

Klausur zur Vorlesung Schaltungstechnik

TU Berlin, Sommersemester 2013, 24.07.2013

Bearbeitungszeit: 3 Stunden

Name (Nachname, Vorname):
Matr.-Nr.:
Studiengang:
BSc / MSc / Diplom:
Erasmus- oder Gast-Student/in: Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/>

Aufgabe:	Punkte:
1	/ 28
2	/ 22
3	/ 40
4	/ 20
5	/ 10
Gesamt:	/ 120

Note:	Datum:	Unterschrift:
-------	--------	---------------

Bitte füllen Sie auf dieser Seite nur die weißen Felder aus.

Füllen Sie bitte ebenso auf allen abgegebenen Seite jeweils die Kopfzeile aus und verwenden Sie nur dieses Papier für die Lösung der Aufgaben.

Viel Glück!

Aufgabe 1:

Gegeben ist ein Transmission-Gate in $0.5 \mu\text{m}$ CMOS-Technologie mit $L = L_{\text{min}} = 0.5 \mu\text{m}$, $W_n = 1.0 \mu\text{m}$, $W_p = 2.5 \mu\text{m}$, $k_n = 80 \mu\text{A/V}^2$, $k_p = 30 \mu\text{A/V}^2$, $U_{\text{th},n} = 700 \text{ mV}$, $U_{\text{th},p} = 800 \text{ mV}$. Der Spannungsabfall zwischen Drain und Source kann als sehr klein angenommen werden.

- Berechnen Sie den minimalen und den maximalen Widerstand des Transmission-Gates für $U_{\text{DD}} = 5 \text{ V}$ und $U_{\text{ein}} = 0 \dots U_{\text{DD}}$. 12
- Wie gering darf U_{DD} minimal werden, damit für zu schaltende Signale zwischen 0 und U_{DD} der maximale Widerstand $10 \text{ k}\Omega$ nicht überschreitet? 4
- Berechnen Sie das Verhältnis aus minimalem zu maximalem Widerstand des Transmission-Gates innerhalb des Bereiches $U_{\text{ein}} = 0 \dots U_{\text{DD}}$ als Funktion von U_{DD} für $U_{\text{DD}} = 2.0 \dots 5.0 \text{ V}$. (Formel) 8
Skizzieren Sie auch (quantitativ!) das oben berechnete Verhältnis aus maximalem zu minimalem Widerstand des Transmission-Gates innerhalb des Bereiches $U_{\text{ein}} = 0 \dots U_{\text{DD}}$ als Funktion von U_{DD} für $U_{\text{DD}} = 2.0 \dots 5.0 \text{ V}$.
- Welche Weite W_p müsste der pMOS Transistor haben, damit bei der oben gegebenen Weite des nMOS-Transistors und $U_{\text{DD}} = 1.8 \text{ V}$ der Widerstand für $U_{\text{ein}} = 0$ und für $U_{\text{ein}} = U_{\text{DD}}$ identisch sind? Geben Sie einen auf $0.1 \mu\text{m}$ gerundeten Wert an. 4

Summe: 28

Hinweis: Für die analytischen Betrachtungen/Berechnungen ist der Weg über die Betrachtung des Leitwertes des Transmission-Gates in einigen Teilaufgaben rechenstechnisch ggf. der einfachere Ansatz.

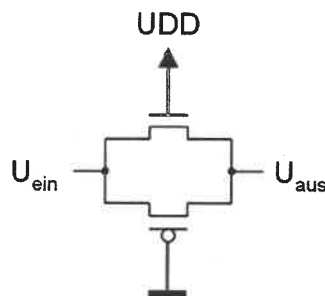


Abbildung zu Aufgabe 1.

Die Abbildung zeigt die an den Gates der Transistoren angelegten Spannungspegel für den eingeschalteten Zustand.

Aufgabe 2:

Gegeben ist die unten angegebene Schaltung, die eine optimierte Implementierung einer logischen Verknüpfung realisiert.

- a) Geben Sie eine Wahrheitstabelle für die Ausgangsvariable y als Funktion der 4 EingangsvARIABLEN a, b und c an. (Anmerkung: Jede mögliche Kombination der EingangsvARIABLEN führt zu definierten Ausgangszuständen.) 4
- b) Ermitteln Sie – aus der Tabelle aus a) oder (besser / einfacher!) durch Betrachtung der Pull-Down- oder Pull-Up-Pfade den logischen Ausdruck, den diese Schaltung realisiert. Geben Sie die Funktion y in möglichst einfacher Form an. 4
- c) Setzen Sie diese Funktion ausschließlich mit NAND-Gattern mit zwei Eingängen und Invertern um und skizzieren Sie die sich ergebende Schaltung. 8
- d) Wie viele MOS-Transistoren enthält Ihre in c) skizzierte Schaltung (kurze Begründung oder Angabe der Transistoranzahl pro Gatter in c)). 2
- e) Setzen Sie die ermittelte Funktion nun auch ausschließlich mit NOR-Gattern mit beliebig vielen Eingängen und Invertern um und skizzieren Sie die sich ergebende Schaltung. 4

Summe: 22

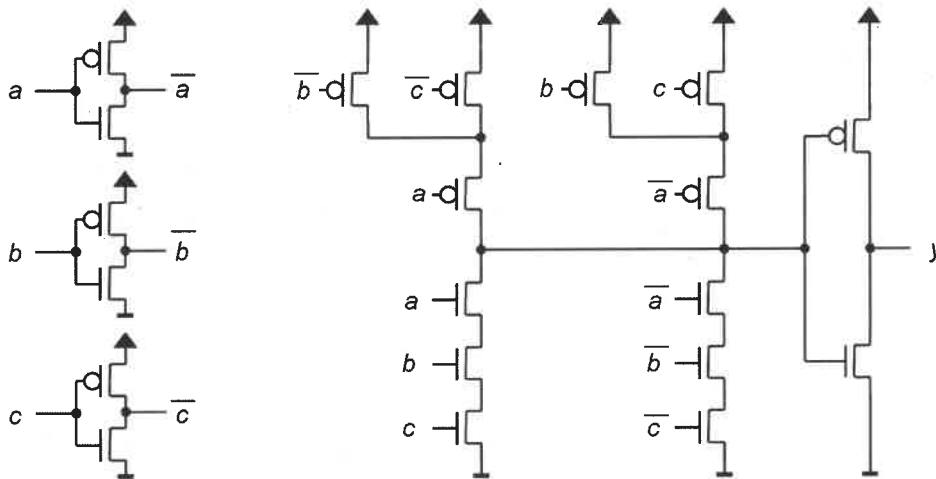


Abbildung zu Aufgabe 2.

Aufgabe 3:

Die unten gegebene Abbildung zeigt einen einfachen Differenzverstärker mit differentiellem Ausgang und weiteren Elementen zur Einstellung des Arbeitspunktes der Schaltung. Die Betriebsspannung U_{DD} beträgt 3.3 V. Technologie- bzw. Transistorkenngrößen sind $L_{min} = 0.35 \mu\text{m}$, $k_p = 56 \mu\text{A} / \text{V}^2$, $U_{th,p} = 0.7 \text{V}$. Alle Transistoren haben eine Kanallänge $L = 0.7 \mu\text{m}$. Alle Transistoren werden mit einer effektiven Gatespannung von 250 mV betrieben.

- Identifizieren und benennen Sie bekannte Teilschaltungen möglichst genau. 4
- Ausgang A1 wird (willkürlich) als nicht-invertierender Ausgang der Schaltung festgelegt. Welches ist unter dieser Bedingung der invertierende, welches der nicht-invertierende Eingang der Schaltung (Begründung Sie Ihre Aussage dadurch, dass Sie an *jedem* signalführenden Knoten in der Schaltung Pfeilsymbole eintragen; ohne Begründung oder Skizze keine Punkte). 4
- Der Strom I_1 soll $12.5 \mu\text{A}$ betragen. Bestimmen Sie die Weite von T_{11} und den Wert des Widerstandes R_1 .
Hinweis: Verwenden Sie bei der Berechnung des Transistorstromes eine Näherungsformel, d.h., vernachlässigen Sie den über den Parameter λ modellierten Effekt der Kanallängenmodulation. 4
- Dimensionieren Sie die die Weiten von T_{12} und T_{13} so, dass die entsprechenden Ströme $I_2 = 37.5 \mu\text{A}$ und $I_3 = 100 \mu\text{A}$ betragen. Dimensionieren Sie die ferner die Weiten aller übrigen Transistoren ($T_{21}, T_{22}, T_{31}, T_{32}$). 4
- Dimensionieren Sie die Werte aller verbleibenden Widerstände derart, dass die Gleichtakt- (oder Common-Mode-) Ausgangsspannung beider Verstärkungsstufen je 1.5 V beträgt. 4
- Geben Sie die minimale und die maximale Gleichtakt- (oder Common-Mode-) Eingangsspannung an unter der Bedingung, dass alle Transistoren im Sättigungsbereich betrieben werden.
Geben Sie dazu jeweils eine kurze Skizze (oder Erklärung) und die entsprechenden Spannungswerte an. 6
- Zeichnen Sie ein Kleinsignal-Ersatzschaltbild der Schaltung, mittels dessen Sie Kleinsignal-Verstärkung der Schaltung etc. herleiten könnten. Reduzieren Sie dieses Ersatzschaltbild auf die relevanten Elemente, d.h., vereinfachen Sie dieses Ersatzschaltbild so weit wie möglich. 6
- Geben Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der gesamten Schaltung an (Formel und Wert). 8

Hinweis: Berechnen Sie diese bzw. geben Sie diese vorzugsweise an mit Hilfe bekannter Näherungs-Formeln, d.h. Verwendung der Ergebnisse aus Aufgabenteil g) ist zwar möglich, aber nicht erforderlich.

Summe: 40

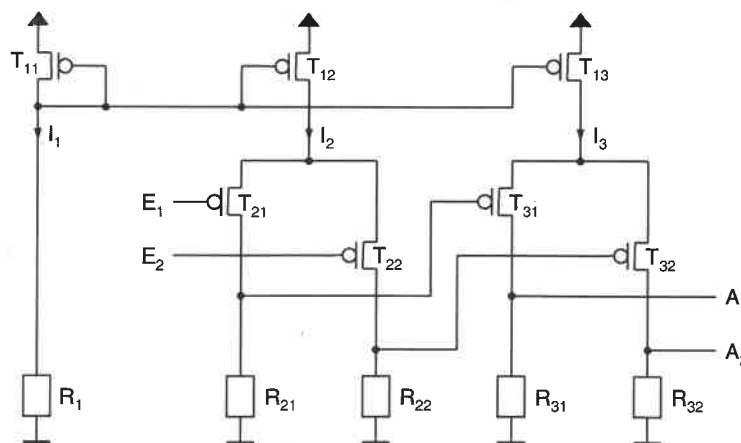


Abbildung zu Aufgabe 3

Aufgabe 4:

Die unten stehende Abbildung zeigt eine Schaltung, die bei richtiger Dimensionierung eine spannungsgesteuerte Stromquelle darstellt, d.h., der Strom I_L durch das Lastelement ist nur eine Funktion der Eingangsspannung U_{ein} und hängt nicht vom Wert R_L des Lastwiderstandes ab.

Diese Schaltung soll im Folgenden schrittweise analysiert und dimensioniert werden. Für diese Analyse sind interne Knoten der Schaltung mit den Ziffern 1, 2, 3 gekennzeichnet, die entsprechenden Spannungen an diesen Knoten werden mit U_1 , U_2 und U_3 bezeichnet.

Hinweis: Beide Operationsverstärker werden als Verstärker, d.h. NICHT als Komparatoren betrieben.

- Geben Sie zunächst U_1 als Funktion von U_{ein} und U_3 und dann U_2 als Funktion von U_{ein} und U_3 an. 4
- Stellen Sie nun eine Knotengleichung für den Knoten 3 auf. Setzen Sie das Ergebnis aus b) ein und entwickeln Sie daraus einen Ausdruck für I_L . 6
- Geben Sie die Abgleichbedingung an, die erfüllt sein muss, damit I_L nur eine Funktion der Eingangsspannung U_{ein} ist und geben Sie die Beziehung zwischen I_L und U_{ein} an, die in diesem Falle erhalten wird. 2
- Im Folgenden sollen $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ sein und $I_L / U_{ein} = 1 \text{ mA / V}$ gelten. Ferner wird $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ vorgegeben. Dimensionieren Sie die verbleibenden Widerstände und skizzieren Sie die Spannung, die sich am Knoten 3 für $U_{ein} = -5 \text{ V} \dots +5 \text{ V}$ ergibt. Tragen Sie dann in das gleiche Diagramm auch die Spannungen an den Knoten 1 und 2 ein. 8

Summe: 20

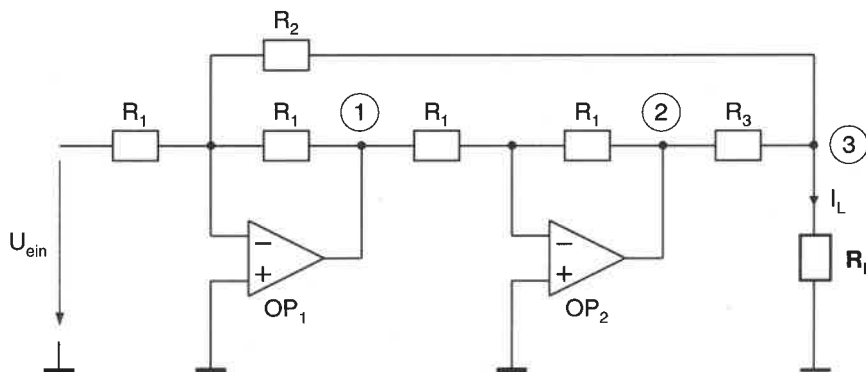


Abbildung zu Aufgabe 4

Aufgabe 5:

Gegeben ist die unten skizzierte Logik-Schaltung.

- Stellen Sie für die Schaltung ein KV-Diagramm auf und bestimmen Sie daraus den logischen Ausdruck für y in möglichst einfacher Form. 6
- Nehmen Sie an, die skizzierte Schaltung wird mit Hilfe von Standard-CMOS-Logik umgesetzt. Geben Sie die Anzahl der Transistoren an, die Ihre Schaltung benötigt. 4

Summe: 10

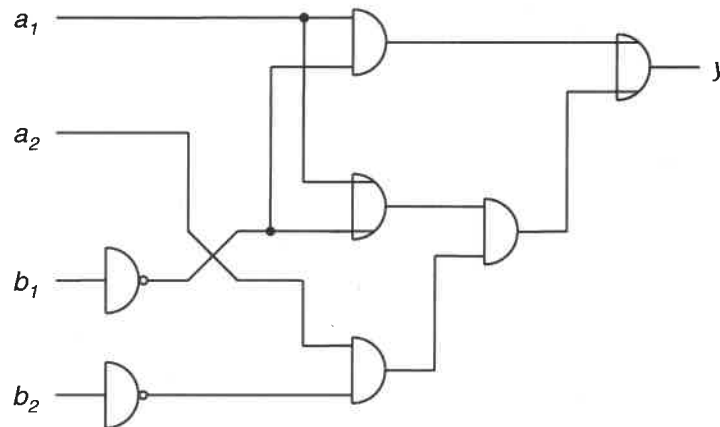


Abbildung zu Aufgabe 5

Musterlösung

zu Aufgabe 1:

a) Bekannt:

$$R_{TG,04} = \frac{1}{G_{TG,04}} = \frac{1}{G_{n,04} + G_{p,04}}$$

mit $G_{n,04} =$

$$\begin{cases} \left(\frac{W}{L}\right)_n k_n (U_{DD} - U_{th,n} - U_{ein}) & \text{für } U_{DD} - U_{ein} > U_{th,n} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und $G_{p,04} =$

$$\begin{cases} \left(\frac{W}{L}\right)_p k_p (U_{ein} - U_{th,p}) & \text{für } U_{ein} > U_{th,p} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Minima von $G_{TG,04}$ (entspr. Maxima von $R_{TG,04}$)
bei $U_{ein} = 0$ oder $U_{ein} = U_{DD}$

Maxima von $G_{TG,04}$ (entspr. Minima von $R_{TG,04}$)
bei $U_{ein} = U_{DD} - U_{th,n}$ oder $U_{ein} = U_{th,p}$

Einsetzen:

$$\begin{aligned} G_{TG,04}(U_{ein} = 0) &= G_{n,04} (U_{DD} - U_{th,n}) \\ &= \frac{1.0}{0.5} 80 \frac{\mu A}{V^2} (5V - 0.7V) \\ &= 688 \frac{\mu A}{V} \end{aligned}$$

Klausur TU Berlin Schaltungstechnik 24.07.2013
Musterlösung

$$\begin{aligned} G_{TG,04}(U_{\text{eff}} = U_{DD}) &= G_{p,04}(U_{DD} - U_{th,p}) \\ &= \frac{25}{0.5} 30 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (5\text{V} - 0.8\text{V}) \\ &= 630 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_{TG, \text{min}} &= \frac{1}{G_{TG,04}(U_{\text{eff}} = 0)} \\ &= \frac{1}{630} \frac{\text{V}}{\mu\text{A}} = \underline{\underline{1453.5 \Omega}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{TG,04}(U_{\text{eff}} = U_{th,p}) &= G_{n,04}(U_{DD} - U_{th,n} - U_{th,p}) \\ &= \frac{10}{0.5} 80 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (5\text{V} - 0.7\text{V} - 0.8\text{V}) \\ &= 560 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{TG,04}(U_{\text{eff}} = U_{DD} - U_{th,n}) &= G_{p,04}(U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n}) \\ &= \frac{25}{0.5} 30 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (5\text{V} - 0.8\text{V} - 0.7\text{V}) \\ &= 525 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_{TG, \text{max}} &= \frac{1}{G_{TG,04}(U_{\text{eff}} = U_{DD} - U_{th,p})} \\ &= \frac{1}{525} \frac{\text{V}}{\mu\text{A}} = \underline{\underline{1904.8 \Omega}} \end{aligned}$$

Klausur TU Berlin Schaltungstechnik 24.07.2013
Musterlösung

$$\begin{aligned} \text{b) } R_{TG, \max} &= \frac{1}{G_{p, \text{on}} (U_{DD} - U_{th, P} - U_{th, n})} \\ &= \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)_P \mu_P (U_{DD} - U_{th, P} - U_{th, n})} \\ &\leq 10 \text{ k}\Omega \\ \Rightarrow U_{DD} - U_{th, P} - U_{th, n} &\geq \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)_P \mu_P \cdot 10 \text{ k}\Omega} \\ \Rightarrow U_{DD} &\geq U_{th, n} + U_{th, P} + \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)_P \mu_P \cdot 10 \text{ k}\Omega} \\ &= 0.7 \text{ V} + 0.8 \text{ V} + \frac{1}{\frac{2.5}{0.5} \cdot 30 \frac{\mu\text{V}}{\text{A}} \cdot 10 \text{ k}\Omega} \\ &= 0.7 \text{ V} + 0.8 \text{ V} + 0.67 \text{ V} \\ &= \underline{\underline{2.17 \text{ V}}} \end{aligned}$$

c) Vorabbeurteilung zur Korrektur:
Es werden alle Varianten der Berechnung
und Darstellung (min/max bzw max/min)
anerkannt.

Klausur TU Berlin Schaltungstechnik 24.07.2013
Musterlösung

o $R_{TG, \min} / R_{TG, \max}$ - Berechnung

$$\begin{aligned} \frac{R_{TG, \min}}{R_{TG, \max}} &= \frac{G_{p, on} (U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n})}{G_{n, off} (U_{DD} - U_{th,n})} & 1 \\ &= \frac{\left(\frac{w}{L}\right)_p k_p (U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n})}{\left(\frac{w}{L}\right)_n k_n (U_{DD} - U_{th,n})} \\ &= \frac{\left(\frac{w}{L}\right)_p k_p}{\left(\frac{w}{L}\right)_n k_n} \left[1 - \frac{U_{th,p}}{U_{DD} - U_{th,p}} \right] & 2 \end{aligned}$$

o ALTERNATIV $R_{TG, \max} / R_{TG, \min}$:

$$\begin{aligned} \frac{R_{TG, \max}}{R_{TG, \min}} &= \frac{G_{n, off} (U_{DD} - U_{th,n})}{G_{p, on} (U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n})} & 1 \\ &= \frac{\left(\frac{w}{L}\right)_n k_n (U_{DD} - U_{th,n})}{\left(\frac{w}{L}\right)_p k_p (U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n})} \\ &= \frac{\left(\frac{w}{L}\right)_n k_n}{\left(\frac{w}{L}\right)_p k_p} \left[1 + \frac{U_{th,p}}{U_{DD} - U_{th,p} - U_{th,n}} \right] & 2 \end{aligned}$$

Musterlösung

Skizze:

$$R_{TG, \min} / R_{TG, \max} = \frac{\frac{2.5}{0.5} \cdot 30}{\frac{10}{0.5} \cdot 80} \left[1 - \frac{0.8V}{UDD - 0.7V} \right]$$

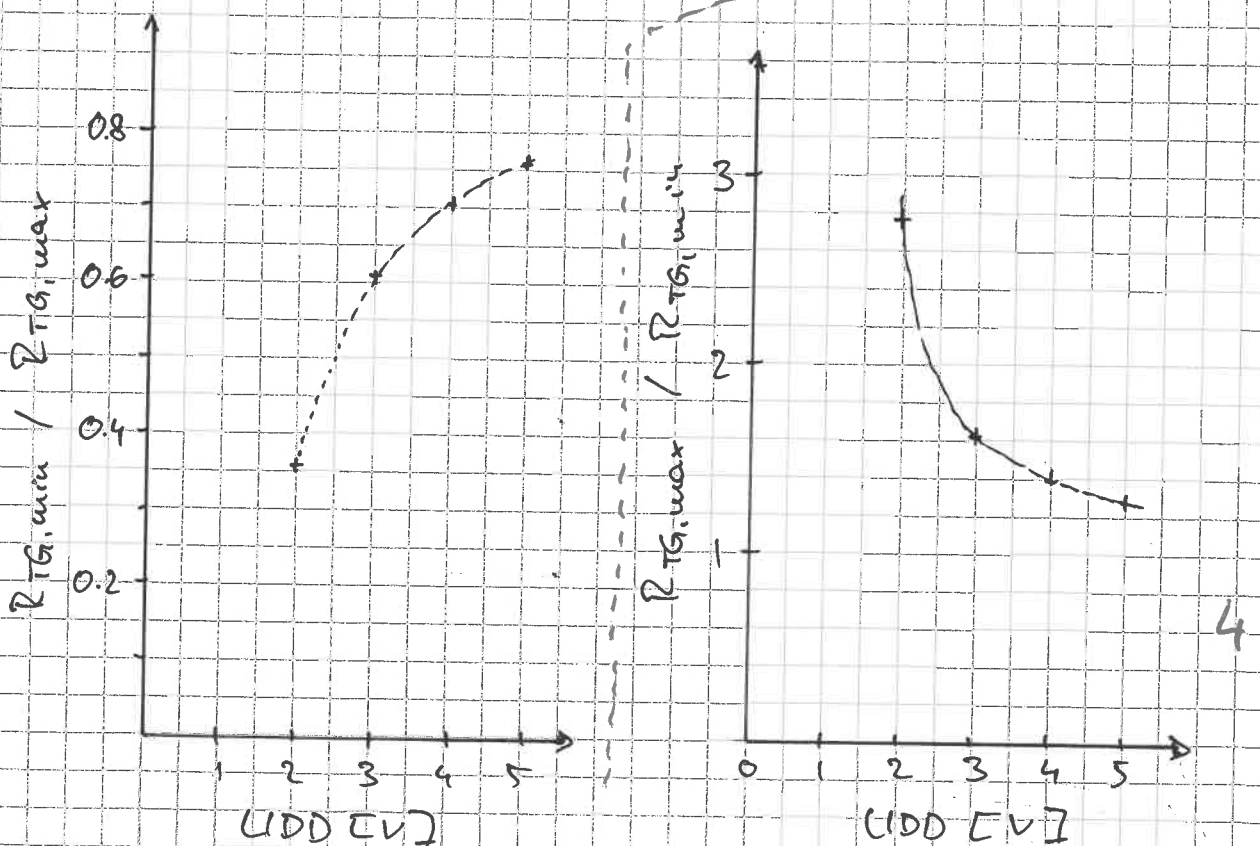
$$R_{TG, \max} / R_{TG, \min} = \frac{\frac{10}{0.5} \cdot 80}{\frac{2.5}{0.5} \cdot 30} \left[1 + \frac{6.8V}{UDD - 1.5V} \right]$$

$$= 0.9375 \left[1 - \frac{0.8V}{UDD - 0.7V} \right]$$

$$= 1.067 \left[1 + \frac{0.8V}{UDD - 1.5V} \right]$$

Berechnete Werte für Skizze:

UDD [V]	$R_{TG, \min} / R_{TG, \max}$	$R_{TG, \max} / R_{TG, \min}$
2	36.1 %	2.77
3	61.1 %	1.64
4	71.0 %	1.41
5	76.3 %	1.31



(Dabei: Min u. max. Wert, d.h. Wert für 2V u. 5V: 2 Pkte, Verlauf: 2 Pkte) 1/5

$$d) G_{0u,n} (U_{ern} = 0) \stackrel{!}{=} G_{0u,p} (U_{ern} = U_{DD})$$

$$\Rightarrow \left(\frac{w}{L}\right)_n k_n (U_{DD} - U_{th,n}) = \left(\frac{w}{L}\right)_p k_p (U_{DD} - U_{th,p})$$

$$\Rightarrow w_p = w_n \frac{k_n (U_{DD} - U_{th,n})}{k_p (U_{DD} - U_{th,p})}$$

$$= 1.0 \mu\text{m} \frac{80}{30} \frac{1.8 - 0.7}{1.8 - 0.8}$$

$$= 2.933 \mu\text{m}$$

$$\approx \underline{\underline{2.9 \mu\text{m}}}$$

Musterlösung

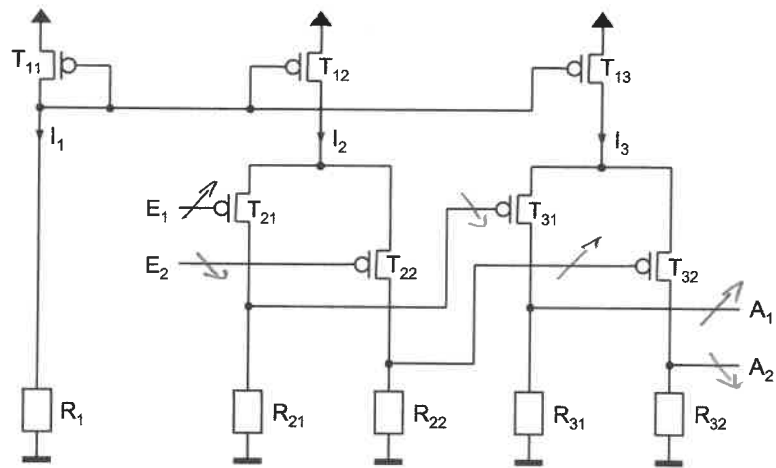
Zu Aufgabe 3)

a) T_{11}, T_{12}, T_{13} : Stromspiegel 1

$T_{21}, T_{22}, R_{21}, R_{22}$ (mit T_{12} als Stromquelle):
 Differenzstufe mit p-MOS-Eingangstr.,
 abmschen Lastelementen und diff. Ausgang 0.5
 0.5

$T_{31}, T_{32}, R_{31}, R_{32}$ (mit T_{13} als Stromquelle):
 diffo 1

b)



$$c) I_1 = \frac{1}{2} \frac{W}{L} k_p U_{G,off}^2$$

$$\Rightarrow W_{II} = \frac{2 \cdot I_1 \cdot L}{k_p U_{G,off}^2}$$

$$= \frac{2 \cdot 12.5 \mu A \cdot 0.7 \mu m}{56 \frac{\mu A}{V^2} \cdot (0.25 V)^2} = \underline{\underline{5 \mu m}}$$

Musterlösung

$$R_1 = \frac{U_{DD} - (U_{amp} + U_{eff})}{I_1}$$

$$= \frac{3.3V - 0.95V}{12.5 \mu A} = \underline{\underline{188 \text{ k}\Omega}}$$

d) Da L und U_{eff} für alle Transistoren identisch:

$$W_{12} = W_{11} \cdot \frac{I_2}{I_1} = 5 \mu m \cdot \frac{37.5}{12.5} = \underline{\underline{15 \mu m}}$$

$$W_{13} = 5 \mu m \cdot \frac{100}{12.5} = \underline{\underline{40 \mu m}}$$

$$I_{21} = I_{22} = \frac{1}{2} I_2$$

$$\Rightarrow W_{21} = W_{22} = \frac{15 \mu m}{2} = \underline{\underline{7.5 \mu m}}$$

dito für

$$W_{31} = W_{32} = \frac{100 \mu m}{2} = \underline{\underline{50 \mu m}}$$

$$e) R_{21} \cdot \frac{I_2}{2} = R_{22} \cdot \frac{I_2}{2} = 1.5V$$

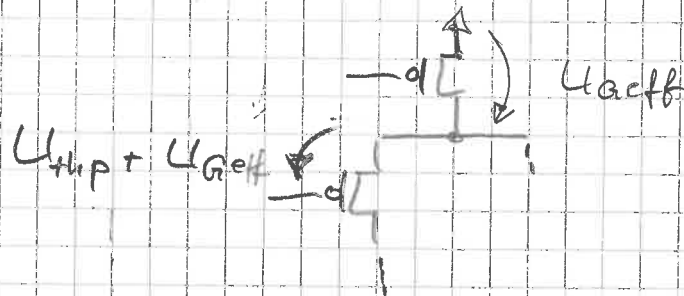
$$\Rightarrow R_{21} = R_{22} = \frac{2 \cdot 1.5V}{37.5 \mu A} = \underline{\underline{80 \text{ k}\Omega}}$$

$$R_{31} \cdot \frac{I_3}{2} = R_{32} \cdot \frac{I_3}{2} = 1.5V$$

$$\Rightarrow R_{31} = R_{32} = \frac{2 \cdot 1.5V}{100 \mu A} = \underline{\underline{30 \text{ k}\Omega}}$$

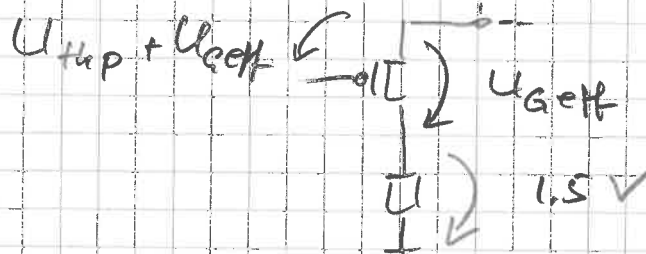
Musterlösung

f) $U_{CM,ern,max}$:



$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{CM,ern,max} &= U_{DD} - (U_{top} + 2U_{Geff}) \\ &= 3.3V - (0.7V + 2 \cdot 0.25V) \\ &= 2.1V \end{aligned}$$

$U_{CM,ern,min}$:

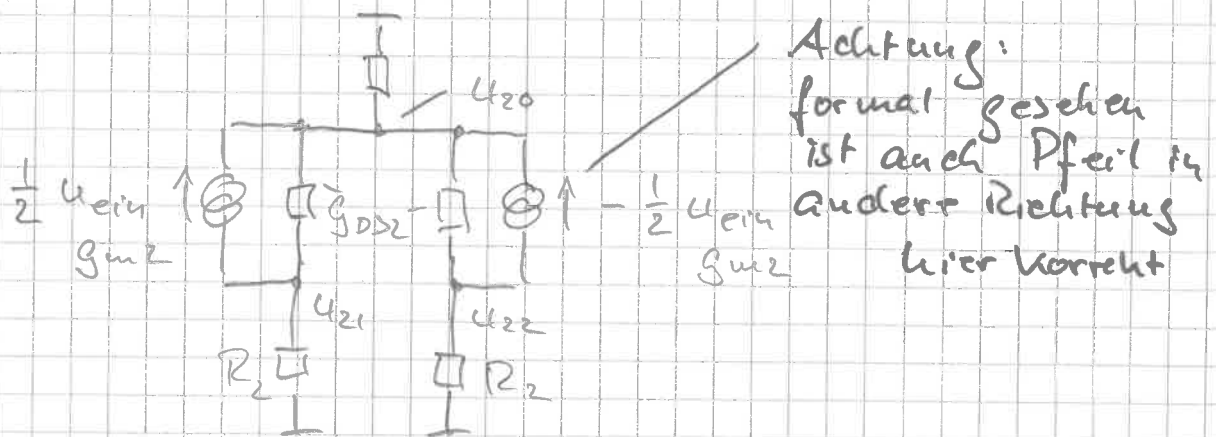


$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{CM,ern,min} &= 1.5V + U_{Geff} - (U_{top} + U_{Geff}) \\ &= 1.5V + 0.25V - (0.7V + 0.25V) \\ &= 0.8V \end{aligned}$$

Klausur Schaltungstechnik 24.07.2018

Muster Lösung

g) Betrachte zunächst z.B. nur die Stufe $T_{12}, T_{21}, T_{22}, R_{21}, R_{22}$:

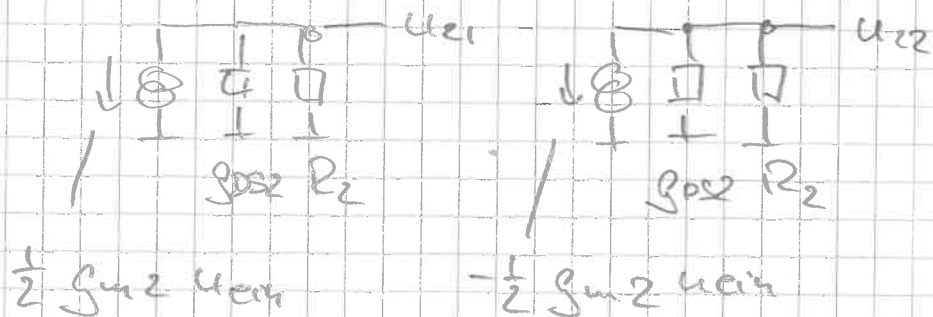


mit $g_{m21} = g_{m22} = g_{mz}$
 $g_{DS21} = g_{DS22} = g_{DS2}$
 $R_{21} = R_{22} = R_2$

2

Da $u_{z0} = 0$ ist der Common-Source-Knoten virtuelle Masse

⇒

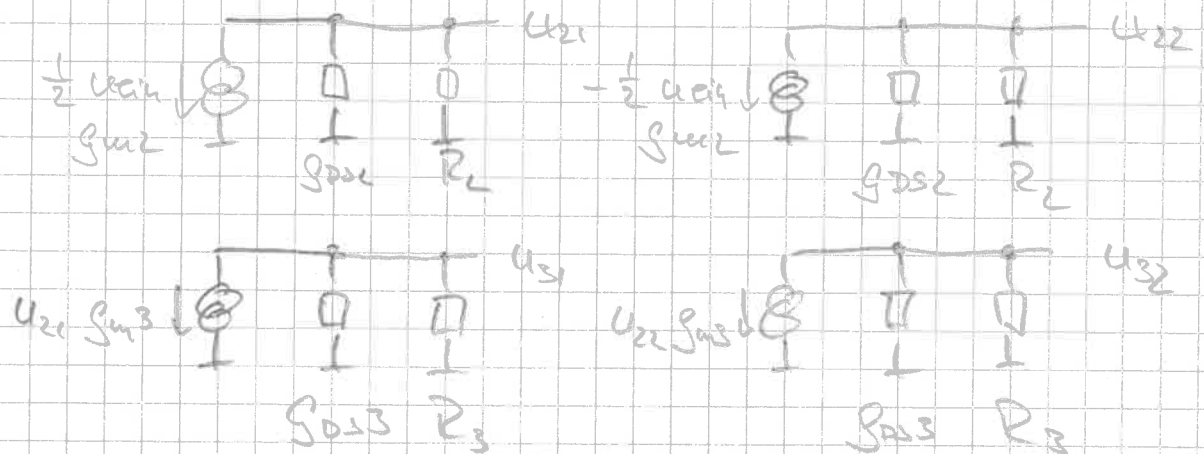


2

Klausur Schaltungstechnik 24.07.2018

Musterlösung

Wende dieses Ergebnis auf gesamte Schaltung an:



$$h) A_{ges} = g_{m2} \cdot R_2 \cdot g_{m3} R_3 \quad 2$$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_G} \quad 1$$

$$= \frac{W}{L} k_p U_{eff} \quad 1$$

$$g_{m2} = \frac{7.5}{0.7} \cdot 56 \frac{\mu A}{V^2} \cdot 0.25 V$$

$$= 150 \mu A / V \quad 1$$

$$g_{m2} R_2 = 150 \mu A / V \cdot 80 k\Omega = 12 \quad 1$$

$$g_{m3} R_3 = g_{m2} \cdot \frac{8}{3} \cdot R_2 \cdot \frac{3}{8} = g_{m2} R_2 = 12 \quad 1$$

$$\Rightarrow A_{ges} = 12^2 = 144 \quad 1$$

Musterlösung

Zu Aufgabe 4)

$$\begin{aligned} a) \quad U_1 &= -U_{\text{ein}} \frac{R_1}{R_1} - U_3 \frac{R_1}{R_2} \\ &= -U_{\text{ein}} - U_3 \frac{R_1}{R_2} \end{aligned} \quad \textcircled{1}$$

$$\begin{aligned} U_2 &= -U_1 \\ &= U_{\text{ein}} + U_3 \frac{R_1}{R_2} \end{aligned} \quad \textcircled{1}$$

$$b) \quad 0 = \underbrace{\frac{U_3}{R_1}}_{I_L} + (U_3 - U_2) \frac{1}{R_3} + U_3 \frac{1}{R_2} \quad \textcircled{2}$$

$$I_L = -U_3 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + U_2 \frac{1}{R_3} \quad \textcircled{2}$$

$$= -U_3 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + (U_{\text{ein}} + U_3) \frac{1}{R_3} \frac{R_1}{R_2} \quad \textcircled{2}$$

$$= \frac{U_{\text{ein}}}{R_3} + U_3 \left(\frac{R_1}{R_2 R_3} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right) \quad \textcircled{2}$$

$$c) \quad 0 = \frac{R_1}{R_2 R_3} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \quad \textcircled{1}$$

$$\Rightarrow R_1 = R_2 + R_3 \quad \textcircled{1}$$

$$d) \quad \text{Abgeglichenen Zustand: } I_L = \frac{U_{\text{ein}}}{R_3} \quad \textcircled{1}$$

$$\Rightarrow R_3 = \frac{U_{\text{ein}}}{I_L} = \left(\frac{I_L}{U_{\text{ein}}} \right)^{-1} \quad \textcircled{1}$$

$$= \left(1 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \right)^{-1} = 1 \text{ k}\Omega \quad \textcircled{1}$$

Musterlösung

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_2 + R_3 \\
 &= 2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega \\
 &= 3 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

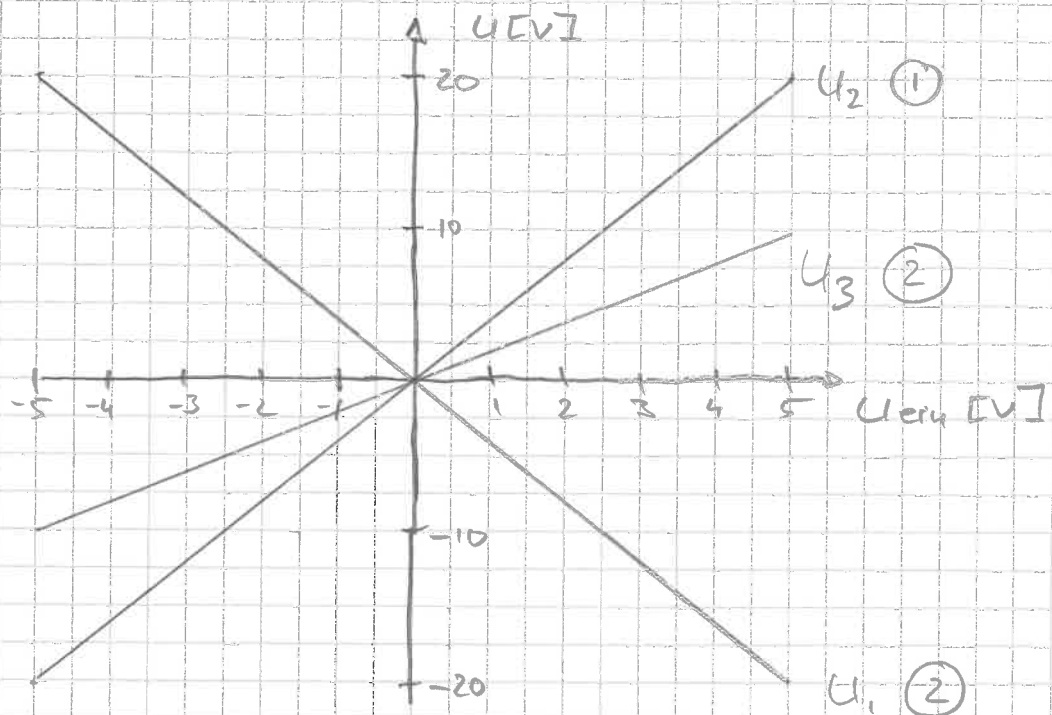
(1)

Zum Diagramm:

$$\begin{aligned}
 U_3 &= I_L \cdot R_L \\
 &= 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \text{ Uein} \cdot 2 \text{ k}\Omega \\
 &= 2 \text{ Uein}
 \end{aligned}$$

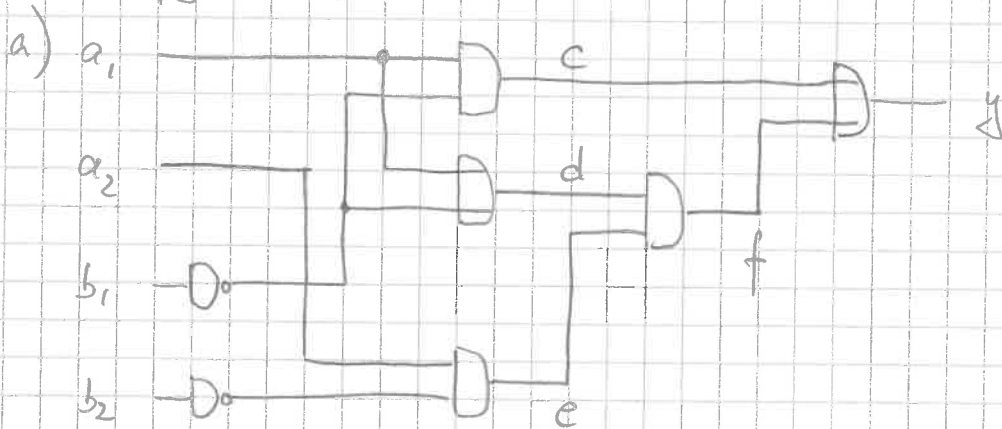
$$\begin{aligned}
 U_1 &= -U_{\text{ein}} - \frac{R_1}{R_2} U_3 \\
 &= -U_{\text{ein}} - \frac{3 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega} \cdot 2 \text{ Uein} \\
 &= -4 \text{ Uein}
 \end{aligned}$$

$$U_2 = -U_1 = 4 \text{ Uein}$$



Musterlösung

zur Aufgabe 5)



$$c = a_1 \wedge \overline{b_1} \quad 0.5$$

$$d = a_1 \vee \overline{b_1} \quad 0.5$$

$$e = a_2 \wedge \overline{b_2} \quad (-)$$

$$f = (a_1 \vee \overline{b_1}) \wedge (a_2 \wedge \overline{b_2}) \quad 0.5$$

$$y = (a_1 \wedge \overline{b_1}) \vee [(a_1 \vee \overline{b_1}) \wedge (a_2 \wedge \overline{b_2})] \quad 0.5$$

KV-Diagramm:

$$a_1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0$$

$$a_2 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1$$

$b_1 \quad b_2$

$$0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1$$

$$1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0$$

$$1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0$$

2

$$y = (a_1 \wedge \overline{b_1}) \vee (\overline{b_2} \wedge a_1 \wedge a_2) \vee (a_2 \wedge \overline{b_1} \wedge \overline{b_2})$$

2

Muster Lösung

Angaben zur Vergabe der bish. Punkte:
erreichbaren Punkte:

- Gleichungen für c, d, ... nicht erforderlich, ergeben jedoch Punkte, falls Fehler im Diagramm
- Diagramm:
 - 1 Fehler - 0.5, d.h. 1.5 Punkte
 - 2 Fehler - 1.0, d.h. 1.0 Punkte
 - 3 Fehler - 1.5, d.h. 0.5 Punkte
 - > 3 Fehler 0 Punkte
- Identifizierung der Gruppen innerhalb des Diagramms ist Bestandteil der letzten 2 Punkte, d.h. Angabe von $y = \dots$

b)

2 Inverter	$2 \cdot 2 = 4$	1
3 ANDs	$= 3 \cdot (\text{NAND} + \text{Inverter})$	
	$3 \cdot (4+2) = 3 \cdot 6 = 18$	1
2 OR	$= 2 \cdot (\text{NOR} + \text{Inverter})$	
	$2 \cdot (4+2) = 2 \cdot 6 = 12$	1
Summe:	$(12 + 18 + 4)$ Transistoren	
	$= 34$ Transistoren	1

Angabe der (korrekten) Summe ergibt bereits volle Punktzahl.