Elektronische Schaltungen SS 2020

5. Tutoriumsblatt – Lösung

Operationsverstärker, MOS Schaltkreise

– Abgabe –

Aufgabe 1

a) Schaltung analysieren:

- n-Kanal Transistoren selbstsperrend
- Erste Stufe: Gatter mit 3 Eingängen, Transistoren sind in Reihe geschaltet $\Rightarrow$ NAND
- Nachfolgende Stufe: Inverter $\Rightarrow$ AND

Wahrheitstabelle:

A	B	C	Y
1	1	1	1
1	0	1	0
0	1	1	0
0	0	1	0
1	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	0

Logische Funktion: UND (AND)

b) Die Schaltung muss nach Abbildung 1 modifiziert werden, damit die Wahrheitstabelle erfüllt wird.

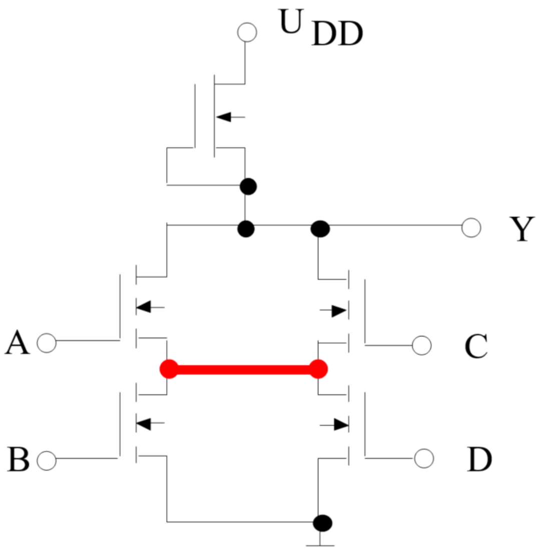

Abbildung 1

Wahrheitstabelle:

A	B	C	D	Y
1	1	1	1	0
1	0	1	1	0
0	1	1	1	0
0	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	1
0	0	0	1	1
1	1	1	0	0
1	0	1	0	1
0	1	1	0	0
0	0	1	0	1
1	1	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	0	0	1
0	0	0	0	1

Aufgabe 2

a) 2-fach NAND Gatter mit n-Kanal MOSFET und einem Lasttransistor vom Verarmungstyp:

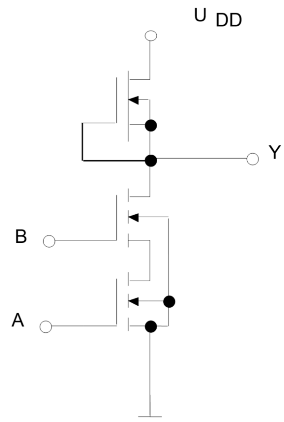

Abbildung 2

b) 2-fach NOR Gatter in CMOS-Technik:

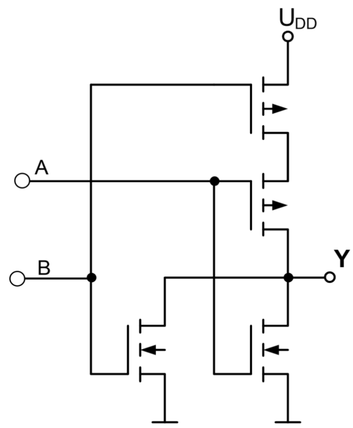

Abbildung 3

– Im Tutorium –

Aufgabe 3

a) Die beiden Verstärker OP_1 und OP_2 sind als nicht invertierende Verstärker geschaltet, OP_3 ist ein Subtrahierer.

b) Allgemein gilt für den Instrumentenverstärker:

$$U_a = \frac{R_4}{R_3}(u_{22} - u_{21}) = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{\mathrm{e}2} - u_{\mathrm{e}1}) = A(u_{\mathrm{e}2} - u_{\mathrm{e}1})$$

Herleitung:

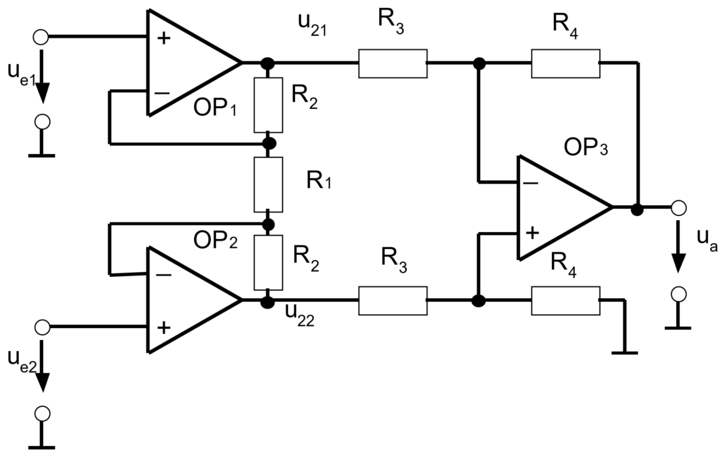

Abbildung 4

An den Widerständen R_2-R_1-R_2 liegen an den Punkten 1-4 folgenden Spannungen an:

- 1: u_{21}
- 2: $u_{\mathrm{e}1}$ (nichtinvertierender Verstärker $\Rightarrow$ U_{D} am Eingang des OP = 0)
- 3: $u_{\mathrm{e}2}$ (nichtinvertierender Verstärker $\Rightarrow$ U_{D} am Eingang des OP = 0)
- 4: u_{22}

Da in die Eingänge der OP-Verstärker kein Strom fließt, ist der Strom zwischen den Punkten 1 und 4 konstant, d.h. der Strom durch R_1 ist gleich dem Strom durch die Widerstände R_2.
Da Punkt 4 der Schaltung am nichtinvertierenden Eingang des nachfolgenden Subtrahierers liegt,

soll der Strom von (4) nach (1) fließen. Es ist dann:

$$u_{41} = i \cdot (R_2 + R_1 + R_2) = i \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)$$

mit

$$i = \frac{u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}}}{R_1}$$

wird

$$U_{\mathrm{a}} = u_{22} - u_{21} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}}) = A(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}})$$

Der nachfolgende Subtrahierverstärker hat als Eingangsspannung am nicht invertierenden Eingang $u'_{\mathrm{e2}} = u_{22}$ und am invertierenden Eingang $u'_{\mathrm{e1}} = u_{21}$ anliegen. Die Ausgangsspannung des Subtrahierverstärkers ist: (Skript Gl. 5.29)

$$U_{\mathrm{a}} = \frac{R_4}{R_3}(u'_{\mathrm{e2}} - u'_{\mathrm{e1}}) = \frac{R_4}{R_3}(u_{22} - u_{21})$$

Damit wird die Ausgangsspannung der Gesamtschaltung zu:

$$U_{\mathrm{a}} = \frac{R_4}{R_3}(u_{22} - u_{21}) = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}}) = A(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}})$$

Wenn beim Subtrahierer $R_3 = R_4$ ist wird daraus (Skript, Gl. 5.41):

$$U_{\mathrm{a}} = u_{22} - u_{21} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}}) = A(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}})$$

$$A = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) = \left(1 + \frac{1020\,\mathrm{k\Omega}}{10{,}303\,\mathrm{k\Omega}}\right) = 1 + 99 = 100$$

c) Jetzt ist $R_3 \neq R_4$, d.h. der Subtrahierer hat ebenfalls noch eine Verstärkung $\neq 1$

$$U_{\mathrm{a}} = \frac{R_4}{R_3}(u_{22} - u_{21}) = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}}) = A(u_{\mathrm{e2}} - u_{\mathrm{e1}})$$

$$A = \frac{R_4}{R_3}\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) = \frac{20\,\mathrm{k\Omega}}{10\,\mathrm{k\Omega}}\left(1 + \frac{1020\,\mathrm{k\Omega}}{10{,}303\,\mathrm{k\Omega}}\right) = 2 \cdot (1 + 99) = 200$$

d) Der Widerstand R_1 muss wie folgt gewählt werden:

$$A = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \Rightarrow R_1 = \frac{2R_2}{A-1} = \frac{2 \cdot 510\,\mathrm{k\Omega}}{999} = 1024\,\Omega$$

Aufgabe 4

a) Die Daten des Inverters bestimmen sich wie folgt:

- Verzögerungszeit: Zur Bestimmung der Verzögerungszeiten wird der 50% -Wert des Signalpegels benötigt. Aus dem zeitlichen Diagramm der Eingangsspannung kann abgelesen werden, dass H $= 5\,\mathrm{V}$, L $= 0\,\mathrm{V}$. Daraus folgt, dass der 50% Wert bei $2{,}5\,\mathrm{V}$ liegt.
  - t_{pdLH} : Eingang: H $\rightarrow$ L, Ausgang: L $\rightarrow$ H
    Aus Abbildung Zeitpunkte der 50%-Werte ablesen: $t_{\text{UI}} = 5\,\mathrm{ns}$, $t_{\text{UQ}} = 10\,\mathrm{ns}$
    $\Rightarrow t_{\text{pdLH}} = 5\,\mathrm{ns}$
  - t_{pdHL} : Eingang: L $\rightarrow$ H, Ausgang: H $\rightarrow$ L
    Aus Abbildung Zeitpunkte der 50%-Werte ablesen: $t_{\text{UI}} = 17\,\mathrm{ns}$, $t_{\text{UQ}} = 20\,\mathrm{ns}$
    $\Rightarrow t_{\text{pdHL}} = 3\,\mathrm{ns}$
- Anstiegs- und Abfallzeit: Werden zwischen 10% und 90% des Pegels der Ausgangsspannung gemessen. Diese ergeben sich zu $10\% \cdot U_{\text{e}} = 0{,}5\,\mathrm{V}, 90\% \cdot U_{\text{e}} = 4{,}5\,\mathrm{V}$.

$$\rightarrow t_r = 12{,}4\,\mathrm{ns} - 7{,}6\,\mathrm{ns} = 4{,}8\,\mathrm{ns}$$
$$\rightarrow t_f = 21{,}6\,\mathrm{ns} - 18{,}4\,\mathrm{ns} = 3{,}2\,\mathrm{ns}$$

- Gatterlaufzeit: Ist der Mittelwert der beiden Verzögerungszeiten t_{pdLH} und t_{pdHL}:

$$t_{\text{pd}} = \frac{1}{2}(t_{\text{pdLH}} + t_{\text{pdHL}}) = \frac{1}{2}(5+3)\mathrm{ns} = 4\,\mathrm{ns}$$

b) Bei der Übertragungskennlinie ist es wichtig immer zuerst die Winkelhalbierende einzutragen. Der Schnittpunkt der Übertragungskennlinie und der Winkelhalbierenden wird als U_{S} (Schwellspannung) gekennzeichnet (aus Abbildung: $1{,}5\,\mathrm{V}$).
Bestimmung von ΔU_{H} und ΔU_{L}:

$$\Delta U_{\text{H}} = U_{\text{H}} - U_{\text{S}} = 5\,\mathrm{V} - 1{,}5\,\mathrm{V} = 3{,}5\,\mathrm{V}$$
$$\Delta U_{\text{L}} = U_{\text{S}} - U_{\text{H}} = 1{,}5\,\mathrm{V} - 0\,\mathrm{V} = 1{,}5\,\mathrm{V}$$

Bestimmung von Z_H und Z_L :
ΔU kann aus der Übertragungskennlinie ermittelt werden: $\Delta U = U_H - U_L = 5\,\mathrm{V}$.

$$Z_H = \frac{\Delta U_H}{\Delta U} = \frac{3{,}5\,\mathrm{V}}{5\,\mathrm{V}} = 0{,}7 = 70\%$$
$$Z_L = \frac{\Delta U_L}{\Delta U} = \frac{1{,}5\,\mathrm{V}}{5\,\mathrm{V}} = 0{,}3 = 30\%$$

Aufgabe 5

a) Um Lastgerade in Kennlinienfeld einzeichnen zu können, müssen zwei Punkte bestimmt werden, z.B.:

1. Punkt: $I = 0$, $U = 10\,\mathrm{V}$
2. Punkt: $U = 0$, $I = \frac{10\,\mathrm{V}}{8\,\mathrm{k}\Omega} = 1{,}25\,\mathrm{mA}$

Die Lastgerade ist in Abbildung 5 zu sehen. Um die Übertragungskennlinie zu skizzieren, müssen

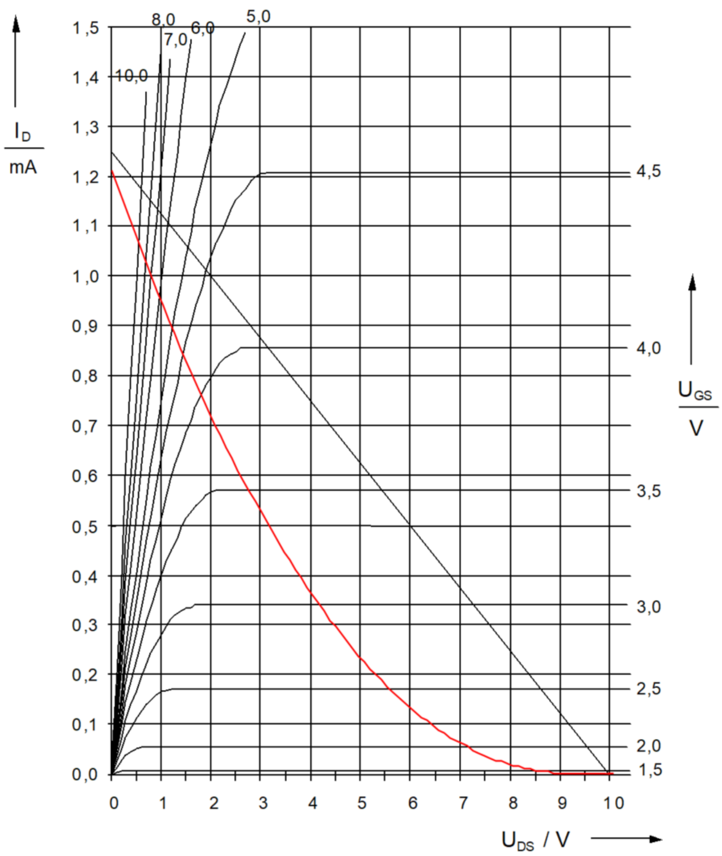

Abbildung 5

Wertepaare U_{GS}, U_{DS} (Schnittpunkte der Kennlinien mit der Lastgeraden bzw. Lastkurve) aus dem Kennlinienfeld ermittelt werden.

U_{GS}	$U_{\text{DS}}(a)$	$U_{\text{DS}}(b)$
0 V	10 V	8,8 V
1,5 V	9,9 V	8,35 V
2 V	9,5 V	7,1 V
2,5 VV	8,6 V	5,5 V
3,0 VV	7,2 V	4,15 V
3,5 V	5,4 V	2,7 V
4,0 V	3,2 V	1,8 V
4,5 V	1,9 V	1,4 V
5,0 V	1,5 V	1,2 V
6,0 Vv	1,1 V	0,9 V
7,0 V	0,9 V	0,75 V
8,5 V	0,8 V	0,65 V
10,0 V	0,6 V	0,55 V

Daraus ergeben sich die folgenden beiden Übertragungskennlinien (Abbildung 6):

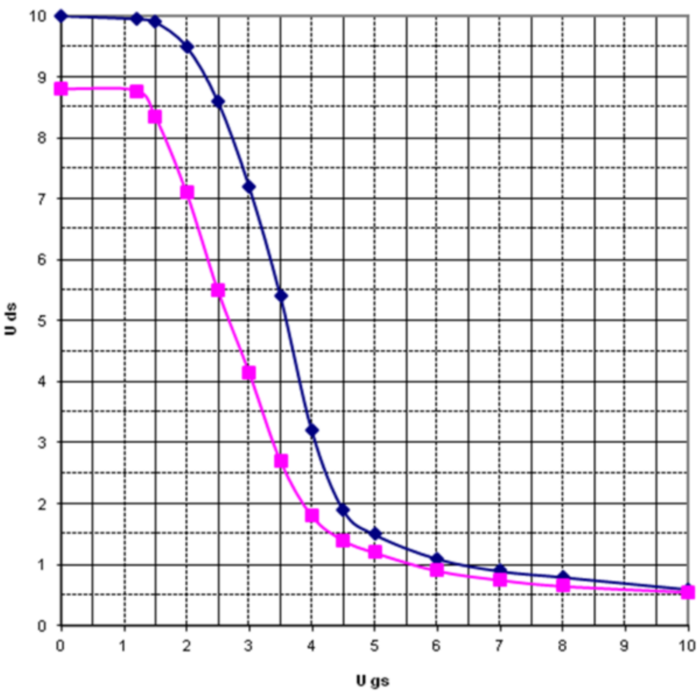

Abbildung 6

b) Die Steilheit berechnet sich zu

$$S = \frac{\Delta I_{\text{D}}}{\Delta U_{\text{GS}}} \text{ mit } \Delta U_{\text{GS}} = 1\,\text{V}$$

Aus Kennlinienfeld kann ΔI_{D} für beide Fälle abgelesen werden.

$$S_1 = 290\,\mu\text{S}$$
$$S_2 = 640\,\mu\text{S}$$

Diese Werte werden jedoch wegen der Strombegrenzung der Last in beiden Fällen nicht erreicht!

c) Die Verlustleistung der Inverter berechnet sich zu:

$$P = U_{\text{DD}} \cdot I_{\text{D}}$$

I_D kann aus dem Kennlinienfeld (Schnittpunkt Lastgerade bzw. Lastkurve mit Kennlinie für $U_{\text{GS}} = 10\,\text{V}$) abgelesen werden:

$$\text{für a) } I_{\text{D}} = 1{,}17\,\text{mA}$$
$$\text{für b) } I_{\text{D}} = 1{,}06\,\text{mA}$$

Daraus folgt für die Verlustleistung:

$$\text{für a) } P = U_{\text{DD}} \cdot I_{\text{D}} = 10\,\text{V} \cdot 1{,}17\,\text{mA} = 11{,}7\,\text{mW}$$
$$\text{für b) } P = U_{\text{DD}} \cdot I_{\text{D}} = 10\,\text{V} \cdot 1{,}06\,\text{mA} = 10{,}6\,\text{mW}$$