nun  $R'_L = 2R_L$ . Bestimmen Sie jetzt den Strom  $I_L$ .
- 2 g) Welche Funktion erfüllt diese Schaltung?

Aufgabe: 5

$$a) \phi_2 = \frac{1}{2} (\phi_1 + U_{in})$$

$$b) \phi_3 = 2\phi_2$$

$$c) \phi_3 = \phi_1 + U_{in}$$

$$d) U_{R5} = \phi_1 - \phi_3 = -U_{in}$$

$$I_{R5} = -\frac{U_{in}}{R5}$$

$$e) I_L = -\frac{U_{in}}{R5} = I_{R5}, \text{ da } 2R \Rightarrow R_L$$

$$f) R_L' = 2 \cdot R_L$$

$$I_L = -\frac{U_{in}}{R5} \neq f(R_L)$$

g) Spannungsgesteuerte Stromquelle

## Aufgabe 6: (20 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 6.1 mit einem idealen Operationsverstärker. Die Dioden können als ideal mit einer Flussspannung von 0,6 V angesehen werden. Die Diode  $D_2$  weist eine Durchbruchspannung von 3 V auf.

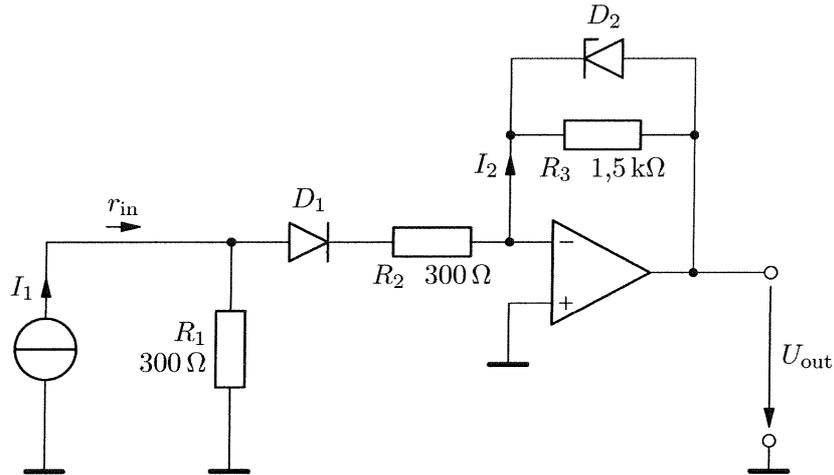


Abbildung 6.1

- 4 a) Geben Sie die Bedingung für den Strom  $I_1$  an, damit die Diode  $D_1$  leitet.
- 4 b) Zeichnen Sie den Verlauf des Stroms durch die Diode  $D_1$   $I_{D1} = f(I_1)$  in das Diagramm aus Abbildung 6.2 für  $-10 \text{ mA} \leq I_1 \leq 10 \text{ mA}$ . *Hinweis: Wählen Sie korrekte Achsenkalibrierungen.*
- 3 c) Geben Sie die Bedingung für den Strom  $I_2$  an, damit die Diode  $D_2$  leitet.
- 3 d) Geben Sie die Bedingung für den Strom  $I_1$  an, damit die Diode  $D_2$  leitet. *Hinweis: Nehmen Sie das Ergebnis aus Aufgabe b) zu Hilfe.*
- 4 e) Zeichnen Sie den Verlauf der Spannung  $U_{\text{out}} = f(I_1)$  in das Diagramm aus Abbildung 6.3 für  $-10 \text{ mA} \leq I_1 \leq 10 \text{ mA}$ . *Hinweis: Wählen Sie korrekte Achsenkalibrierungen.*
- 2 f) Bestimmen Sie jeweils für  $I_1 = 0$  und  $I_1 = 10 \text{ mA}$  den Eingangswiderstand  $r_{\text{in}}$  der Schaltung.

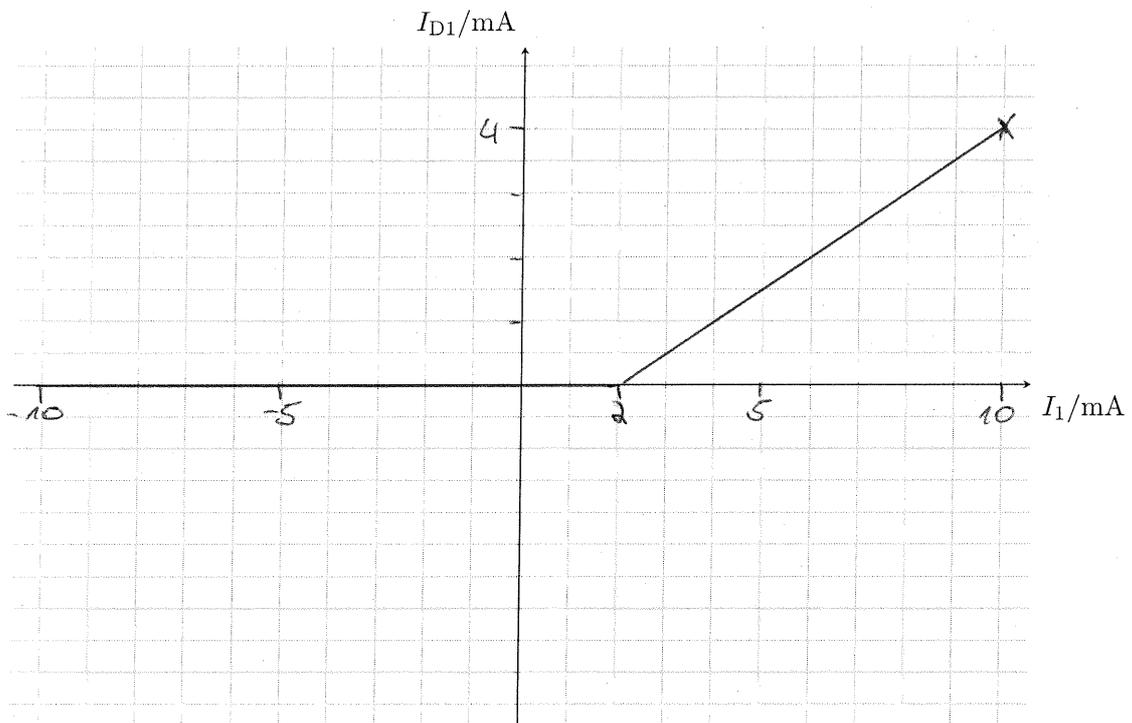


Abbildung 6.2: Diagramm Aufgabe 6 b)

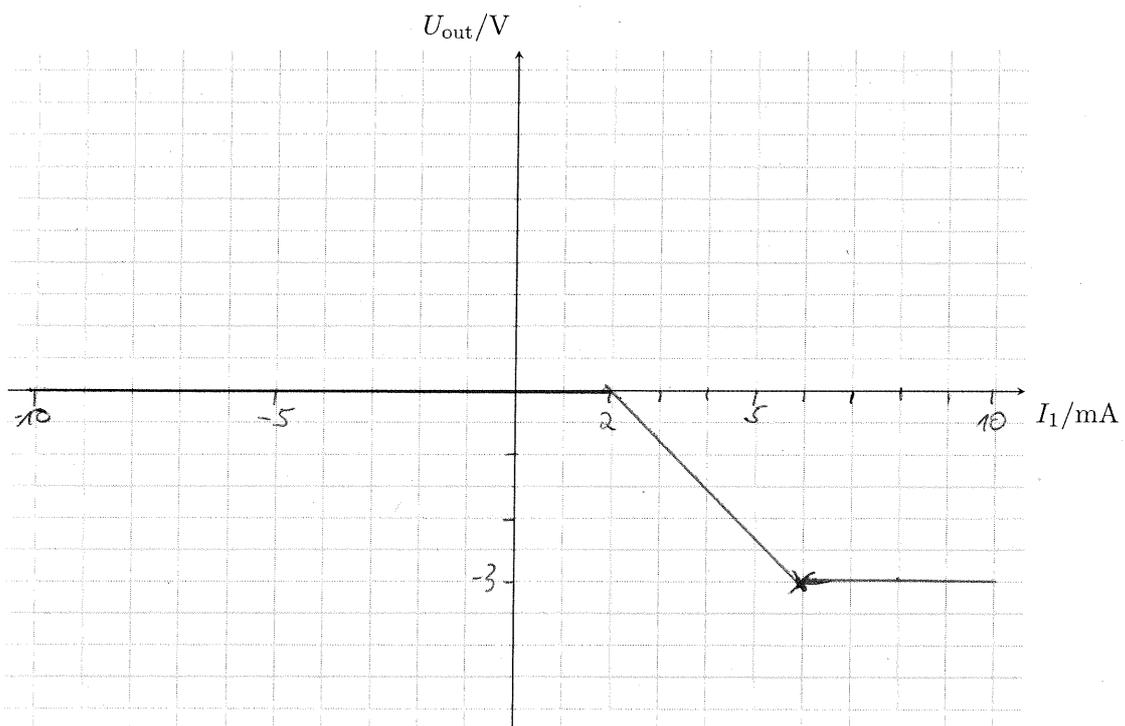


Abbildung 6.3: Diagramm Aufgabe 6 e)

Aufgabe: 6

a)  $D_1$  leitet für  $I_1 > \frac{0,6V}{R_1} = 2\text{mA}$ , sonst sperrend

b) für  $I_1 > 2\text{mA}$

$$I_{D1} \cdot R_2 + 0,6V = I_{R1} \cdot R_1 = (I_1 - I_{D1}) \cdot R_1$$

$$I_{D1} \cdot R_2 + I_{D1} \cdot R_1 = I_1 \cdot R_1 - 0,6V$$

$$I_{D1} = \frac{I_1 \cdot R_1 - 0,6V}{R_1 + R_2}$$

$$I_1 = 10\text{mA}: I_{D1} = \frac{10\text{mA} \cdot 300\Omega - 0,6V}{300\Omega + 300\Omega}$$

$$I_{D1} = \frac{2,4V}{600\Omega} = 4\text{mA}$$

$$c) I_2 = \frac{3V}{1,5k\Omega} = 2\text{mA}$$

$D_2$  leitet für  $I_2 > 2\text{mA}$

d)  $I_2 \stackrel{!}{=} I_{D1}$

$$I_{D1} \cdot R_2 + 0,6V = (I_1 - I_{D1}) \cdot R_1$$

$$I_1 = \frac{I_{D1} (R_1 + R_2) + 0,6V}{R_1}$$

$$= \frac{2\text{mA} \cdot 600\Omega + 0,6V}{300\Omega}$$

$$= \frac{1,2V + 0,6V}{300\Omega} = 6\text{mA}$$

Da leitet für  $I_1 > 6\text{mA}$

Aufgabe: 6

e) siehe Abb. G.3

f)  $I_1 = 0 \Rightarrow D_1$  sperrend  
 $\Rightarrow r_{in} = R_1 = 300 \Omega$

$I_1 = 10 \text{ mA} \Rightarrow D_1$  leitend,  $r_D \ll R_2$   
 $\Rightarrow r_{in} = R_1 \parallel (r_D + R_2) \approx 150 \Omega$

## Aufgabe 7: (18 Punkte)

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 7.1. Die Kondensatoren seien ideal und besitzen eine Kapazität von  $C_1 = C_2 = 20 \text{ mF}$ . Die Dioden  $D_1$  und  $D_2$  seien ebenfalls ideal (Flussspannung  $U_D = 0 \text{ V}$ ). Bei  $U_1$  handelt es sich um eine periodische, pulsformige Spannungsquelle, deren Verlauf in Abbildung 7.2 dargestellt ist.

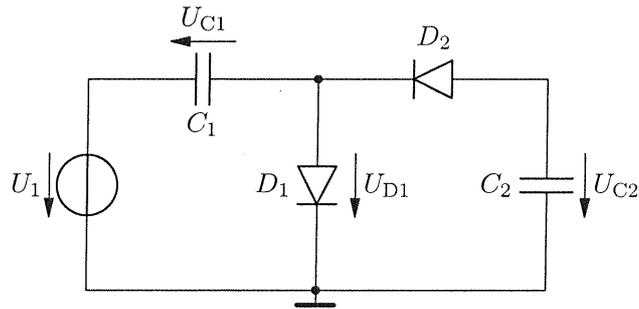


Abbildung 7.1

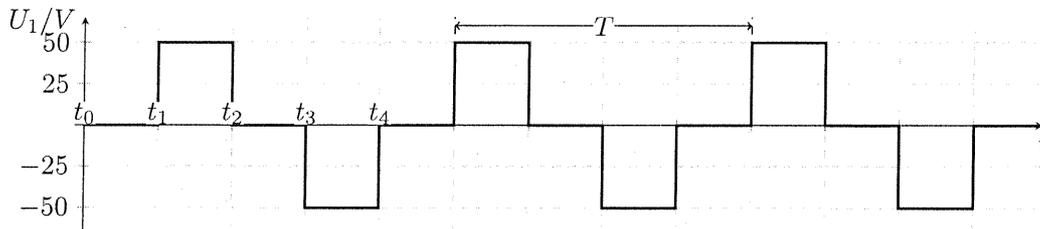


Abbildung 7.2: Spannungsverlauf von  $U_1$

$C_1$  und  $C_2$  seien zunächst vollständig entladen. Im Intervall  $(t_0, t_1)$  beträgt die Spannung  $U_1$  zunächst  $0 \text{ V}$ . Zum Zeitpunkt  $t_1$  springt  $U_1$  auf  $50 \text{ V}$ . *Hinweis: Geben Sie jeweils die Werte an, die sich statisch gegen Ende des jeweiligen Intervalls einstellen!*

- 2 a) Welche Spannung  $U_{D1}$  stellt sich gegen Ende des Intervalls  $(t_1, t_2)$  über der Diode  $D_1$  ein?
- 2 b) Welche Spannung  $U_{C1}$  stellt sich gegen Ende des Intervalls  $(t_1, t_2)$  über dem Kondensator  $C_1$  ein?
- 2 c) Welche Ladung weist Kondensator  $C_1$  gegen Ende des Intervalls  $(t_1, t_2)$  auf?

Zum Zeitpunkt  $t_2$  springt  $U_1$  erneut auf  $0 \text{ V}$ .

- 2 d) Beschreiben Sie das Verhalten der Dioden in dem Intervall  $(t_2, t_3)$ .
- 2 e) Wie teilt sich die unter b) berechnete Ladung jetzt unter  $C_1$  und  $C_2$  auf? Geben Sie die Spannungen  $U_{C1}$  und  $U_{C2}$  an, welche sich gegen Ende des Intervalls  $(t_2, t_3)$  einstellen.

Zum Zeitpunkt  $t_3$  springt  $U_1$  nun auf  $-50 \text{ V}$ .

- 2 f) Beschreiben Sie das Verhalten der Dioden in dem Intervall  $(t_3, t_4)$ .
- 2 g) Geben Sie die Spannungen  $U_{C1}$  und  $U_{C2}$  an, welche sich gegen Ende des Intervalls  $(t_3, t_4)$  einstellen.
- 4 h) Welche Spannung  $U_{C2}$  stellt sich für  $t \rightarrow \infty$  ein?

## Aufgabe: 7

- a) Diode  $D_1$  ist leitend, also  $U_{D_1} = 0V$
- b)  $U_{C_1} = -50V$
- c)  $Q_{C_1} = C_1 \cdot U_{C_1} = 20mF \cdot (-50V) = -1As = -1C$
- d) Der Ladungsaustausch zwischen  $C_1$  &  $C_2$  fließt über  $D_2$ ,  $D_1$  sperrt
- e) Pfeilrichtung beachten:  
 $I_{C_1} = -I_{C_2} \Rightarrow \Delta Q_{C_1} = -\Delta Q_{C_2}$  mit  $C_1 = C_2$   
 also,  $\Delta U_{C_1} = -\Delta U_{C_2} = \Delta U_C$   
 da  $U_{D_2}$  und  $U_1 = 0V \Rightarrow U_{C_1} = U_{C_2}$   
 demnach  $-50V + \Delta U_C = 0V - \Delta U_C \Rightarrow \Delta U_C = -25V$   
 $\Rightarrow U_{C_1} = -25V$ ,  $U_{C_2} = -25V$
- f) wie in d)  $D_1$  sperrt,  $D_2$  leitet
- g) analog zu e) gilt  $\Delta U_{C_1} = -\Delta U_{C_2}$  mit  
 $U_1 + U_{C_1} = U_{C_2}$   
 $\Rightarrow -50V - 25V + \Delta U_C = -25V - \Delta U_C$   
 $\Rightarrow \Delta U_C = 25V$   
 $U_{C_1} = 0V$ ;  $U_{C_2} = -50V$
- h)  $C_1$  wird periodisch auf  $-50V$  geladen. Springt  $U_1$  auf  $-50V$  wird Ladung von  $C_1$  auf  $C_2$  übertragen. Das geschieht so lange, bis  $U_{C_2} = +100V$  beträgt  
 $\Rightarrow$  für  $t \rightarrow \infty$ :  $U_{C_2} = -100V$