

# Elektronik 3

2.10.23  
Elek 3

- Zufrieden
- Berndt: - Seitenzahl in einer Gruppe
- Wie sieht ein Chip aus?
- Logische Schaltungen
- Dioden: Entladungsgeschwindigkeit was ist der Unterschied?
- Datenblätter  $\leftrightarrow$  Di. LED Messung?  $\leftrightarrow$  A. diese Bauteile große Unterschiede
- $\rightarrow$  Bild CMOS Analog Holbein  $\leftarrow$

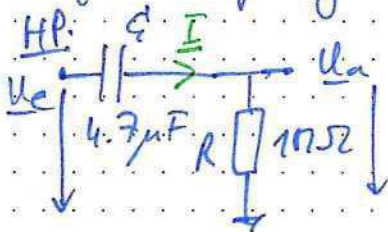
## Ex 6 Beispiel

Gleichhaltungsspannung:

$$\frac{V_1 + V_2}{2} = V_{gl}$$

Gegenshaltungsspannung:

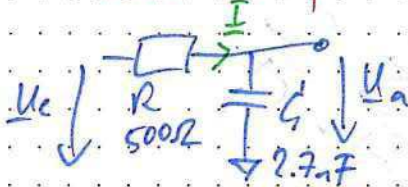
$$V_1 - V_2 = V_{gl} = V_D$$



$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R \cdot j\omega C}{(R + \frac{1}{j\omega C}) \cdot j\omega C} = \frac{j\omega R C}{1 + j\omega R C} = \frac{j\omega}{j\omega + \frac{1}{RC}}$$

$$I = \frac{U_e}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{U_a}{R} \quad f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

- ausrechnen



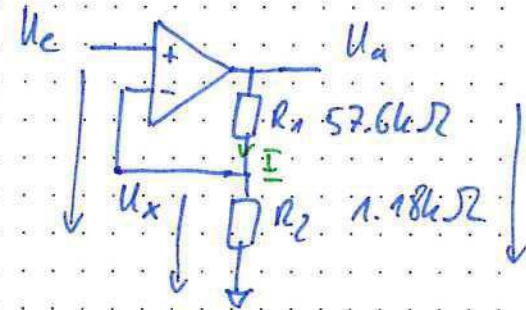
$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{I \cdot \frac{1}{j\omega C}}{I \cdot (R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1}{j\omega R C + 1}$$

- Komplexe Größe  
- komplexes Geschw.  
- Knochengleich, Maschengleich  
- Polynom von  $j\omega$  in Zähler und Nenner ohne Vorfaktor

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{j\omega R C + 1} = \frac{1}{RC} \cdot \frac{1}{j\omega + \frac{1}{RC}} \quad f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

4.10.203  
Elek3

Stück Theorie  
+5V V<sub>DD</sub>  
+2.5V GND  
0V -V<sub>DD</sub>



$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

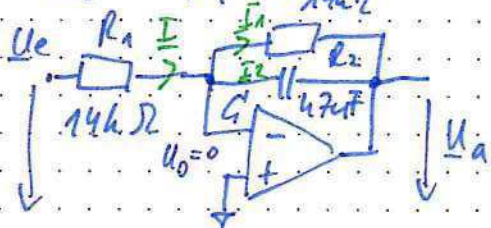
$$\approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{Rückkopplung}$$

$$V_{u \rightarrow 0} \quad U_e \approx U_x$$

Operationsverstärker: unendliche Verstärkung, kein Eingangsstrom

$$(U_e - U_x) \cdot V_u = U_a \quad \left( U_e - U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_u = U_a$$

$$\frac{U_x}{R_2} = \frac{U_a}{R_1 + R_2} \quad U_x = U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad U_e = \frac{U_a}{V_u} + U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



$$\frac{U_a}{U_e} = - \frac{1}{\left( \frac{1}{R_2} + j\omega C \right) R_1} = - \frac{1}{\frac{1}{R_1} \left( j\omega + \frac{1}{R_2 C} \right)}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

$$I_1 = - \frac{U_a}{R_2} \quad I_2 = - U_a j\omega C$$

$$I = I_1 + I_2 \quad I = \frac{U_e}{R_1} = - \frac{U_a}{R_2} - U_a j\omega C = - U_a \left( \frac{1}{R_2} + j\omega C \right)$$

Frequenzbereich EK G 0,033 Hz 157 Hz

Puls: 1 Hz 3 Hz 150 Punkte 50 Punkte

Rauschen:

ADC: 0..5V; 16-bit,  $2^{16} = 65532$  0.07 mV

Eingangsauflösung:  $0.07 \text{ mV} / 700 = 0.1 \mu\text{V}$

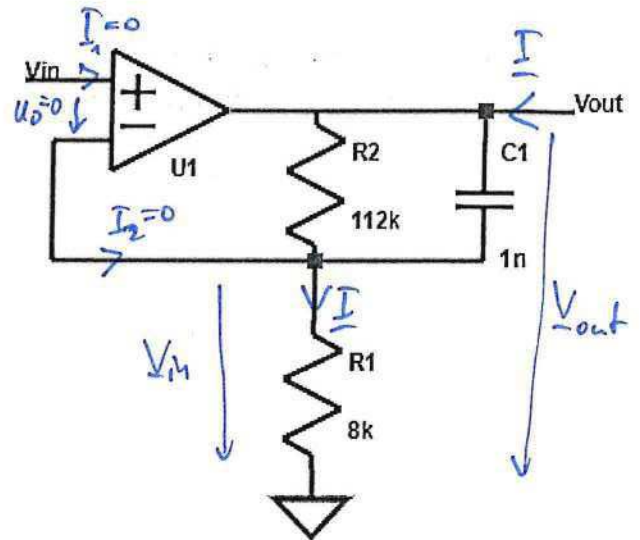
Abschrale: SPS samples per second



### Aufgabe 5: Operationsverstärker Frequenzgang

Gegeben sei folgende  
Operationsverstärkerschaltung.

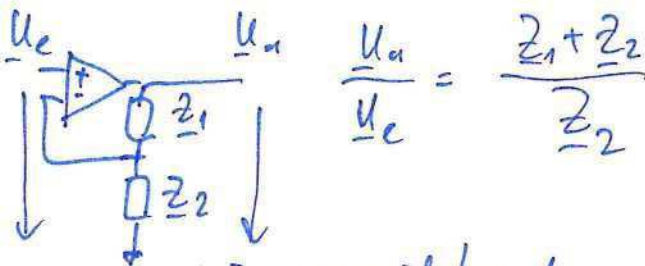
1. Bestimmen Sie die Gleichspannungsverstärkung. (2 Punkte)
2. Bestimmen Sie den Eingangswiderstand. (1 Punkt)
3. Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion. (2 Punkte)
4. Bestimmen Sie die 3 dB Eckfrequenz (2 Punkte)



→ Gegenkopplung

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I \left( \frac{1}{R_2 + j\omega C_1} + R_1 \right)}{I R_1} \quad \text{Gleichspannung}$$

$$\frac{R_2 + R_1}{R_1} = 15$$

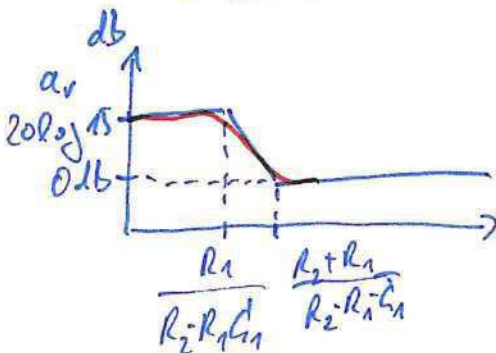


$$\frac{U_{in}}{U_e} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$$

Eingangswiderstand

$$R = \frac{U}{I} = \lim_{I \rightarrow 0} \frac{V_{in}}{I} = \infty$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{1}{\left( \frac{1}{R_2 + j\omega C_1} \right) R_1} + \frac{R_1}{R_1} \\ &= \frac{1 + \left( \frac{1}{R_2 + j\omega C_1} \right) \cdot R_1}{\left( \frac{1}{R_2 + j\omega C_1} \right) R_1} \\ &= \frac{j\omega C_1 R_1 + 1 + \frac{R_1}{R_2}}{j\omega C_1 R_1 + \frac{R_1}{R_2}} \\ &= \frac{j\omega + \frac{R_2 + R_1}{R_2 C_1 R_1}}{j\omega + \frac{R_1}{R_2 R_1 C_1}} \end{aligned}$$



# Leitfähigkeit

Elektronik 3  
9.12.2023

Halbleiter

Eigenleitungsdichte  $n_i$   $n_{i, Si} = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

spezifische Leitfähigkeit  $\chi = e \mu_n \cdot n + e \mu_p \cdot p$

$e$  Elementarladung  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$n_i^2 = n \cdot p$

Dotierung

Bor III

Phosphor IV

$N_A$

$N_D$

$p$

$n$

Methodik

$N = N_A - N_D$

$N_A > N_D$

Beispiel:

$N = N_D - N_A$

$N_A < N_D$

$N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Ges:  $n = \frac{n_i^2}{p}$

$N_A > N_D$

$N_D = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$p = N_A - N_D = 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

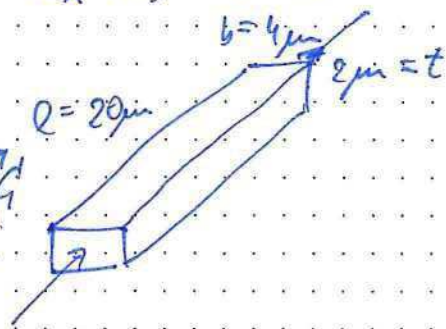
Beispiel:  $n = N_D = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\chi \cdot A}$

$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 $\mu_n = 460 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

$\chi = e \mu_n \cdot n + e \mu_p \cdot p$

$\chi \approx e \mu_n \cdot n$



Elektronik  
11.10.2023

pn Übergang

Raumladungszonenweite

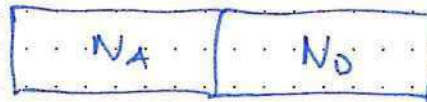
$$d_s = \sqrt{\frac{2\epsilon_H(N_A + N_D)(U_D - U)}{qN_A N_D}}$$

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

Beispiel Diode:

$$U_D = 25 \text{ mV} \ln \frac{10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}}{(1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}$$

$$= 0,958 \text{ V}$$



Formel Komplex



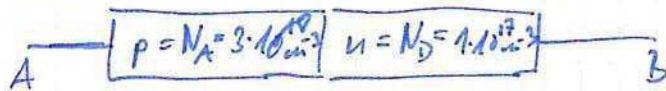


Elektronik 3

16.10.23

6663

Klausur WS 20-11: Aufgabe 1  
Anode Kathode



1.1. Schaltbild, n-Gebiet, p-Gebiet



$$n_i^2 = n \cdot p$$

1.2. ① Bor:  $p_1 = N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

$$n_1 = \frac{n_i^2}{p_1} = 75 \text{ cm}^{-3}$$

② Phosphor:  $n_2 = N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$$p_2 = \frac{n_i^2}{n_2} = 2,25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

1.3.  $U = -0.5V$  Sperrspannung  $< 0V$

$$d_s = \sqrt{\frac{2 \epsilon_n (N_A + N_D) (U_D - U)}{q N_A N_D}}$$

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.87V$$

Raumtemperatur 25mV

$$U_D - U = 0.87V - (-0.5V) = 1.37V$$

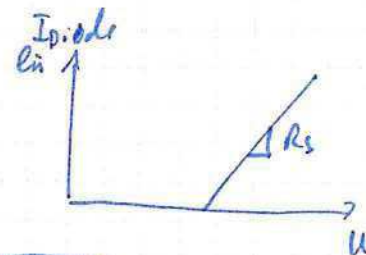
$$d_s = 0.136 \mu m = 136 \mu m$$

Diode: Umschalten von Durchlassbereich zu Sperrbereich

Temperaturmessung mit einer Diode

$I_{Diode} = I_s e^{\frac{U}{uT}}$  Durchlassbereich

Serieswiderstand  
 $I_{Diode} = I_s e^{\frac{U - I_{Diode} \cdot R_s}{uT}}$

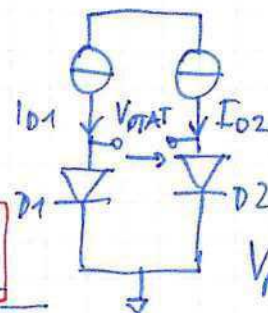


$$V_{PTAT} = U_{D1} - U_{D2}$$

$$= uT_f \ln \frac{I_{D1}}{I_s} - uT_f \ln \frac{I_{D2}}{I_s}$$

$$\frac{I_{Diode}}{I_s} = e^{\frac{U}{uT}} = uT_f \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{u k T}{q} \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}}$$

$$\frac{U}{uT_f} = \ln \frac{I_{Diode}}{I_s} \quad U = uT_f \ln \frac{I_{Diode}}{I_s}$$



$$V_{PTAT} = \left( \frac{u k}{q} \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right) \cdot T$$

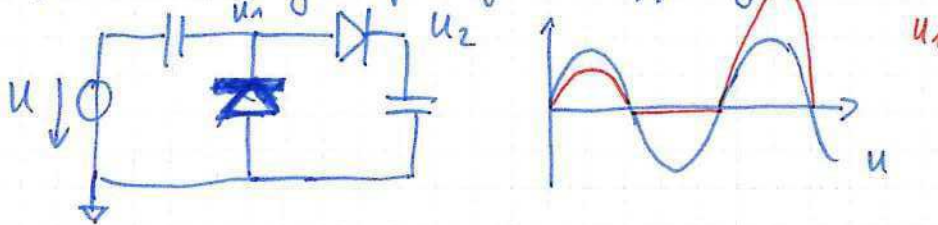


Elek 3  
16.10.23

$$I_{D1} = 100 \mu A, I_{D2} = 10 \mu A, n = 1$$

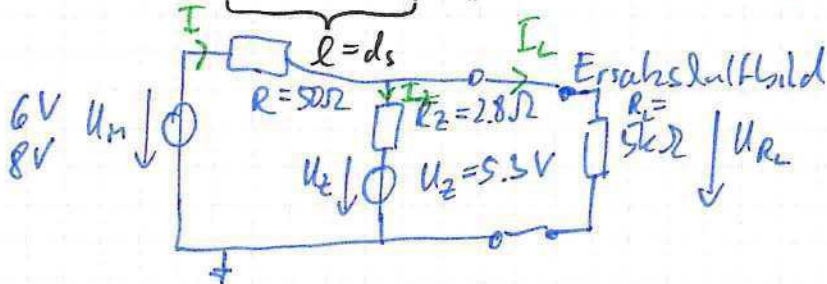
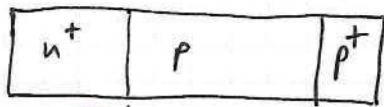
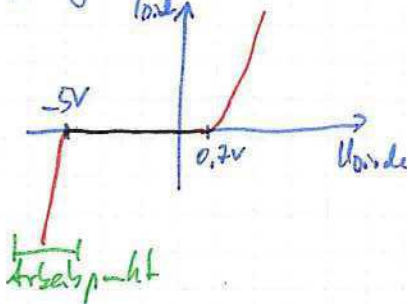
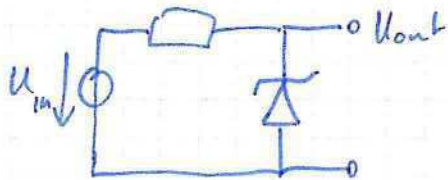
$$\frac{k}{q} \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}} = 0.2 \text{ mV/K}$$

Villard Schaltung: Spannungsverdopplung



Spannungsregulierung mit einer z-Diode

z-Diode Zenerdiode Zenerspannung: 5V



Wie groß ist  $U_{RL}$ ?

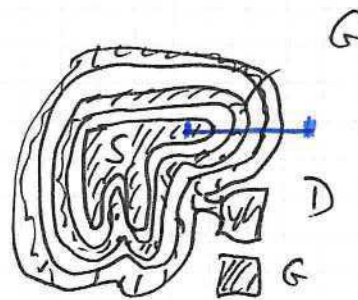
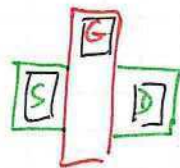
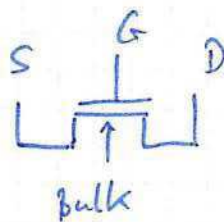




Elektronik 3

18.10.23

MOSFET G, D, S, Bulk



→ niedrig

→ W, L

Sättigungsgleichung MOSFET  $I_{DS}(U_{GS}, U_{DS})$

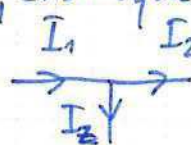
$$I_{DS} = \beta (U_{GS} - U_{TH})^2 (1 + \lambda U_{DS})$$

$$\beta = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{2 d_{ox}} \frac{W}{L} \quad d_{ox} \text{ Isolationsdicke}$$

Beispiel: z-Diode Spannungsregler

- Maschen und Knotengleichungen, Knotenpotentialeverfahren
- Spannungsleiter
- Superposition
- Quellenumwandlung, Ersatzquelle

①  $I_2 = \frac{U_L}{R_2}$



$$\frac{U_1 - U_L}{R_1} = \frac{U_L}{R_2} + \frac{U_L - U_2}{R_2}$$

Ziel:  $U_L(U_1)$

②  $I_2 = \frac{U_L - U_2}{R_2}$

④  $I_1 = I_2 + I_2$

$$R_2 R_2 (U_1 - U_L) = U_L R_1 R_2 + R_1 R_2 (U_L - U_2)$$

③  $I_1 = \frac{U_1 - U_L}{R_1}$

$$U_L (R_1 R_2 + R_1 R_2 + R_2 R_2) = U_1 (R_2 R_2) + R_1 R_2 U_2$$

$$U_L = \frac{U_1 R_2 R_2 + U_2 R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_2 + R_2 R_2}$$

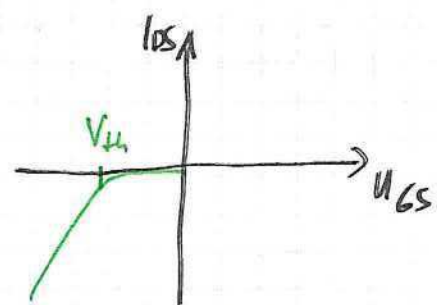
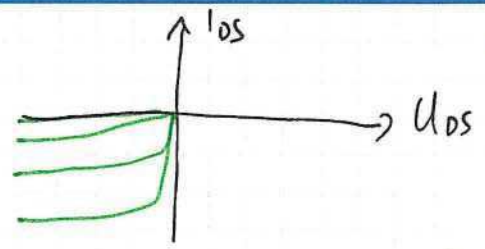
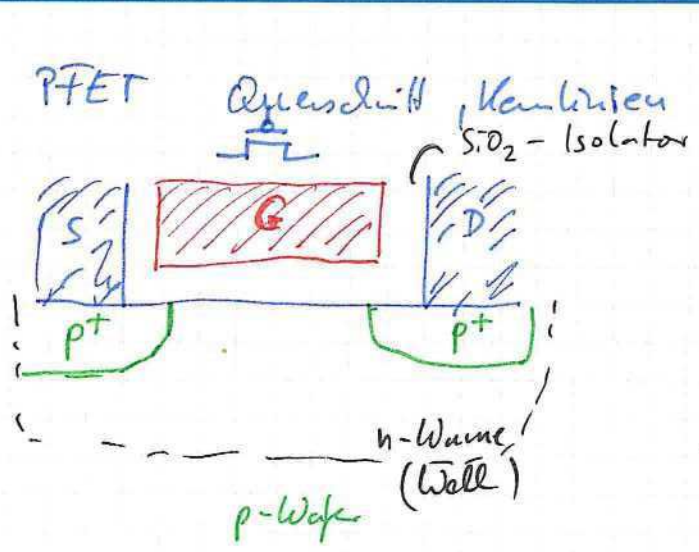
$U_{Lmin} = 5,33 \text{ V}$

$U_{Lmax} = 5,44 \text{ V}$

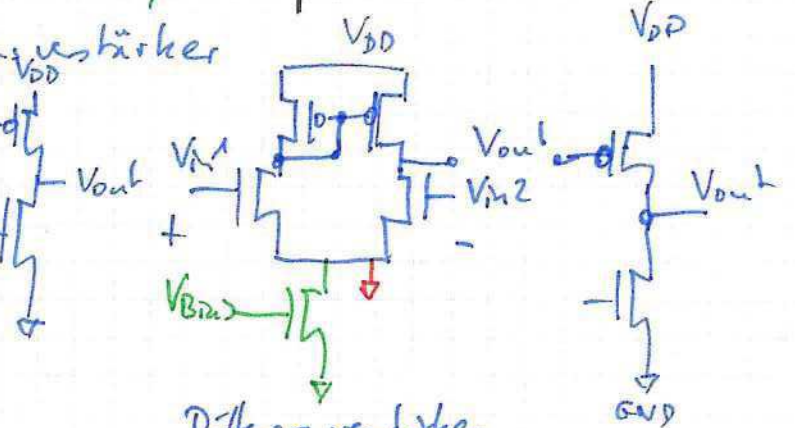
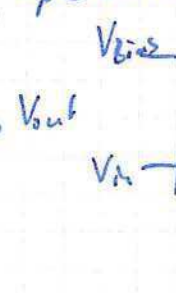
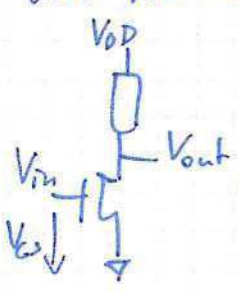




Elektronik 3  
18.10.23



Von PMOSFET → Operationsverstärker



Stromspiegel

- Parameterzahl
- Arbeitspunkt:  $U_{DS} > U_{GS} - U_{Th}$   
Sättigung

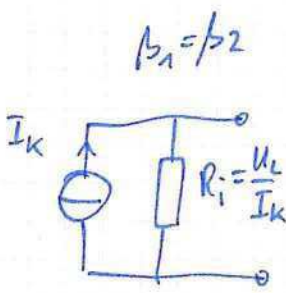
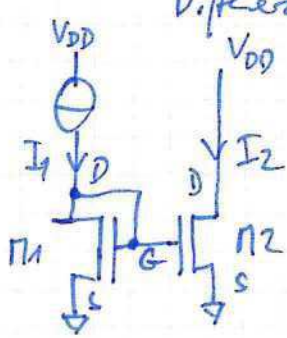
$$I_{DS} = \frac{\beta}{4} (U_{GS} - U_{Th})^2 (1 + \lambda U_{DS})$$

Berechnungsparameter

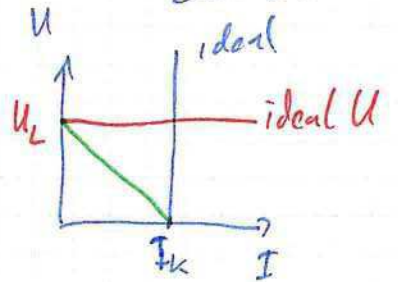
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\beta_2 (U_{GS2} - U_{Th})^2 (1 + \lambda U_{DS2})}{\beta_1 (U_{GS1} - U_{Th})^2 (1 + \lambda U_{DS1})}$$

$$= \frac{1 + \lambda U_{DS2}}{1 + \lambda U_{DS1}}$$

Differenzverstärker



Elektronik 3  
23.10.23

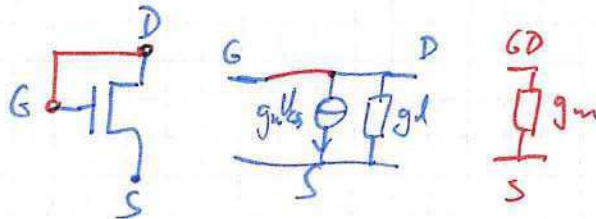




Differenzverstärkung

Elek3  
23.10.2023

Jeder Transistor wird durch sein KESB ersetzt.



$$v_u = -r_D \cdot g_m = -\frac{1}{r_{DS}} \cdot \frac{2I_{D,S}}{\lambda(U_{GS} - U_{TH})}$$

$$v_u = -\frac{2}{\lambda(U_{GS} - U_{TH})}$$

Elek3  
25.10.2023

• Linearisierung:  $g_m, g_d$

• Vierpol Eingang: Eingangswiderstand

• Ausgang: gesteuerte Quelle, Ausgangswiderstand

Bipolartransistor

• Anschlüsse:  $B, E, C$   
Formel:  $I_C = \beta I_B = \beta \frac{I_S}{\beta} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$   
 $\beta = 100 \dots 300$

Beispiel:  $I_S = 10^{-16} A$ ;  $\alpha_n = 0.95$ ;  $R_A = 20k\Omega$

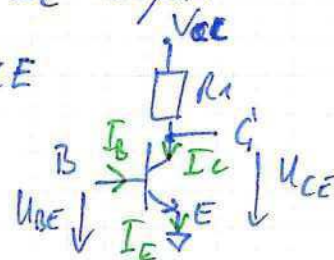
$\beta = \frac{\alpha_n}{1 - \alpha_n}$       $V_{CC} = 10V, I_C = 100\mu A$   
Ges:  $I_B, I_E, U_{BE}, U_{CE}$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_C}{\alpha_n} (1 - \alpha_n) = 5,26\mu A$$

$$I_E = I_B + I_C = 105,26\mu A$$

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_S} = 0,69V$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_A = 8V \quad U_T = 25mV \text{ Raumtemperatur}$$







Ausgangs widerstand MOSFET in Sättigung:

Elek 3  
23.10.2023

$$R_a = \frac{dU}{dI} = \frac{dU_{DS}}{dI_{DS}} = \frac{1}{\frac{dI_{DS}}{dU_{DS}}} = \frac{1}{\beta(U_{GS} - U_{th})^2 \lambda} \approx \frac{1}{I_{DS} \lambda}$$

Bsp:  $I_{DS} = 1 \text{ mA}$ ,  $\lambda = 0,00167 \text{ V}^{-1}$   $R_a = 600 \Omega$

Strompegel als aktive Last  $\rightarrow$  sehr hohe Spannungsverstärkung

Differenzverstärker

Differenzverstärkung messen, x-y Darstellung: x Eingangsspannung, y Ausgangsspannung

-  $V_{ref}$  Je niedrigere  $V_{ref}$ , je kleiner der Strom, je große Differenzverstärkung  
Hysterese nimmt zu.

- Gleichtaktverstärkung  $V_{GT} = 0.1$

- Differenzverstärkung  $V_{diff} = 200$

$$CMRR = 20 \log \frac{V_{diff}}{V_{GT}} = 66 \text{ dB}$$

common mode rejection rate

$$PSRR = 20 \log \frac{V_{diff}}{V_b}$$

power supply rejection rate  
 $V_b$ : Betriebsspannungsverstärkung

Berechnung der Differenzverstärkung

MOSFET KESB Kleinsignalersatzda (Bild)



$$g_d = \frac{dI_{DS}}{dU_{DS}} \approx I_{DS} \lambda \quad \text{Leitwert}$$

Übertragung, Leitwert (Sättigung)

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dU_{GS}} = \frac{d\beta(U_{GS} - U_{th})^2 (1 + \lambda U_{DS})}{dU_{GS}}$$

$$= \beta 2(U_{GS} - U_{th})(1 + \lambda U_{DS})$$

$$\approx \frac{2 I_{DS}}{U_{GS} - U_{th}}$$

Spannungsverstärkung  $V_u$

$$V_u = \frac{dU_{DS}}{dU_{GS}} = \frac{dI_{DS}}{dI_{DS}} \frac{g_m}{g_d}$$

$$V_u = - \frac{g_m}{g_d} = - r_o g_m$$

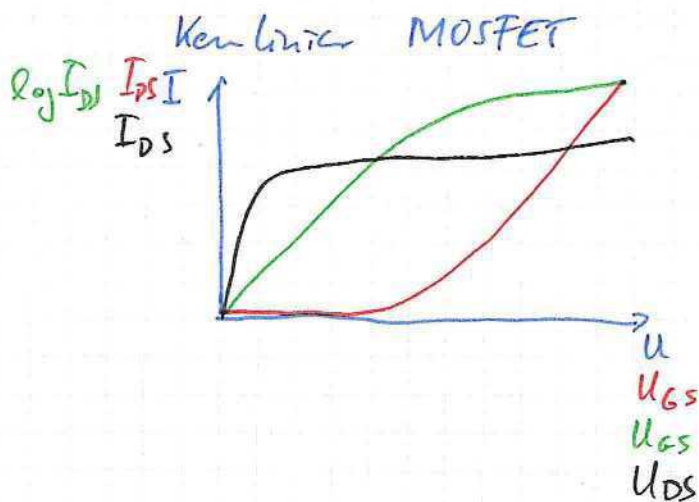


$$I_c = \underbrace{B_N I_B}_{(1 + \lambda U_{DS})} \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{EA}}\right) = I_s e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{EA}}\right)$$

Elek 3  
29.10.23

MOS

$U_{EA}$  Early Spanny  
 $B_N = \beta = h_{FE}$



Entwicklung KESB

$$r_{BE} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{1}{\frac{dI_B}{dU_{BE}}}$$

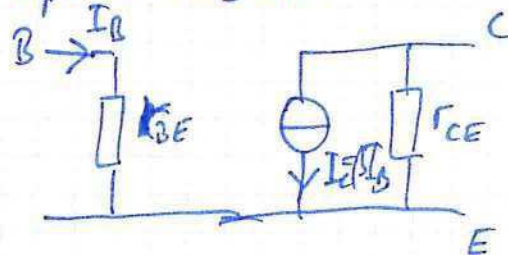
$$I_B = \frac{I_s}{B_N} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

$$r_{BE} = \frac{1}{\frac{I_s}{B_N} \frac{1}{U_T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}} = \frac{U_T}{I_B}$$

$$V_u = \frac{dU_{CE}}{dU_{BE}} = \frac{-I_{CE} \cdot r_{CE}}{I_B \cdot r_{BE}}$$

$$V_u = \frac{-\beta \cancel{I_B} \cdot r_{CE}}{\cancel{I_B} \cdot r_{BE}} = -\beta \frac{r_{CE}}{r_{BE}}$$

Bipolartransistor



$$r_{CE} = \frac{1}{\frac{dI_C}{dU_{CE}}} = \frac{1}{\frac{d(B_N I_B (1 + \frac{U_{CE}}{U_{EA}}))}{dU_{CE}}}$$

$$r_{CE} = \frac{1}{\frac{B_N I_B}{U_{EA}}} \approx \frac{U_{EA}}{I_C}$$





Frequenzverhalten eines Bipolartransistors

Elektronik 3  
25.10.23

Verstärkungsbandbreiteprodukt

gain-bandwidth product

$$GBW = v \cdot f \quad \begin{array}{l} v \text{ Verstärkung} \\ f \text{ Frequenz} \end{array}$$

$$GBW = f_g \cdot \beta = f_T \cdot 1$$

$f_T$ : Transitfrequenz

Elektronik 3  
30.10.23

### Rauschen

- Fouriertransformation

- Rauschspannen  $\frac{V}{\sqrt{Hz}}$

Rauschhöhe  $\frac{A}{\sqrt{Hz}}$

Rauschspannungseffektivwert

root mean square  
rms

$$u_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2} \quad \begin{array}{l} \text{analog} \\ \text{Diskret} \end{array} \quad \text{zeitmittel}$$

Oscilloscope  $u_{eff} = 1.4 \text{ mV}$   $N = 1024$   $\frac{f_{maxFFT}}{f_{minFFT}} = N$

$$u_{ix} = \sqrt{\frac{u_{eff}^2}{N}} = \frac{u_{eff}}{\sqrt{N}}$$

$$u_{eff} = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} u_i^2} \quad \text{frequenzmittel}$$

$$20 \log u_{ix} = -87 \text{ dBV}$$

Aufteilen des Effektivwertes auf Frequenzen:  $20 \log \left( \frac{u_{eff}}{\sqrt{N}} \right)$

$$10 \log(N_{FFT})$$

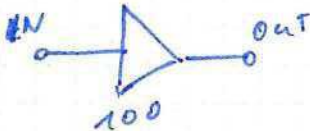
Weißes Rauschen: Werte über alle Frequenzen konstant



Bsp rausden

Elektronik 3  
30.10.23

$V_u = 100$        $f_{BW} = 100 \text{ MHz}$        $V_{out} = \frac{10 \mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$



$V_{rms, out} = V_{out} \cdot \sqrt{f_{BW}} = 100 \mu\text{V}$

$V_{rms, in} = \frac{V_{rms, out}}{100} = 1 \mu\text{V}$

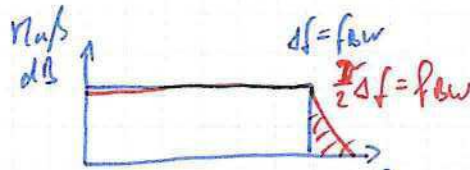
Widerstandsspannungs rausden       $U_{rR, rms} = \sqrt{4kTR\Delta f}$

$f_{BW} = \Delta f = 100 \text{ MHz}$        $R = 1 \text{ M}\Omega$        $U_{rR, rms} = 1.2 \text{ mV}$

$k = 13.8 \cdot 10^{-24} \text{ J/K}$        $T = 300 \text{ K}$

$U_{rR, pp} = U_{rR, rms} \cdot 6 = 7.2 \text{ mV}$

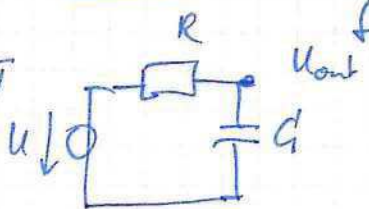
Bandbreite  $\Delta f$ ,  $f_{BW}$



$f_{BW} = \frac{\pi}{2} \Delta f$

$U_{out, noise(f)} = \sqrt{kT4R} \cdot \frac{1}{1+j\omega RC}$

$U_{out, noise, rms} = \sqrt{\frac{kT}{C}}$



$C = 1 \text{ pF}$        $U_{out, noise, rms} = 64 \mu\text{V}$        $f_3 = \frac{1}{2\pi RC}$

Diode:  $\frac{1}{f}$  rausden, Bandbreite durch Diode kapazität begrenzt

MOSFET, Bipolartransistor ähnlich  $\rightarrow$  LTSPICE, Datenblatt

Operationsverstärker: Datenblatt

- Eingangsspannungsquelle
- Eingangsstromquelle

Beispiel: nicht invertierende Operationsverstärker:





Bsp Rauschen Operationsverstärker

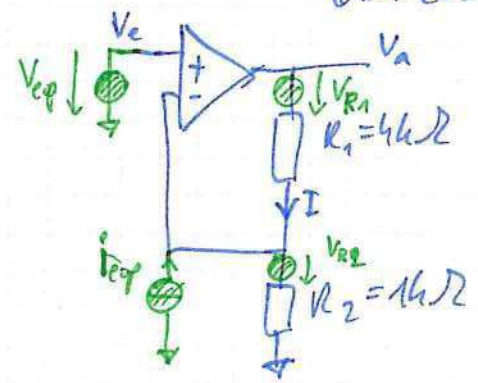
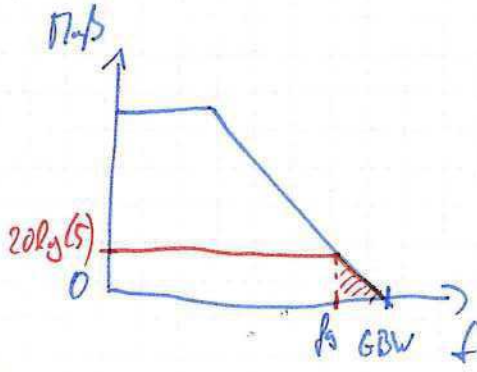
Elektrotechnik 3  
6.11.2023

$T = 300K$

$V_{eop} = \frac{3 \mu V}{\sqrt{Hz}}$

$I_{eop} = 30 \frac{\mu A}{\sqrt{Hz}}$

$GBW = 10 \text{ MHz}$



Ges:  $V_{raus}$

- Verstärker
- Quellen einzeln, Effektivwert berechnen
- Beitrag der Quellen zum Ausgang

Verstärkung:  $V_u = \frac{V_a}{V_e} = \frac{I \cdot (R_1 + R_2)}{I \cdot R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 5$

$f_3 = \frac{GBW}{V_u} = 2 \text{ MHz}$

$V_{eop rms} = V_{eop} \sqrt{f_3 \frac{\pi}{2}} = 5.3 \mu V$

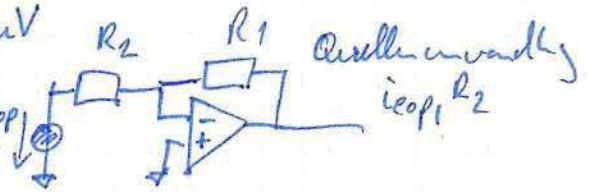
$I_{eop rms} = I_{eop} \sqrt{f_3 \frac{\pi}{2}} = 53 \text{ pA}$

$V_{R1 rms} = \sqrt{4kT R_1 f_3 \frac{\pi}{2}} = 14.4 \mu V$

$V_{R2 rms} = 7.2 \mu V$

1. Quelle  $\rightarrow V_{a eop rms} = V_{eop rms} \cdot V_u = 26.5 \mu V$

2. Quelle  $V_{i eop rms} = I_{eop} \cdot R_2 \left| -\frac{R_1}{R_2} \right| = I_{eop} \cdot R_1$



Quelle  $R_1$   $V_{a i eop rms} = I_{eop} \cdot R_1 = 202 \text{ nV}$   
 $V_{a R1 rms} = V_{R1 rms} = 14.4 \mu V$

Quelle  $R_2$   $V_{a R2 rms} = V_{R2 rms} \cdot \frac{R_1}{R_2} = 28.4 \mu V$

$V_{a rms} = \sqrt{V_{a eop rms}^2 + V_{i eop rms}^2 + V_{a R1 rms}^2 + V_{a R2 rms}^2} = 41.93 \mu V$

$V_{app} = 6.6 \cdot V_{a rms} = 273 \mu V$



Elektronik 3

8.11.2020  
Elek 3

- Spannungsregler

- Poti

- Schwingkreise

- Ladeleistung, Ladespannung, Strom

AC

$$V_{\text{emp}} = 280V$$

$$V_{\text{eff}} = 230V \rightarrow 5V/2A$$

$$f = 50Hz$$

DC

- AC, DC

- Verhältnis Eingangsspannung zur Ausgangsspannung

	In Low out High	In High out Low
In AC/DC		USB-Netzteil
AC/AC	Trafo	Trafo
DC/AC		
DC/DC	Stufwechsel Aufwärts- wandler	Linearregler / Stufwechselteil Abwärts- wandler

Linearregler

LTSPICE Schaltbild (Folie 10)

$$V_{\text{in}} = 12V$$

$$V_{\text{ref}} = 2.5V$$

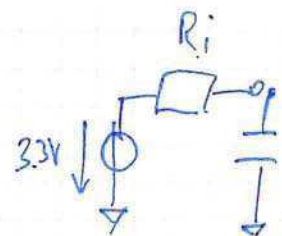
$$\frac{V_{\text{out}}}{R_2 + R_3} = I = \frac{V_{\text{ref}}}{R_3}$$

$$V_{\text{out}} = 2.5V \cdot \frac{9k\Omega}{6.8k\Omega}$$

$$V_{\text{out}} = 3.3V$$

Line Regulation

$$L_i R = \frac{dV_{\text{out}}}{dV_{\text{in}}} = \frac{3.25V - 3.15V}{12V - 6V} = \frac{0.1}{6} = 0.016$$



Last Ausregelung

$$L_o R = \frac{dV_{\text{out}}}{dI_{\text{out}}} = \frac{(3.257 - 3.247)V}{100mA} = \frac{10mV}{100mA} = 0.1\Omega$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}}}{V_{\text{in}} \cdot I_{\text{in}}} = \frac{3V \cdot 100mA}{6V \cdot 100mA} = 0.5 = 50\%$$





Elektrotechnik 3

13.11.2023  
Elektrotechnik 3

- Spannungsregler

Linieregler, Linearregler DC-DC  $\Delta U$  klein

- Wirkungsgrad  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

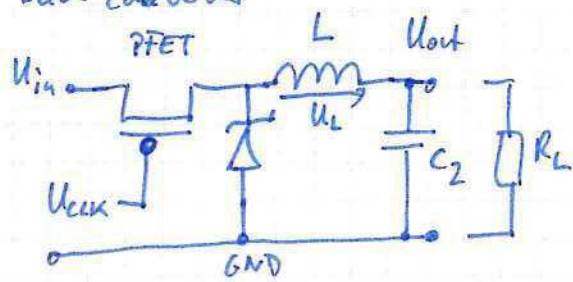
- Line regulation  $L_{IR} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}$

- Load regulation  $L_{OR} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{out}} = R_i$

- Schaltregler DC-DC Wandler Abwärtswandler

Buck converter

(Anfangsname Boost converter)



$u = L \frac{di}{dt}$        $\underline{u} = j\omega L \cdot \underline{i}$



T: Periode Dauer

$t_{ein}$ : Schalte ist geschlossen

$D = \frac{t_{ein}}{T} = \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}}$

$t_{aus}$ : Schalter ist offen

D: Duty cycle

Einschaltzeit  $t_{ein}$

$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_L}{L} dt$   
Anschaltzeit  $t_{ein}$

$U_L = U_{in} - U_{out}$

$U_{L2} = -U_{out}$

Stationäre Zustand,  $I_{min} > 0$  Continuous Conduction mode CCM  
↓ Strom negativ, Spannung negativ

$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_{in} - U_{out}}{L} t_{ein} = \frac{+U_{out}}{L} t_{aus}$

$U_{out} (t_{ein} + t_{aus}) = U_{in} t_{ein}$

$U_{out} = U_{in} \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}} = U_{in} \cdot D$  CCM



13.11.2023  
Elek 3

Mindeststrom:

$$I_{amin} = \frac{1}{2} dI_L$$

$$I_{amin} = \frac{T}{2L} U_a \left(1 - \frac{U_a}{U_c}\right)$$

Praktische Aufbau:

$V_{PT} = 5V$ , Duty cycle 50%  $V_{out} = V_{in} \cdot D = 5V \cdot 0.5 = 2.5V$

P-FET Pin  $V_{in}$  Source  $V_{out}$  Drain

$f = 10 \dots 100 \text{ kHz}$   $L = 207 \mu\text{H}$   $R_L = 4 \Omega$

$U_{out\_ripple} = 260 \text{ mV}$

$P_{in} = 5V \cdot 100 \text{ mA} = 0.5 \text{ W} = 500 \text{ mW}$

$P_{out} = \frac{1.8V}{9 \Omega} \cdot 1.8V = 0.36 \text{ W} = 360 \text{ mW}$

$\eta = 0.72 = 72\%$

$P_{Transistor} = 200 \text{ mV} \cdot 100 \text{ mA} = 20 \text{ mW}$

$I_{out} = \frac{1.8V}{9 \Omega} = 0.2 \text{ A}$

$P_{RL} = 4 \Omega \cdot I_{out}^2 = 0.16 \text{ W} = 160 \text{ mW}$

Welligkeit  $U_{aus}$

$C' = \frac{Q}{U}$   $C' = \frac{I \cdot dt}{dU}$

$dU_{out} = \frac{I \cdot dt}{C'}$

$$C' = \frac{T I_{amin}}{4 dU_a}$$

1) Bauteil LT3570

Ladepumpe

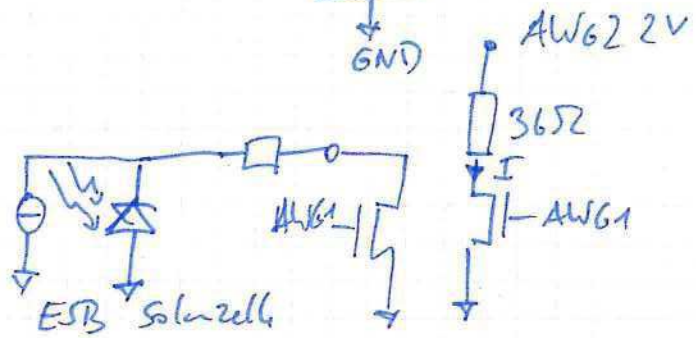
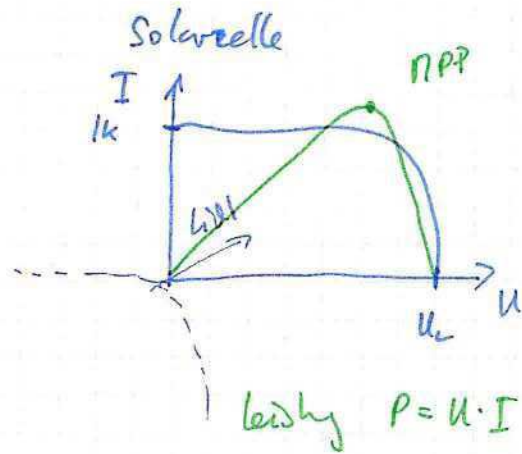
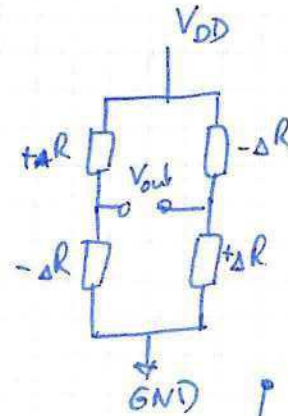




EL653  
6.11.23

### Strommessprinzipien

- Hall sensor, Stromsensor
- Wheatstone Bridge:
  - Temperaturkompensation
  - höhere Empfindlichkeit





ElleB  
13.11.2023

Rausden einer Op

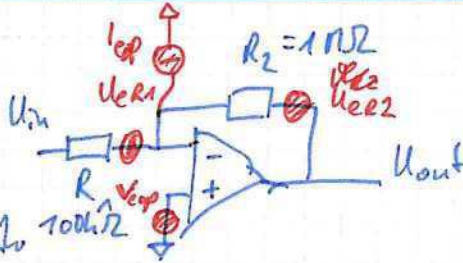
$$V_{eop} = 3 \mu V / \sqrt{Hz}$$

$$I_{eop} = \frac{30 fA}{\sqrt{Hz}}$$

$$GBW = 10 MHz$$

$$T = 80^\circ C$$

$$K = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$$

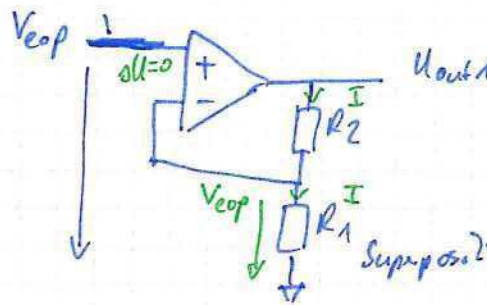


Operativs verhalten

① Rausdquelle einzeichnen

② Superposition der Quellen

$$U_{Ges} = \sqrt{\sum U_i^2} \text{ Rausdquellen}$$



Superposition  $U_{in} = 0$   $I_{eop} = 0$   $U_{eR2} = 0$   $U_{eR1} = 0$

$$V_{cop} = I \cdot R_1$$

$$U_{out1} = I \cdot (R_1 + R_2)$$

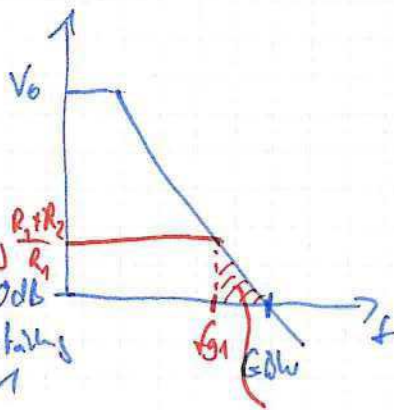
$$I = \frac{U_{out1}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{cop} = U_{out1} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{out1} = V_{cop} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$V_{cop,rms} = V_{cop} \sqrt{BW} =$$

$$U_{out,rms} = V_{cop,rms} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

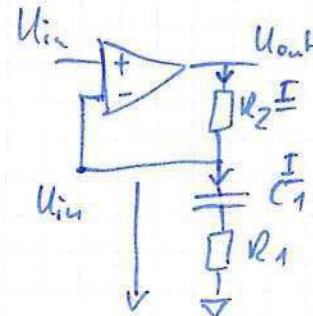


$$BW = \frac{GBW}{V_u} \frac{\pi}{2}$$





Übertragungsfunktion: WS2013 #5



Elek 3  
13.11.2023

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{(R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_1}) j\omega C_1}{(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}) j\omega C_1} \quad \text{②} \quad \frac{1}{j\omega C_1} \text{ Störterm}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{in} &= I \left( R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \\ U_{out} &= I (R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_1}) \end{aligned} \right\} \text{①}$$

Strom einzeln  
Spannung einzeln  
Nichtgleichung oder ohmsches  
Gesetz in komplexen

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{j\omega C_1 (R_1 + R_2) + 1}{j\omega C_1 R_1 + 1} \quad \frac{C_1 (R_1 + R_2)}{C_1 (R_1 + R_2)} = 1$$

$$= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{j\omega + \frac{1}{C_1 (R_1 + R_2)}}{j\omega + \frac{1}{C_1 R_1}}$$

2.  $\lim_{\omega \rightarrow \infty}$   
Es fließt kein Strom

1. Gleichspannungverstärkung  $\omega = 0$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{C_1 (R_1 + R_2)}{C_1 R_1} \frac{1}{\frac{1}{C_1 R_1}} = 1$$

$$a_{uDC} = 20 \cdot \log(V_{uDC}) = 0 \text{ dB}$$

3. 
$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{j\omega + \frac{1}{C_1 (R_1 + R_2)}}{j\omega + \frac{1}{C_1 R_1}}$$

$$V(3\text{dB}) = 10^{\frac{3\text{dB}}{20}} = \sqrt{2}$$

4. Eckfrequenz  $\text{Im}\{U\} = \text{Re}\{U\}$

$$\omega_1 = \frac{1}{C_1 (R_1 + R_2)} = 2\pi f_1$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi C_1 (R_1 + R_2)}$$

Zerle  
Nullstelle

$$|j + 1| = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$$

Neuer  
Polstelle



Digital Technik

Elek 3  
20.11.23

2 Zustände 0 0V 0V 0V 0V  
1 1V 2.5V 3.3V 5V

Logikgatte mit 2-Eingängen, einen Ausgang

NOT-Gatte 1Eing., 1Ausgang

Zustandsautomaten

Flip-Flops

Binärzellen 8-Stellen MSB LSB  
00101100  
Byte  
128 64 32 16 8 4 2 1

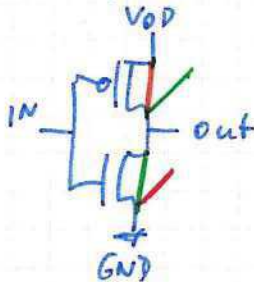
Zahlen  
positive ganze  
negativ/positiv  
Fließkommazahlen

64-bit Systeme

Zeichen: ASCII

Unicode UTF-8, UTF

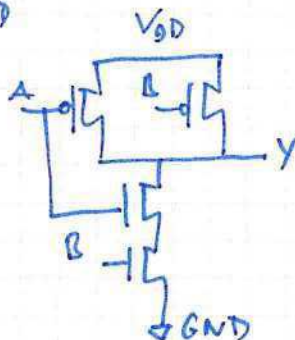
CMOS - Inverter



Eingang IN		Ausgang OUT	
0V	0	1	(V <sub>DD</sub> )
(V <sub>DD</sub> )	1	0	(0V)

Wahrheitstabelle  
Schaltmodell  
wird für alle  
Konstruktionen  
angewendet.

Beispiel:



Ges: Wahrheitstabelle

Eingänge		Ausgang Y
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NAND





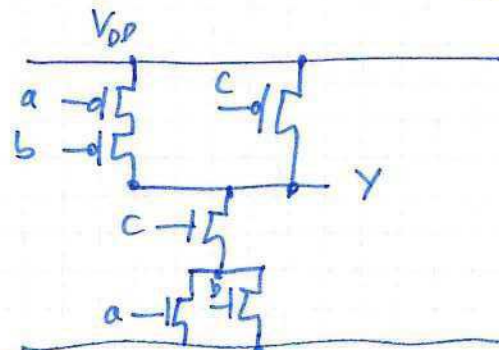


Elektronik 3

22.11.2023  
Elet.3

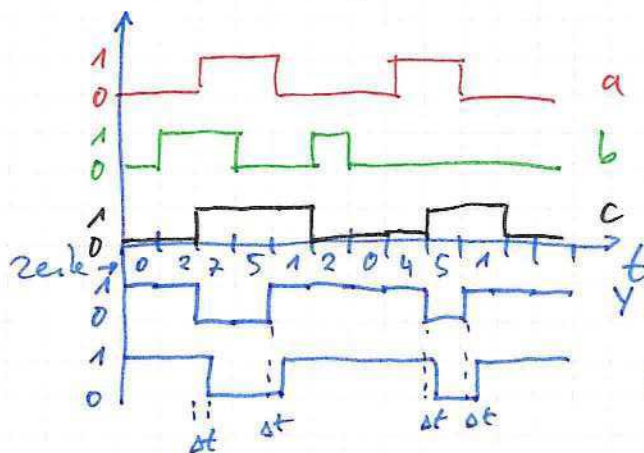
Ges: Wahrheitstabelle

	A	B	C	Y
0	0	0	0	1
1	0	0	1	1
2	0	1	0	1
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	1	0
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0



Normalform

$$Y = (\overline{A} \overline{B} \overline{C}) + (\overline{A} \overline{B} C) + (\overline{A} B \overline{C}) + (\overline{A} B C) + (A \overline{B} \overline{C})$$



Y ohne Verzögerzeit  
mit Verzögerzeit

Beispiel:



NAND

X1	X2	YNAND
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

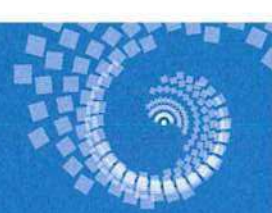
UND

X1	X2	YUND	YODER
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

$$Y = (AB) + (CD) = (A \wedge B) \vee (C \wedge D)$$

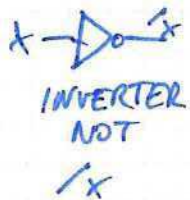
A	B	C	D	Y1	Y2	Y	Boolesche Fktion (AB)	(CD)	(AB)+(CD)
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1





EGG 3  
22.11.23

$$\text{Out } 0 = (\text{IN2} \cdot \text{IN1} \cdot \text{IN0}) + (\text{IN2} \cdot \text{IN1} \cdot \text{IN0})$$



$$\text{OUT } 1 = (\text{IN2} \cdot \text{IN1} \cdot \text{IN0}) + (\text{IN2} \cdot \text{IN1} \cdot \text{IN0})$$

Übung 2 Aufgabe 2

$\overline{x}$  NOT NICHT

$x \vee y$  NOR NICHT (ODER)

$\overline{x \vee y}$  NAND NICHT (UND)

Reihenfolge wie immer zwischen Klammern

x1	x2	NOR	NAND
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	0

x3	x2	x1	H1	H2	H3	Y
0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1
1	0	1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	0	1

$\overline{x_1}$   $\overline{x_2}$   $\overline{x_3}$   $\overline{H_1}$   $\overline{H_2}$   $\overline{H_3}$   $\overline{Y}$

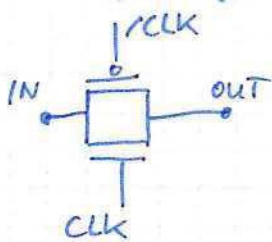
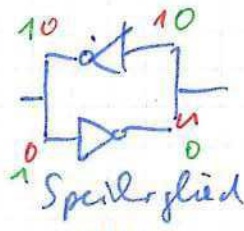


Elektronik 3

4.12.2023  
Elek 3

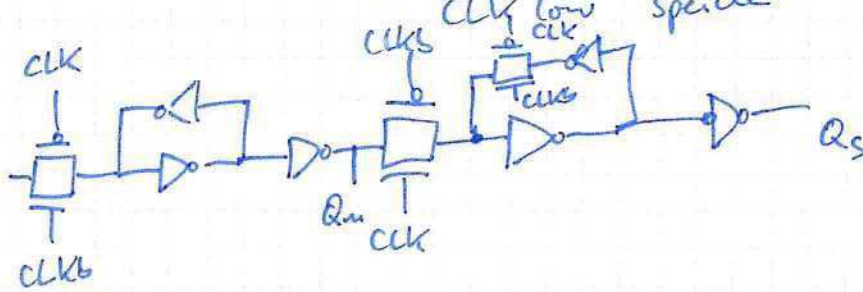
- Schaltwerke Speicherglied D-FF

Inverter und Rückkopplung



CLK	OUT
0	Hi-Z nicht verbunden
1	IN

- Taktszustandssteuerung CLK high output IN verbindet  
CLK low clk speichert



Zustandstabelle

Eingänge	Zustand <sub>n</sub>	Zustand <sub>n+1</sub>



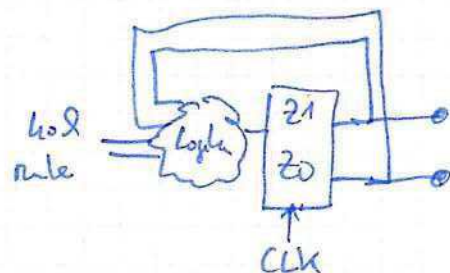


2-Bit Zähler: hochzähler, runterzählen

Hoch	Runter	Z <sub>1n</sub>	Z <sub>0n</sub>	Z <sub>1n+1</sub>	Z <sub>0n+1</sub>
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1
0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0

Hoch=1 hochzähler  
runter=1 runterzählen  
hoch=1 & runter=1 nicht zählen  
hoch=0 & runter=0 nicht zählen

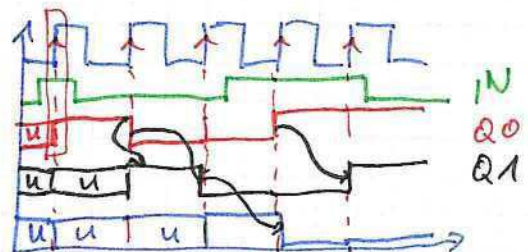
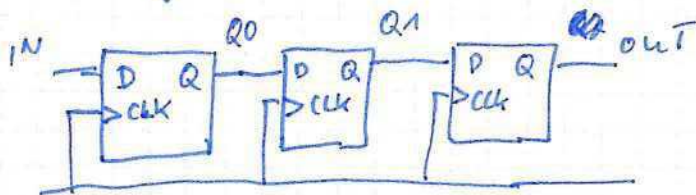
Elek 3  
4.12.23



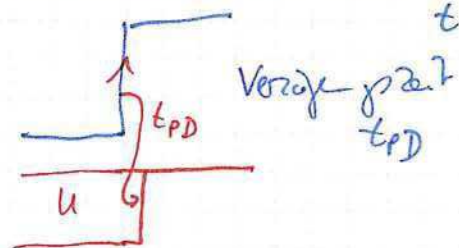
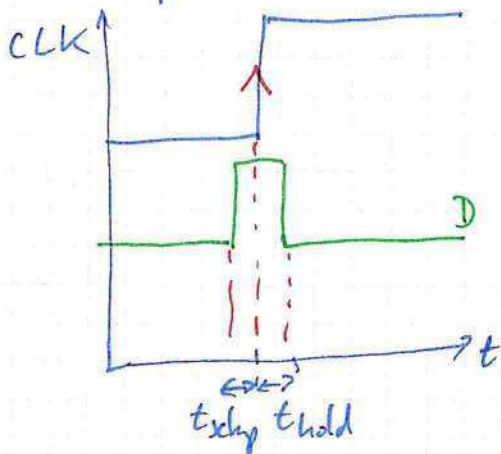
Test: Speicher aufgesetzt werden

nicht zählen

Schnelle Register



Setup & hold Zeit



$$t_{CLK} = t_{PD DFF} + t_{PD Logic} + t_{setup}$$



Elektrotechnik 3

Elekt 3  
6.12.23

- D-FlipFlop

Eingänge: D, CLK, RES

Test

TE, TDI

Ausgänge: Q, bQ/Q

TDO  
Schreibregister  
Scan-Test

- Logik Verzögerung, Setup Zeit, Hold Zeit

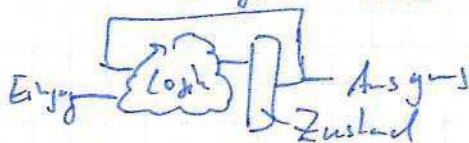
$$f_{max} = \frac{1}{T_{clk}} = \frac{1}{t_{DFF} + t_{Dlogik} + t_{setup}}$$

$$P = P_{leakage} + P_{aktiv}$$

$$P_{aktiv} \sim f_{max} \cdot C_{gesamt}$$

$$P_{aktiv} \sim U^2$$

$$V_{DD} = 0.9V / 1.0V$$



Zustandstabellen

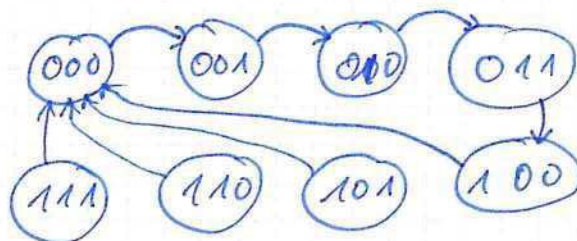
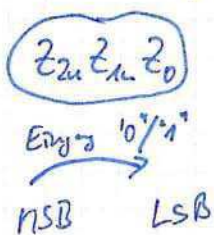
Eingänge	Zustand n			Zustand n+1		
	$z_{2n}$	$z_{1n}$	$z_{0n}$	$z_{2n+1}$	$z_{1n+1}$	$z_{0n+1}$
0 0 0	0	0	0	0	0	1
0 0 1	0	0	1	0	1	0
0 1 0	0	1	0	0	1	1
0 1 1	0	1	1	1	0	0
1 0 0	1	0	0	0	0	0
1 0 1	1	0	1	0	0	0
1 1 0	1	1	0	0	0	0
1 1 1	1	1	1	0	0	0

• Modulo 5 Zähler

• Zustandsgraph

- Aufgabenstellung klären
- 0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 4, ...
- Binäre Zahlen
- Zustandstabelle (Zustandsgraph)
- i' an Ausgang Zustand n+1
- SOP
- Inverter, NAND Gatter
- 5, 0    6, 0    7, 0

Zustandsgraph







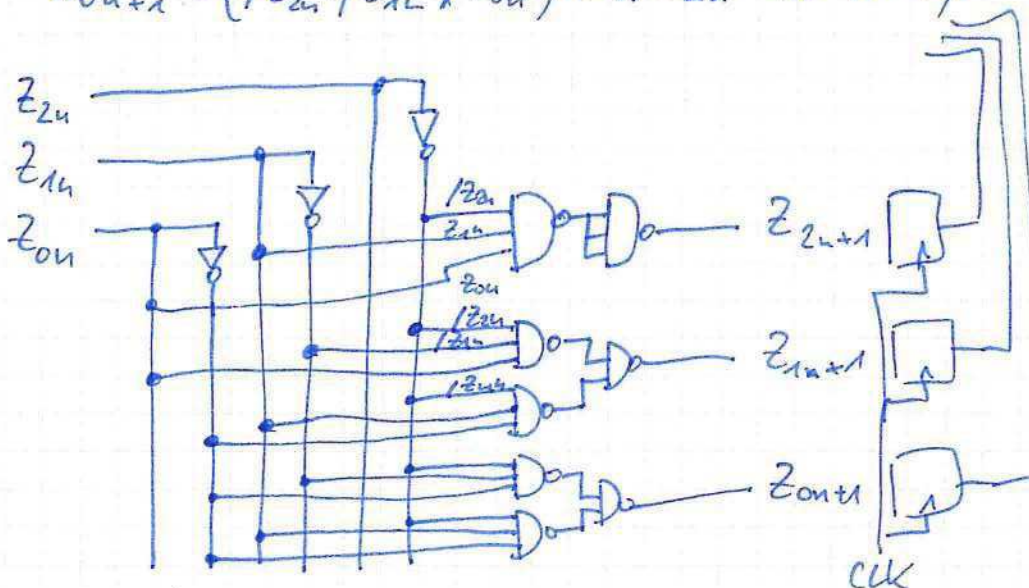
Elek 3  
6.12.2023

Schaltplan      SUM of Products SOP

$$z_{2n+1} = (\neg z_{2n} \cdot z_{1n} \cdot z_{0n}) +$$

$$z_{1n+1} = (\neg z_{2n} \cdot \neg z_{1n} \cdot z_{0n}) + (\neg z_{2n} \cdot z_{1n} \cdot \neg z_{0n})$$

$$z_{0n+1} = (\neg z_{2n} \cdot \neg z_{1n} \cdot \neg z_{0n}) + (\neg z_{2n} \cdot z_{1n} \cdot \neg z_{0n})$$



Bei größeren Schaltungen: Programmierbare Logikbausteine



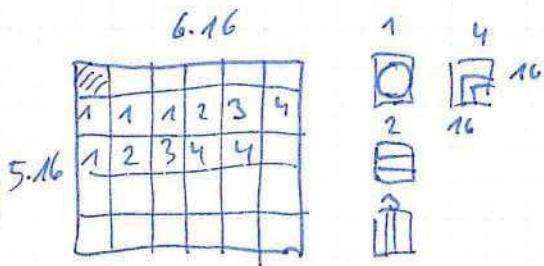
### Elektronik 3

Elek 3  
11.12.2023

- Elemente übereinander
- pdf → besser: LTSPICE
- Nachschiff hochladen

### Digitaltechnik

- Bitmap, Sprite
- Speicher, Aufwand



### - Modulo 5 Zähler

- Aufgabenstellung klären: Eingänge, Zustände (Ausgänge)
  - Zustadstabelle oder Zustandsübergangstabelle
    - SoP Sum of products
    - Invert. / NAND Gates → Schaltung
    - Simulation und Messung Verifikation
- ↓  
FPGA

### Serial-Parallel Wandler

SERDES serializer, deserializer

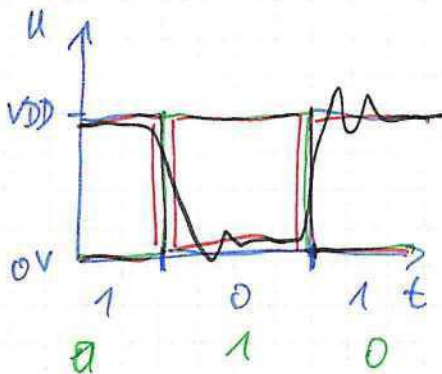
### Bildschirm

USB, UART, CAN BUS, I2C, SPI, Ethernet, HDMI, DVI

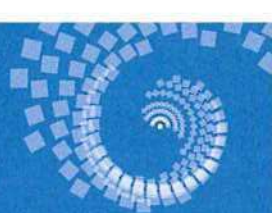
OSI Schichtenmodell → Bitdarstellung, Byte Darstellung

Datenmenge

BER Bit error rate







Elektronik 3

13.12.2023  
- Elec3

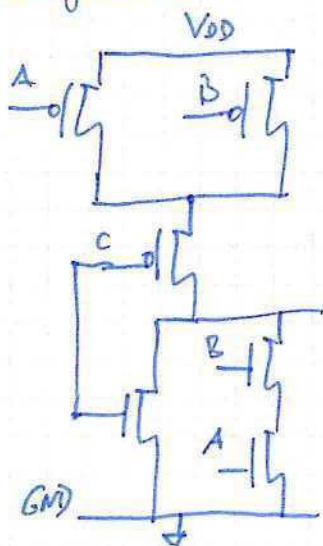
Evaluation

- Mitschrift ergänzen

(1) Transistorschaltung Wahrheitstabelle, Zeitverläufe

(2) Logikgatter und DFF Zustands-tabelle, Zustandsdiagramm, Zeitverläufe

Aufgabe 6



AOI-Schaltung

$(A \cdot B) + C'$   
Klammern

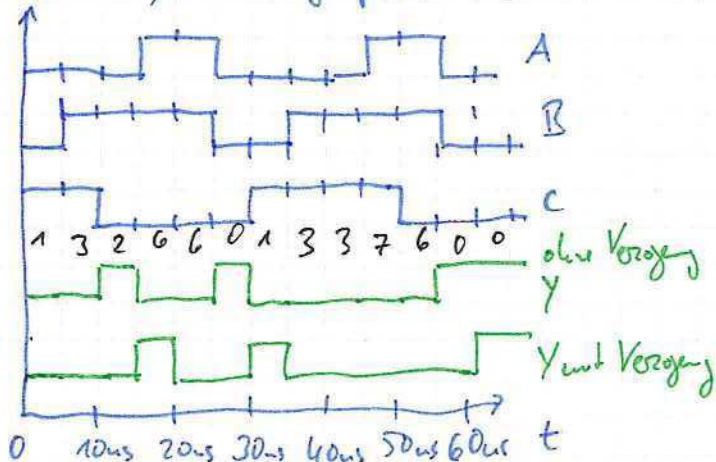
• Zeitdiagramm

• Eingänge / Ausgänge (Zustände) Verzögerzeit Sus

Y	A	B	C	Y
	0	0	0	1
	1	0	0	0
	2	0	1	1
	3	0	1	0
	4	1	0	1
	5	1	0	0
	6	1	1	0
	7	1	1	1

Durch Zelle  
2<sup>3</sup>-Zeilen  
3-Eingänge

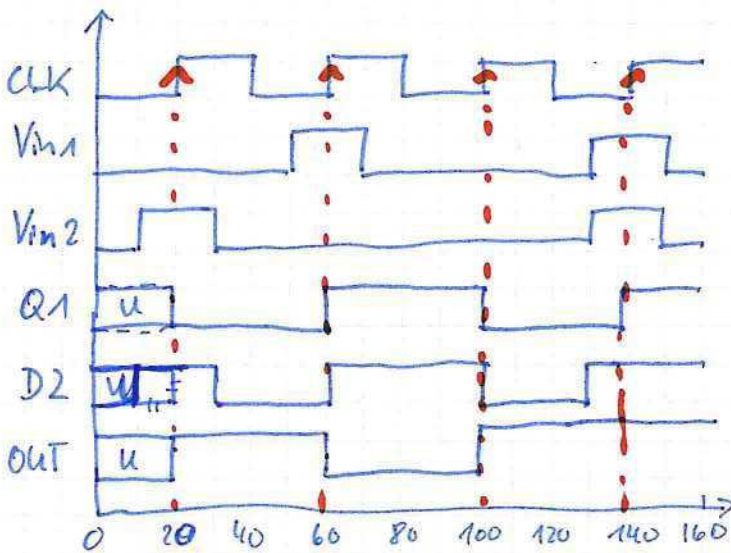
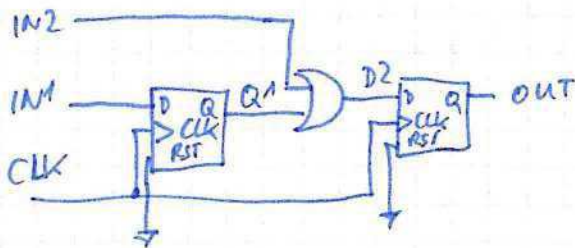
NFET G=1 Schaltk. ist zu DS verbunden  
PFET G=0 Schaltk. ist zu





SS2013 Aufgabe 2

Elek 3  
13.12.2023

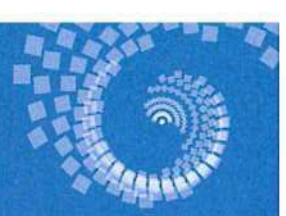


Ergebnis	Zustand		D2		D2	
	IN2	IN1	Q1 <sub>n</sub>	D2	Q1 <sub>akt+1</sub>	OUT <sub>akt+1</sub>
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	1
2	0	1	0	0	1	0
3	0	1	1	1	1	1
4	1	0	0	1	0	1
5	1	0	1	1	0	1
6	1	1	0	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1

u undefiniert (man weiß nicht mit welchem Wert das DFF startet.)

Transitionsdichte für Verzögerungszeit und Wahrheitstabelle





### Beispiel

ELG 3  
18.12.2023

$V_{ref} = 3.3V$        $N_{Bit} = 10$

Ges:  $LSB = 3.22265625 \text{ mV} = \frac{V_{ref}}{2^{N_{Bit}}}$

$LSB = 3.223 \text{ mV}$

Code (2.000V)

Verschl:  $LSB = 3.22 \text{ mV}$

$Code_{max} = 2^{10} - 1 = 1023$

$LSB \cdot 1024 = 3.297 \text{ V}$

Der Fehler sollte immer kleiner als  $\frac{1}{2} LSB$  sein.

Kalibrierung: DAC Code 0  $V(0)$  Code<sub>max</sub>  $V(max)$   
 Offset  $LSB_{real} = \frac{V(max) - V(0)}{Code_{max} - Code_{min}}$

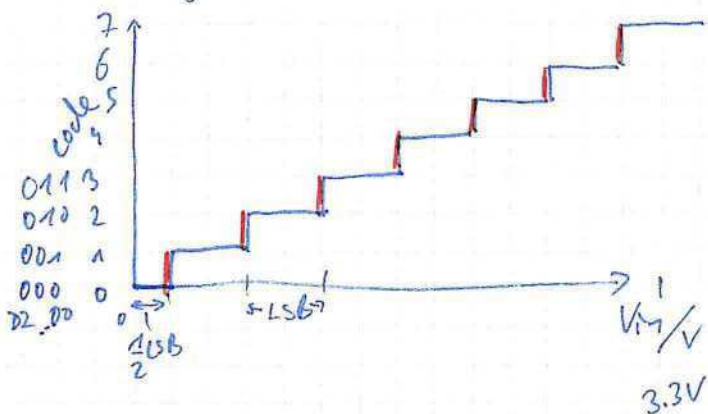
$$Code = \frac{V_{out} - V(0)}{LSB_{real}} + Code_0$$

2.000V       $Code(2.000V) = \frac{2.000V}{LSB} = 620.54 \Rightarrow 621$

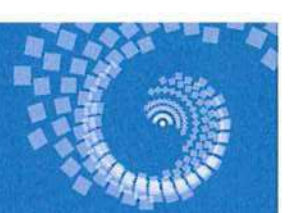
$V_{out}(621) = 621 \cdot LSB = 2.0015V$

### Analog digital Wandler

### Kalibrierung



Minimale Spannung für Codeänderung  
Maximale Spannung für eine Codeänderung



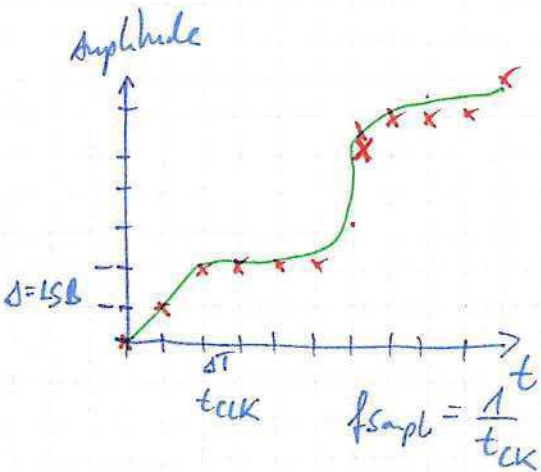
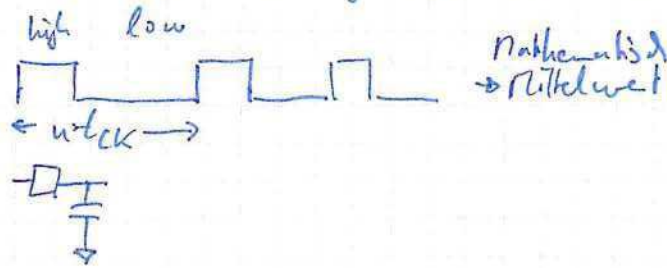
### Elektronik 3

18.12.2023  
Elek 3

- Datenwandler Elektrotechnik Digital ↔ Analog

DA<sub>W</sub> digital analog converter ADC analog-digital converter

Pulsweitenmodulation



$\Delta = \text{LSB}$  least significant bit

NHz Funk

Taktfrequenz Mobiltelefon, PC, Laptop GHz

FPGA 100 MHz

Arduino Atmega 100 kHz

16 MHz Arduino UNO

20.. 20 kHz Audiosignale

NBit

Vref

$$\text{LSB} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{\text{Nbit}}}$$

Arduino Beispiel:  $V_{\text{ref}} = 3.3\text{V}$   $\text{Nbit} = 8\text{ bit}$   $\text{LSB} = \frac{3.3\text{V}}{2^8} = 12.9\text{ mV}$   
 $12.890625\text{ mV}$

$12.9\text{ mV} \cdot 256 = 3.3024\text{ V}$

Maximal: 24 Bit

$12.8\text{ mV} \cdot 256 = 3.2768\text{ V}$





Elektroteik 3

20.12.2023  
Elek 3

- Klausur

- Übertragung
- Halbbrücke: Widerstand, Randbedingungszone
- Datenwandler und Operationsverstärker
- Rauschen: Widerstand, Operationsverstärker
- Digitaltechnik: Transistorschaltung, Zahrelemente, Eingangsspannungen
- Spannungsversorgung: Linearregler und Buckkonverter
- Link zur Mitschrift Übung 18

Datenwandler

•  $V_{ref}$ ,  $N_{Bit}$ ,  $LSB$ ,  $f_{sample} = \frac{1}{T_{sample}}$   
 $LSB_{abs} = \frac{V_{ref}}{2^{N_{Bit}}}$        $LSB_{rel} = \frac{1}{2^{N_{Bit}}}$

- Fehler: Offset Fehler, Gain Fehler:  $LSB_{rel}$


Beispiel: Arduino

Code 0..4095      12 Bit  
 RZR DA9      8 Bit

ADC für die Messung hat 12 Bit

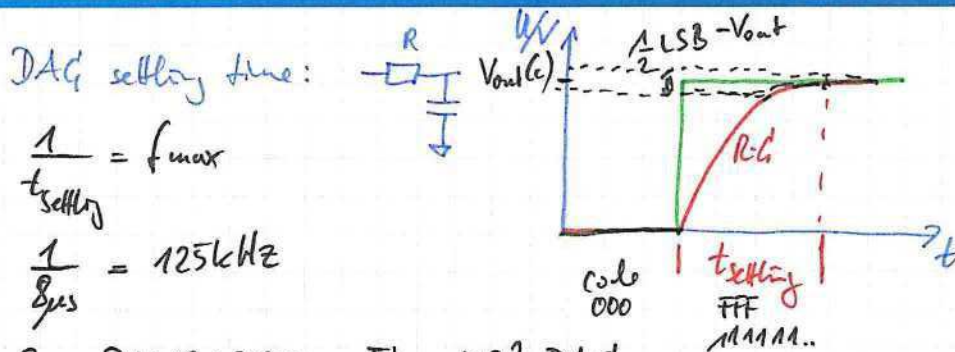
$LSB_{abs} = \frac{3.3V}{4096} = 0.805664 mV$

Fehler:  $INL(c) = \frac{V_{out}(c) - V_{ideal}(c)}{LSB}$   
 $DNL(c) = \frac{V_{out}(c) - V_{out}(c-1) - LSB}{LSB}$

 Rampen für INL, DNL verwenden.  
 $-0.5 < INL < 0.5$   
 $-0.5 < DNL < 0.5$   
 Integral von Linearität  
 Differential von Linearität



20.12.2023  
Elek 3

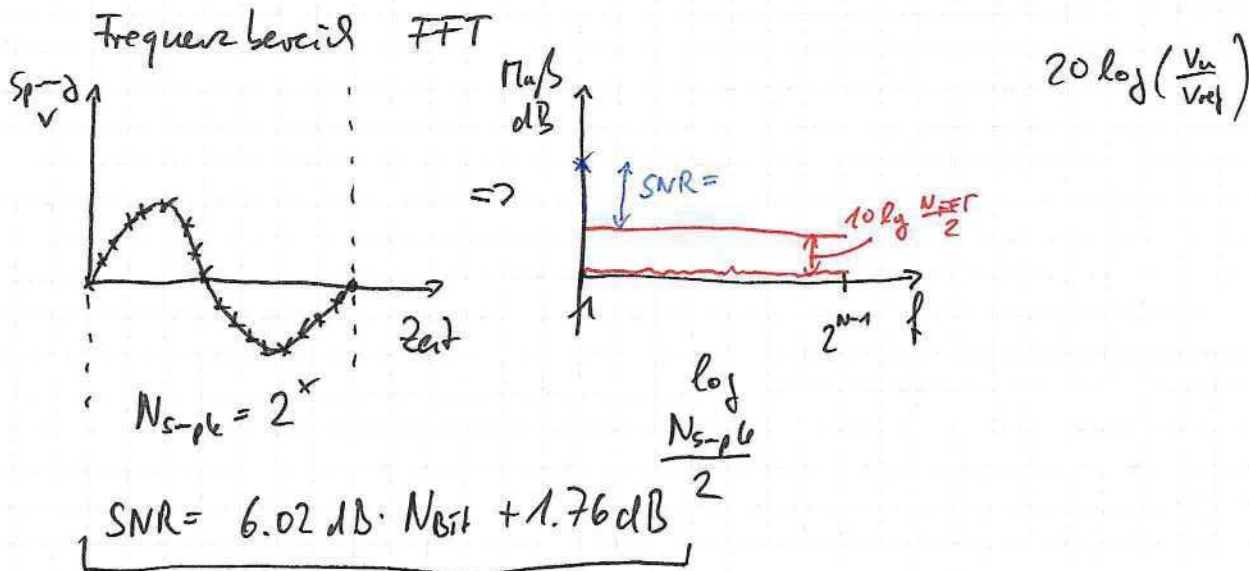


Bsp: DAC121S101, TI, 12Bit DAC  
PMOD DA2

Dynamische Eigenschaften:

SNR Signal to noise ratio

DAC  $0.. (2^{N_{\text{bit}}} - 1)$  Wertebereich des Signals  
 $\frac{1}{2}$  LSB Fehler







Elektronik 3

8.1.2024  
Elek 3  
①

#26 Beispiel Datenwandler und Operationsverstärker

14-Bit DAC,  $V_{ref} = 5V$ ,  $V_{ampl} = 10V$   $+10V$ ,  $-10V$

$f_{s-pek} = 20kHz$ ,  $V_p = 12V$   $V_m = -12V$

1.  $LSB_{abs} = \frac{V_{ref}}{2^{Nbit}} = 305,176 \mu V$

$LSB_{rel} = \frac{1}{2^{Nbit}} = 61 ppm$

2.  $LSB_{abs1} = \frac{20V}{2^{Nbit}} = 1,220703 mV$

3. SNR DAC

$SNR = SQNR = 6.02 Nbit dB + 1.76 dB = 86.04 dB$

4.  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_3 = 100k\Omega$  Ges:  $R_2$ ,  $R_4$

$V_{out1} (V_{out}) =$

(1)  $I_1 = \frac{V_p - V_x}{R_3} = \frac{V_x}{R_4}$

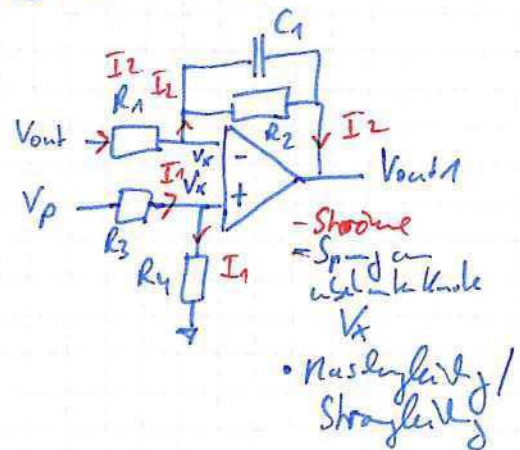
(2)  $I_2 = \frac{V_{out} - V_x}{R_1} = \frac{V_x - V_{out1}}{R_2}$

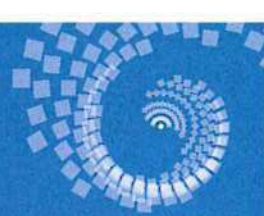
(1)'  $R_4(V_p - V_x) = R_3 V_x$   
 $R_4 V_p - R_4 V_x = R_3 V_x$   
 $R_4 V_p = (R_3 + R_4) V_x$   
 $V_x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_p$

(2)'  $R_2 V_{out} - R_2 V_x = R_1 V_x - V_{out1} R_1$   
 $R_2 V_{out} + R_1 V_{out1} = (R_1 + R_2) V_x$

$V_{out1} = \frac{1}{R_1} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} R_4 V_p - R_2 V_{out} \right)$

$V_{out1} = \frac{R_4}{R_1} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) V_p - \frac{R_2}{R_1} V_{out}$





$$V_{out} = 0V \quad V_{out1} = \frac{R_4}{R_1} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_p = 10V$$

8.1.2024  
Elc43  
①

$$V_{out} = 5V \quad V_{out1} = \frac{R_4}{R_1} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_p - \frac{R_2}{R_1} \cdot 5V = -10V$$

Ges:  $R_2, R_4$

$$10V - \frac{R_2}{R_1} \cdot 5V = -10V$$

$$\frac{R_2}{R_1} \cdot 5V = 20V$$

$$R_2 = \frac{20V}{5V} \cdot R_1 = 40k\Omega$$

$$R_4 \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_p = (R_3 + R_4) \cdot 10V$$

$$R_4 \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_p - 10V \right) = 10V \cdot R_3$$

$$R_4 = \frac{10V \cdot R_3}{\frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_p - 10V} = \frac{10V \cdot 100k\Omega}{5 \cdot 12V - 10V} = 20k\Omega$$

5.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 20kHz$$

$$R = R_2 = 40k\Omega \quad C_1 = C_1$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_2 f_1} = 199pF$$

6. Eingangsspannung  $U_{offset} =$

$$U_{out1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{offset} \leq LSB_{best} = 122mV$$

$$U_{offset} \leq \frac{122mV}{5} = 0.244mV$$

$$7. U_{offset1} = \frac{f_1}{f_0} U_{offset} = \frac{20kHz}{2\pi Hz} \cdot 0.244mV = 24.4mV$$



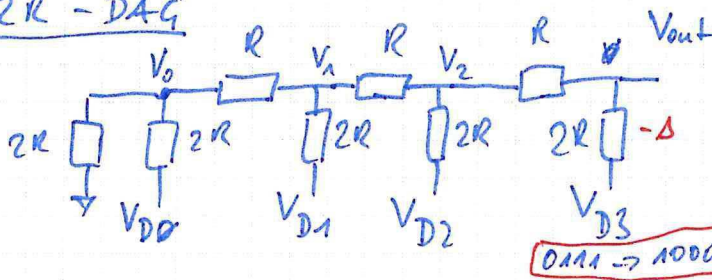


10.1.24  
Elek3

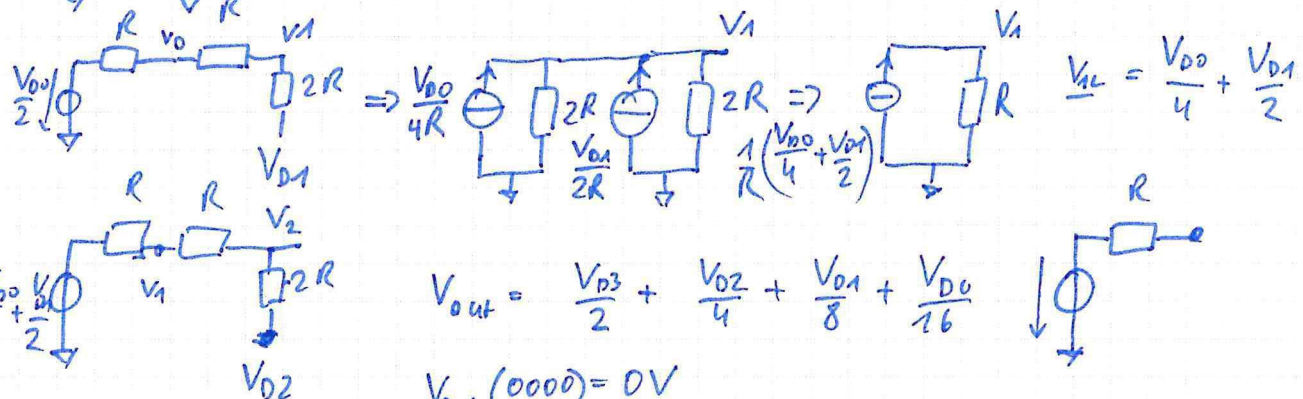
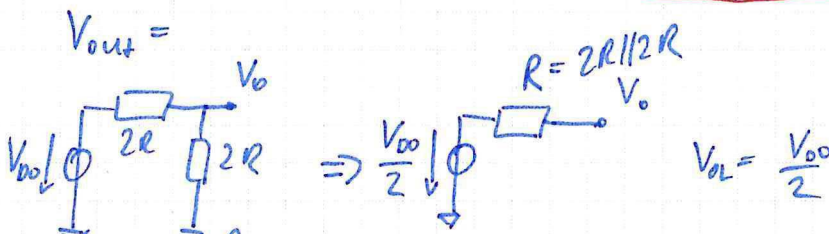
Elektronik 3

Digital-Analog-Wandler

R2R-DAC



$V_{DD}, V_{ref}$   
Versorgungsspannung  
• Superposition  
• Knotenstrom, Maschenstrom  
• Quellen wandlung



$$V_{out} = \frac{V_{D3}}{2} + \frac{V_{D2}}{4} + \frac{V_{D1}}{8} + \frac{V_{D0}}{16}$$

$$V_{out}(0000) = 0V$$

$$V_{out}(1111) = \frac{15}{16} V_{DD} = V_{max}$$

$$LSB_{real} = \frac{15}{16} \frac{1}{16} V_{DD}$$

Anzahl, Test, Messung: 16 Ausg.-spannen  $2^4 = 16$  Messen

$$V_{out}(0000) = V_{offset}$$

$$\frac{V_{out}(1111) - V_{offset}}{\frac{15}{16} V_{DD}} = \text{Gainfehler}$$

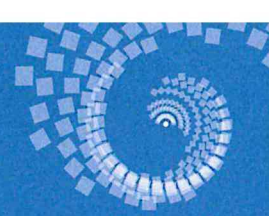
$$LSB_{real} = \frac{V_{out}(1111) - V_{offset}}{2^{N_{bit}} - 1}$$

$$\frac{V_{out} - V_{offset}}{LSB_{real}} = \text{code real}$$

Formel in Program

Alternative Operationsverstärker drehen

Kalibrieren  
Elektronisches Potentiometer  
Flash Speicher



Elektronik 3 DAC Messung

10.1.29  
Elek3

2<sup>NBit</sup> Werte gemessen Berechnen INL, DNL  
↑ ideal vs real      ↑ Schrittweite LSB

$|INL|, |DNL| < 0.5 \text{ LSB}$

$0.5 \text{ LSB} < |INL|, |DNL| < 1 \text{ LSB}$

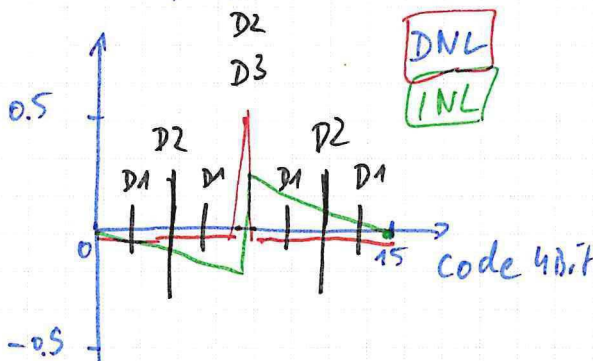
$1 \text{ LSB} < |INL|, |DNL| < 2 \text{ LSB}$

Ein Bit weniger Auflösung  
2 Bit weniger

Für jede Art von Fehlersignalen  
kann man einen Ursache beschreiben.

RZR

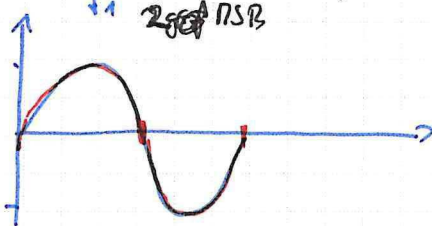
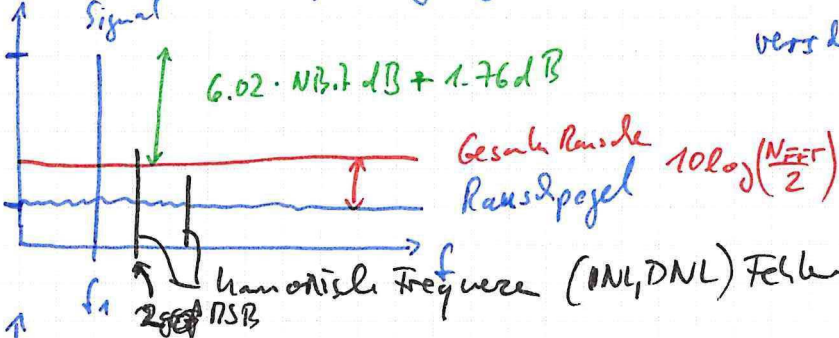
10% Fehler R → 10% Fehler  
in Ausgang  
geschwindigkeit und Daten



Leaky: DDR-Test Kurzschlüsse, Unk. brechen

Zeitverhalten, Frequenzgang, FFT Fourieranalyse

Map dB  
verschiedene Frequenzen  
→ Bandpass?







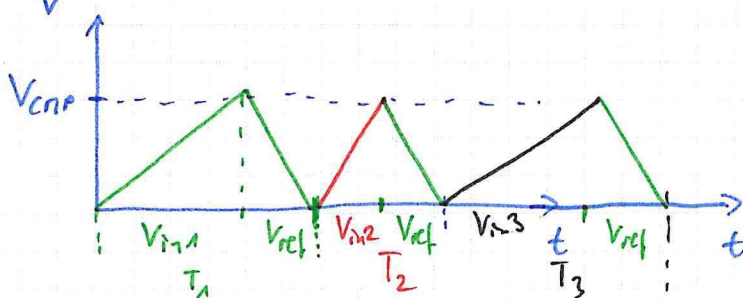
### Elektronik 3

15.1.2024

- Demo R2R DAC Rampe INL, DNL Kalibrierung S. 11 FFT SNR <sup>①</sup>

- Analog Digital Wandler

① Dual-slope Verfahren: Integrierer, Komparator, Zähler



$$V_{in} \approx \frac{1}{T}$$

#### Vorteile:

- Einfache Schaltung
- Zeitmessung unterer Zähler ist sehr genau
- 1 Signalbahn (Digital)

#### Nachteile:

- Sehr niedrige Sample Rate

1 Bit mehr Auflösung  $\Leftrightarrow$  halbe Bandbreite

② SAR ADC: successive approximation register

Steuerlogik, DAC, Komparator

Pro Taktzyklus: 1-Bit dazu

$$N_{\text{Bit}} \cdot t_{\text{clock}} = t_{\text{ADC sampling}}$$

#### Vorteile:

- Optimierung der Einzelschaltungen

#### Nachteile:

- Digitale Logikschaltung
- $N_{\text{Bit}}$  Leitungen für DAC
- $N_{\text{Bit}}$  Zyklen Latenz

Silberne Schaltung

③ Oversampling Sigma Delta ADC: 2 Pins, 2 Widerstände, 1 Kapazität

OSR  $\rightarrow$  Auflösung  $N_{\text{Bit}}$ , ENOB

$\rightarrow$  24-Bit ADC

1-Bit mehr Auflösung  $\Leftrightarrow$  halbe Bandbreite

Sigma-Delta



Elektronik 3

15.1.24  
Elek 3  
②

Erhöhung der Auflösung:

Mittelwertbildung:  $u_1, u_2$       $u = u_1 + u_2$

$$\Delta \text{SNR} = 10 \log_2(\text{OSR})$$

Mittelwertbildung über 4 Werte:  $\Delta \text{SNR} = 10 \cdot \log_2 2^2 = 20 \log_2 2 = 6 \text{ dB}$

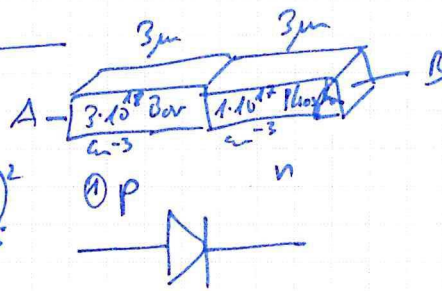
1 Bit mehr      $\frac{1}{4}$  fBW

16 Werte: 2 Bit mehr      $\frac{1}{16}$  fBW

Aufgabe: Raumladungszone Halbleiter

①  $N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3} = p$

$$n \cdot p = n_i^2 \quad n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}}$$



②  $N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} = n$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = 2250 \text{ cm}^{-3}$$

③  $R_N = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{l}{xA} = \frac{l}{A(\mu_n n + \mu_p p)} e = \frac{3 \mu\text{m}}{2 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot 800 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} + 3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$

$e: 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$\mu_n = 800 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

$R_N = 1171 \Omega$

④ Gcs: Sperrschicht wack  $U_{\text{Sperr}} = -0.5 \text{ V}$

17.1.24  
①  
Elek 3

$$d_s = \sqrt{\frac{2 \epsilon_H (N_A + N_D) (U_D - u)}{q N_A N_D}} = 0.136 \mu\text{m}$$

$(U_D + 0.5 \text{ V})$

$U_D$ : Diffusionsspannung

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.87 \text{ V}$$

$q = e = \text{Elementarladung } 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$





Rausdem

17.1.24  
Elek 3  
②

$T = 60^\circ\text{C}$

$R_2 = 400\text{k}\Omega$

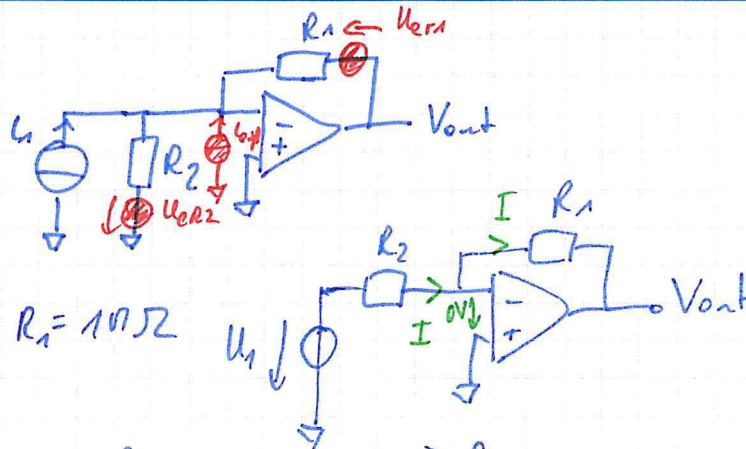
$i_{eop} = 3\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

$f_{bw} = 1\text{ MHz}$

$V_{out}(i_1) = -U_1 \cdot \frac{R_1}{R_2} = -i_1 \cdot R_1$

$i_1 = 20\text{ nA}$

$V_{out}(i_1=20\text{ nA}) = 20\text{ mV}$



$U_1 = i_1 \cdot R_2$

$I = \frac{U_1}{R_2} = -\frac{V_{out}}{R_1}$

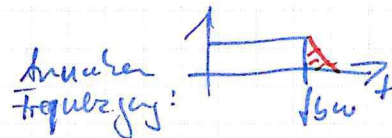
Beitrag der einzelnen Rausd. quelle an Ausgang

$U_{err1} = \sqrt{4kTR}$

$U_{err1,rms} = \sqrt{4kTR} \sqrt{\Delta f}$

$\Delta f$  2 Möglichkeiten:

$\Delta f = f_{bw}$



$\Delta f = \left(\frac{\pi}{2}\right) f_{bw}$

$T = (60 + 273)\text{ K} = 333\text{ K}$

①  $i_{eop}$

$V_{out}(i_{eop}) = i_{eop} \cdot R_1$

$i_{eop,rms} = i_{eop} \sqrt{\frac{\pi}{2} f_{bw}} = 3,7\text{ nA}$

②  $R_2$

$V_{out}(U_{err2}) = U_{err2} \cdot \frac{R_1}{R_2}$

$U_{err2,rms} = \sqrt{4kTR_2} \sqrt{\frac{\pi}{2} f_{bw}} = 107\text{ }\mu\text{V}$

③  $R_1$

$V_{out}(U_{err1}) = U_{err1}$

$U_{err1,rms} = 170\text{ }\mu\text{V}$

$V_{out,rms}(i_{eop}) = 3,7\text{ mV}$

$V_{out,rms}(U_{err2}) = 269\text{ }\mu\text{V}$

$V_{out,rms}(U_{err1}) = 170\text{ }\mu\text{V}$

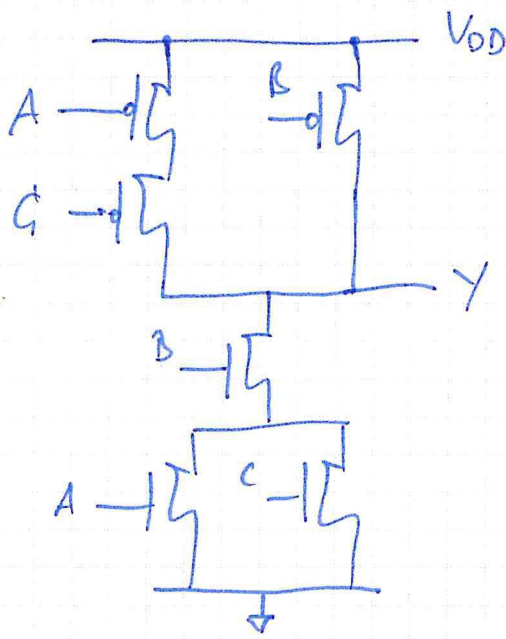
$V_{out,rms} = \sqrt{V_{out,rms}^2(i_{eop}) + V_{out,rms}^2(U_{err2}) + V_{out,rms}^2(U_{err1})}$   
 $= 3,73\text{ mV}$

$V_{ppout} = 6,6 \cdot 3,73\text{ mV} = 24,6\text{ mV}$



17.1.24  
Elek 3

Digitaltechnik Transistorschaltung



Wahrheitstabelle

Eingänge (Zustand  $t$ )

Ausgänge (Zustand  $t+1$ )

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

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

Verzögerzeit  $\Delta t$