

Totalklausur Schaltungstechnik

zu Aufgabe (1)

$$\begin{aligned} \text{a) } I_{\text{ein}} &= I_C(T_0) + I_B (1 + 1 + 2 + \dots + 2^{k-1}) \\ &\quad \quad \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \quad \uparrow \\ &\quad \quad \quad T_0 \quad T_1 \quad \quad T_{2,1} T_{2,2} \\ &= I_C(T_0) + I_B \cdot 2^k \\ &= \beta I_B + I_B 2^k \\ &= (\beta + 2^k) I_B \\ &= \frac{I_C(T_0)}{\beta} (\beta + 2^k) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow I_C(T_0) = I_{\text{ein}} \frac{\beta}{\beta + 2^k}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } \text{Gesamtbasisstrom} &= I_B \cdot 2^k \\ I_C(T_0) &= \beta I_B \end{aligned}$$

$$\text{Also } 2^k > \beta = 100$$

$$k = 7 \text{ liefert } 2^k = 128 > 100$$

\Rightarrow Bei ≥ 7 Ausgängen.

$$\text{c) } I_0 = \beta \cdot I_B$$

$$\frac{I_0}{I_{\text{ein}}} = \frac{\beta I_B}{(\beta + 2^k) I_B} = \frac{\beta}{\beta + 2^k}$$

Testklausur Schaltungstechnik

Fortsetzung Aufgabe 1)

$$d) I_{\text{em}} = I_C(T_0) + \overset{\text{Summe}}{\text{Basisstrom}}(T_0, T_1, \dots, T_k) \cdot \frac{1}{\beta^2}$$
$$\begin{array}{ccc} \text{"} & & \text{"} \\ I_0 & & I_B \cdot 2^k \cdot \frac{1}{\beta^2} \\ \text{"} & & \\ \beta I_B & & \end{array}$$

Forderung:

$$I_C(T_0) = I_0 > 95\% I_{\text{em}}$$

$$\Rightarrow \beta I_B > \left(\beta + \frac{2^k}{\beta^2} \right) I_B \cdot 0,95$$

$$\Rightarrow 0,05 \beta > 0,95 \frac{2^k}{\beta^2}$$

$$\Rightarrow 2^k < \frac{0,05}{0,95} \cdot \beta^3 = 0,0526 \cdot 10^6$$

$$\Rightarrow 2^k < 5,26 \cdot 10^4$$

$$\Rightarrow k \cdot \ln 2 < \ln 5,26 + 4 \cdot \ln 10$$

$$\rightarrow k < \frac{1}{\ln 2} (\ln 5,26 + 4 \cdot \ln 10)$$

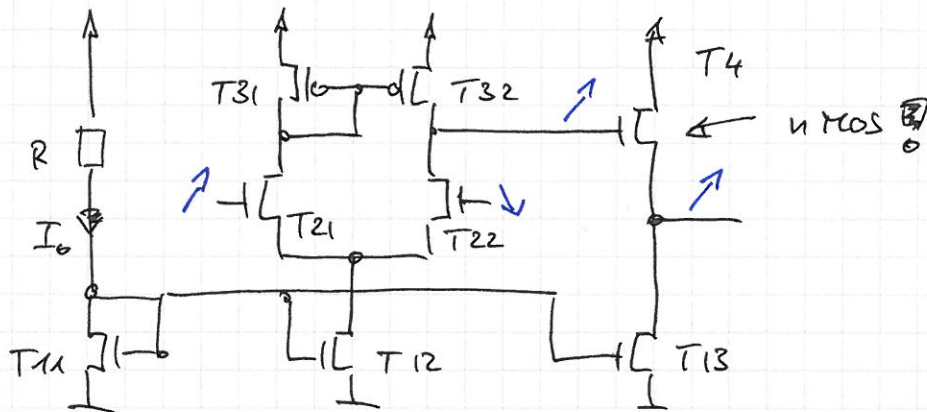
$$= \frac{1}{0,69} (1,66 + 4 \cdot 2,3)$$

$$= \underline{\underline{15,7...}} \quad ?$$

Testklausur Schaltungstechnik

zu Aufgabe ②

a)



T_{11}, T_{12}, T_{13} : Stromspiegel

$T_{21}, T_{22}, T_{31}, T_{32}, T_{12}$: single-ended Diff.-Stufe

T_4, T_{13} : Sourcefolger-Schaltung

b) s. Zeichnung zu a)

Nicht- inv. Eingang : Gate von T_{21}

Inv. Eingang : Gate von T_{22}

c)

$$I_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_{T_{11}} \cdot k_n \cdot U_{\text{eff}}^2$$

$$\Rightarrow W = 2 \cdot I_0 \cdot L / (k_n U_{\text{eff}}^2)$$

$$= \frac{2 \cdot 15 \mu\text{A} \cdot 1,8 \mu\text{m}}{80 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} \cdot 0,09 \text{V}^2}$$

$$= 7,5 \mu\text{m}$$

Also: $W_{11} = 7,5 \mu\text{m}$

Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2, Fortsetzung

Demit Weite aller n-MOS-Transistoren

$$W_{12} = \frac{I(T_{12})}{I(T_{11})} \cdot W_{11} = \frac{60}{15} \cdot 7.5 \mu\text{m} = \underline{\underline{30 \mu\text{m}}}$$

$$W_{21} = W_{22} = \frac{30}{15} \cdot 7.5 \mu\text{m} = 15 \mu\text{m}$$

$$W_{13} = W_{14} = \frac{120}{15} \cdot 7.5 \mu\text{m} = 60 \mu\text{m}$$

p-MOS-Transistoren:

$$I = \frac{1}{2} \frac{W_n}{L_n} k_n U_{\text{eff},n}^2 = \frac{1}{2} \frac{W_p}{L_p} k_p U_{\text{eff},p}^2$$

$$\text{Hier: } U_{\text{eff},n} = U_{\text{eff},p} = U_{\text{eff}} \\ L_n = L_p$$

$$\Rightarrow W_p = W_n \frac{k_n}{k_p}$$

$$\text{Also: } W_{31} = W_{32} = \frac{k_n}{k_p} W_{21} \\ = \frac{80}{30} \cdot 15 \mu\text{m} = 40 \mu\text{m}$$

R:

$$R = \frac{U_{DD} - (U_{\text{eff}} + U_{th,n})}{I_D} \\ = \frac{5 \text{ V} - (300 \text{ mV} + 650 \text{ mV})}{15 \mu\text{A}} = \frac{4.05}{15} \frac{\text{V}}{\mu\text{A}}$$

$$= 0.27 \text{ M}\Omega = \underline{\underline{270 \text{ k}\Omega}}$$

Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2, Fortsetzung

d) Untere Grenze Eingangsspannung:

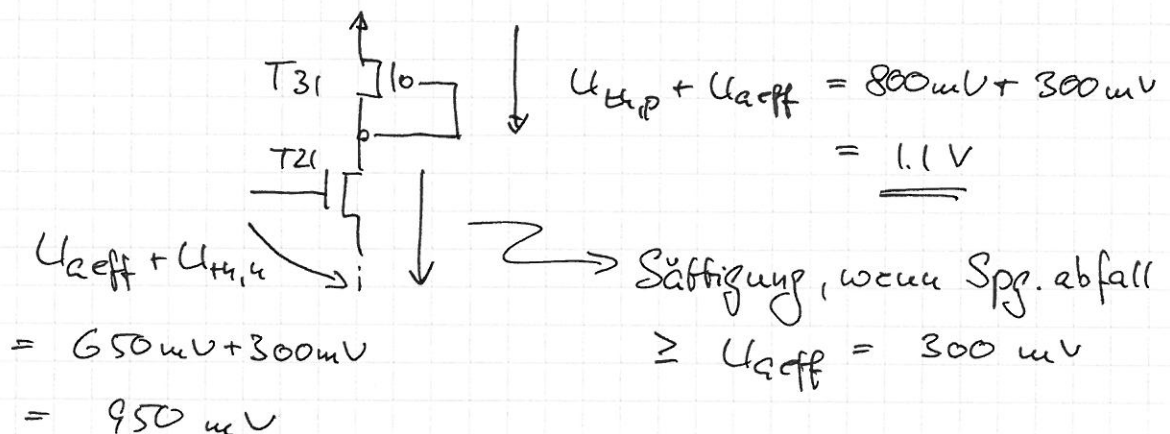
Spannungsabfall bzw Spannung am Drain von T12, damit T12 in Sättigung $\geq U_{geff} = 300 \text{ mV}$

Gate-Source-Spannung an Gates von T21 u. T22, damit Transistoren im Arbeitspunkt in Sättigung = $U_{geff} + U_{th,n}$

$$\begin{aligned} \text{Damit } U_{ein, CH, min} &= 2 U_{geff} + U_{th,n} \\ &= 2 \cdot 300 \text{ mV} + 650 \text{ mV} \\ &= \underline{\underline{1,25 \text{ V}}} \end{aligned}$$

Obere Grenze:

Skizze:



\Rightarrow Max Spannung am Gate von T21, damit alle Transistoren in Sättigung:

$$\begin{aligned} U_{DD} - [(U_{th,p} + U_{geff}) + U_{geff}] + (U_{geff} + U_{th,n}) \\ = U_{DD} - (U_{th,p} + U_{geff}) + U_{th,n} \end{aligned}$$

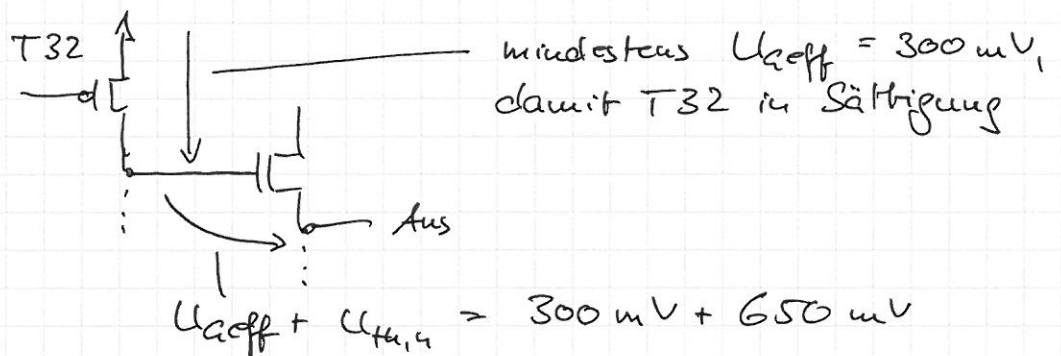
Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2, Fortsetzung

$$\begin{aligned} \dots &= 5V - (800mV + 300mV) + 650mV \\ &= \underline{\underline{4,55V}} \end{aligned}$$

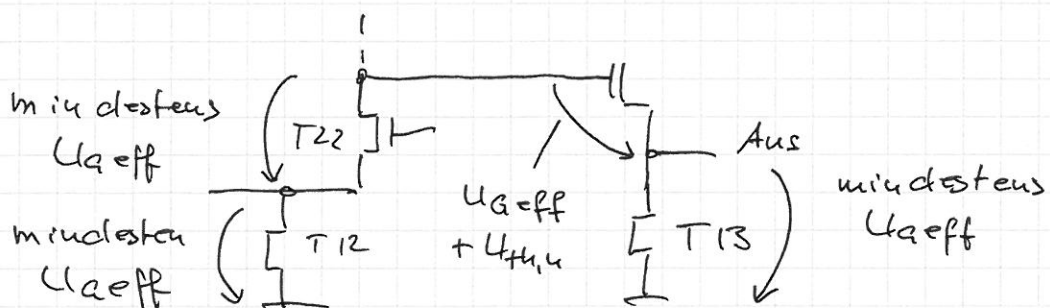
Also $U_{\text{ein,CM,max}} = \underline{\underline{4,55V}}$

e) Skizze zu $U_{\text{aus,max}}$



$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{\text{aus,max}} &= U_{\text{DD}} - (U_{\text{th,n}} + 2U_{\text{geff}}) \\ &= U_{\text{DD}} - 1250mV \\ &= 5V - 1,25V \\ &= \underline{\underline{3,75V}} \end{aligned}$$

Skizze zu $U_{\text{aus,min}}$:



Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2 Fortsetzung

⇒ Spannungsabfälle im Sourcefolgerzweig limitierend

$$\Rightarrow U_{\text{aus, min}} = \underbrace{U_{\text{eff}}}_{\substack{\text{(Sättigungsspg)} \\ \text{von T13}}} = 300 \text{ mV}$$

f) Gesamtverstärkung

= Verstärkung Differenzstufe \times Verstärkung Sourcefolger

$$\approx \frac{g_{m,2}}{g_{DS,2} + g_{DS,3}} \cdot 1$$

$$= \frac{g_{m,2}}{g_{DS,2} + g_{DS,3}}$$

Ausgangswiderstand

$$= \text{Ausgangswiderstand (Sourcefolger)} = \frac{1}{g_{m,4}}$$

g) Allgemein:

$$g_m = \frac{w}{L} \cdot \mu \cdot U_{\text{eff}}$$

$$g_{DS} = \frac{1}{2} \frac{w}{L} \cdot \mu \cdot U_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{L_{\text{min}}}{L}$$

Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2, Fortsetzung

$$g_{m2} = \frac{15}{1.8} \cdot 80 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 0.3 V = 200 \frac{\mu A}{V}$$

$$g_{m4} = \frac{60}{1.8} \cdot 80 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 0.3 V = 800 \frac{\mu A}{V}$$

$$\begin{aligned} g_{DS2} &= \frac{1}{2} \frac{15}{1.8} \cdot 80 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 0.09 V^2 \cdot \frac{0.1}{V} \cdot \frac{0.5}{1.8} \\ &= 0.83 \frac{\mu A}{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_{DS3} &= \frac{1}{2} \frac{40}{1.8} \cdot 30 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 0.09 V^2 \cdot \frac{0.09}{V} \cdot \frac{0.5}{1.8} \\ &= 0.75 \frac{\mu A}{V} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow A_{ges} = \frac{g_{m2}}{g_{DS2} + g_{DS3}} = \frac{200}{0.83 + 0.75} = \frac{200}{1.583}$$

$$\approx \underline{\underline{126}}$$

$$r_{OUT} = \frac{1}{g_{m4}} = \frac{1}{800 \mu A} = \frac{1}{0.8 \mu A}$$

$$= \underline{\underline{1.25 \text{ k}\Omega}}$$

h) Ausgang Differenzstufe (aus Symmetrie-gründen!)

$$\begin{aligned} U_{aus, DS} &= U_{DD} - (U_{THP} + U_{CEFF}) \\ &= U_{DD} - (800 \text{ mV} + 300 \text{ mV}) = \underline{\underline{3.9 V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{aus} &= U_{aus, DS} - (U_{TH,4} + U_{CEFF}) \\ &= 3.9 V - (650 \text{ mV} + 300 \text{ mV}) \\ &= \underline{\underline{2.95 V}} \end{aligned}$$

Testklausur Schaltungstechnik

Aufgabe 2, Fortsetzung

i) Gemäß Berechnung in h) beträgt die Ausgangsspannung:

$$\begin{aligned}U_{\text{aus}} &= U_{DD} - (U_{th,p} + U_{\text{geff}}) - (U_{th,n} + U_{\text{geff}}) \\&= U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n} - 2 U_{\text{geff}} \\&= 5V - 800\text{mV} - 650\text{mV} - 2 U_{\text{geff}} \\&= 3,55V - 2 U_{\text{geff}}\end{aligned}$$

Bei einem geänderten Strom I_0' müsste für eine neue effektive Gatespg. also gelten:

$$\begin{aligned}2,5V &\stackrel{!}{=} 3,55V - 2 U_{\text{geff}}' \\ \Rightarrow U_{\text{geff}}' &= \frac{3,55 - 2,5}{2} V = \frac{1,05}{2} V = \underline{\underline{525\text{mV}}}\end{aligned}$$

Damit (vgl. Aufgabenteil c):

$$\begin{aligned}I_0' &= \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_{T11} k_n U_{\text{geff}}'^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{7,5}{1,8} 80 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} 0,525^2 \text{V}^2 \\ &\approx \underline{\underline{46\ \mu\text{A}}}\end{aligned}$$

Testklausur Schaltungstechnik

Zu Aufgabe ③

a) Einfachster Ansatz: ODER-Bildung im KV-Diagramm

$y_1 \vee y_2$:

x_1	x_2	x_3	x_4	
0	0	1	1	
0	1	1	0	
1	0	0	0	A
1	0	1	1	
1	1	1	1	D
1	1	0	1	
1	0	0	0	B
1	0	0	1	C

$$A: \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_4 \wedge \bar{x}_2$$

$$B: x_3 \wedge \bar{x}_4 \wedge x_1$$

$$C: x_3 \wedge \bar{x}_4 \wedge x_2$$

$$D: x_1 \wedge x_2 \wedge x_3$$

$$\bar{y} = (\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_4) \vee \underbrace{(x_1 \wedge x_3 \wedge \bar{x}_4) \vee (x_2 \wedge x_3 \wedge \bar{x}_4)}_{(x_1 \vee x_2) \wedge (x_3 \wedge \bar{x}_4)} \vee (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3)$$

$$\bar{y} = \bar{x}_4 \wedge \left\{ [(x_1 \vee x_2) \wedge x_3] \vee (\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3) \right\}$$

Testklausur Schaltungstechnik

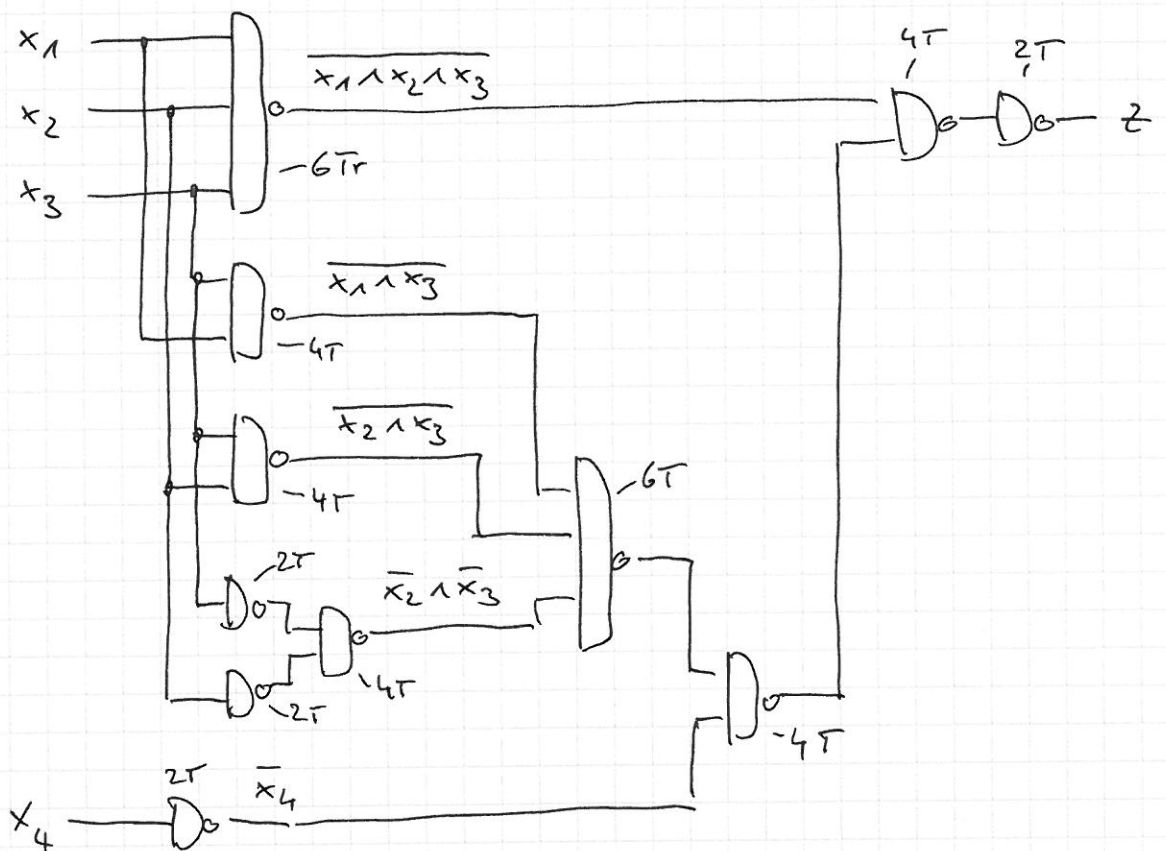
zu Aufgabe 3, Fortsetzung:

$$\text{Also: } y = \overline{(x_1 \wedge x_2 \wedge x_3)} \wedge \left[\bar{x}_4 \wedge \left[\left[(x_1 \vee x_2) \wedge x_3 \right] \vee (x_2 \wedge \bar{x}_3) \right] \right]$$

$$= \overline{(x_1 \wedge x_2 \wedge x_3)} \wedge \left[\bar{x}_4 \wedge \left[(x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge \bar{x}_3) \right] \right]$$

b)

$$y = \overline{(x_1 \wedge x_2 \wedge x_3)} \wedge \left[\bar{x}_4 \wedge \overline{(x_1 \wedge x_3)} \wedge \overline{(x_2 \wedge x_3)} \wedge \overline{(x_2 \wedge \bar{x}_3)} \right]$$



c) Anz. Transistoren: $6 + 4 + 4 + 2 + 2 + 2 + 4 + 6 + 4 + 4 + 2$
 $= \underline{\underline{40}}$

Testklausur Schaltungstechnik

zu Aufgabe ④

a)

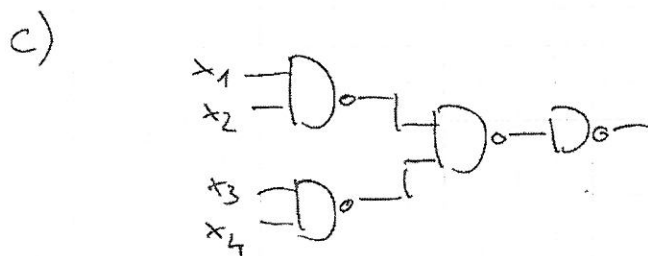
	x_1	x_2	x_3	x_4	y
	0	0	0	0	1
	1	0	0	0	1
	0	1	0	0	1
	1	1	0	0	0
	0	0	1	0	1
	1	0	1	0	1
	0	1	1	0	1
	1	1	1	0	0
	0	0	0	1	1
	1	0	0	1	1
	0	1	0	1	1
	1	1	0	1	0
	0	0	1	1	1
	1	0	1	1	1
	0	1	1	1	1
	1	1	1	1	0

b)

$$\bar{y} = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)$$

$$\Rightarrow y = \overline{(x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)}$$

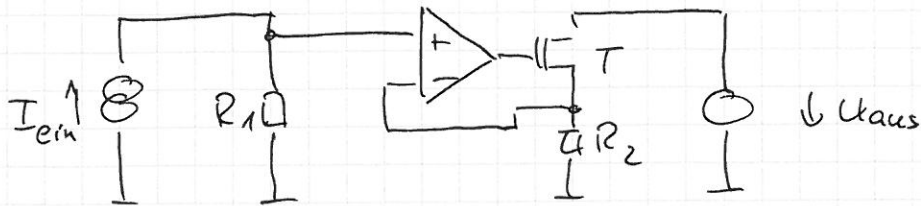
$$= \overline{x_1 \wedge x_2} \wedge \overline{x_3 \wedge x_4}$$



- d)
- $w_p \approx 2 \dots 3 w_n$, da
- Anzahl p-MOS gegen VDD = Anz. n-MOS gegen GND
 - Stromtreibfähigkeit p-MOS ca 2...3 mal geringer als bei n-MOS

Test klausur Schaltungstechnik

zu Aufgabe 5



- a) OP (mit Transistor T) bewirkt, dass Spannungsabfall an $R_1 =$ Spannungsabfall an R_2

$$\Rightarrow I_{ein} R_1 = I_{aus} R_2$$

$$\Rightarrow I_{aus} = I_{ein} \frac{R_1}{R_2}$$

- b) $U_{aus} > I_{aus} \cdot R_2 = I_{ein} \frac{R_1}{R_2} \cdot R_2$

$$\Rightarrow U_{aus} > I_{ein} \cdot R_1$$

- c) ~~U_G = U_{Geff} + U_{th} + I · R₂~~ $U_G = U_{Geff} + U_{th} + I \cdot R_2$

$$I = I_{ein} \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2} \frac{w}{L} k U_{Geff}^2$$

$$\Rightarrow U_{Geff} = \sqrt{\frac{2 I_{ein} R_1 / R_2}{\frac{w}{L} \cdot k}}$$

$$\Rightarrow U_G = -\sqrt{\frac{2 I_{ein} R_1 / R_2}{\frac{w}{L} \cdot k}} + U_{th} + I_{ein} R_1$$

- d) Auch hier: $U_G = U_{Geff} + U_{th} + I \cdot R_2$

$$\text{jedoch: } I = \frac{w}{L} k \left(U_{Geff} - \frac{1}{2} U_{DS} \right) U_{DS}$$

"weit im Lin. Bereich" $\Rightarrow U_{Geff} \gg U_{DS}$

$$\Rightarrow I \approx \frac{w}{L} k U_{Geff} \cdot U_{DS}$$

Testklausur Schaltungstechnik

zu Aufgabe 5, Fortsetzung

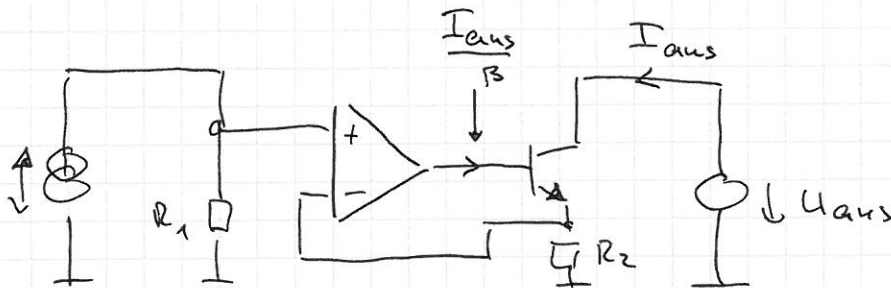
Hier also:

$$I = \frac{U}{L} \approx U_{\text{eff}} \cdot 100 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow U_{\text{eff}} = \frac{I}{\frac{U}{L} \cdot 100 \text{ mV}}$$

$$\Rightarrow U_G = \frac{I_{\text{ein}} \frac{R_1}{R_2}}{\frac{U}{L} \cdot 100 \text{ mV}} + U_{\text{TH}} + I_{\text{ein}} R_1$$

e.)



$$\text{Hier } I_{\text{ein}} \cdot R_1 = I_{\text{aus}} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_2$$

$$\Rightarrow I_{\text{aus}} = I_{\text{ein}} \frac{R_1}{R_2} \frac{\beta}{1 + \beta}$$