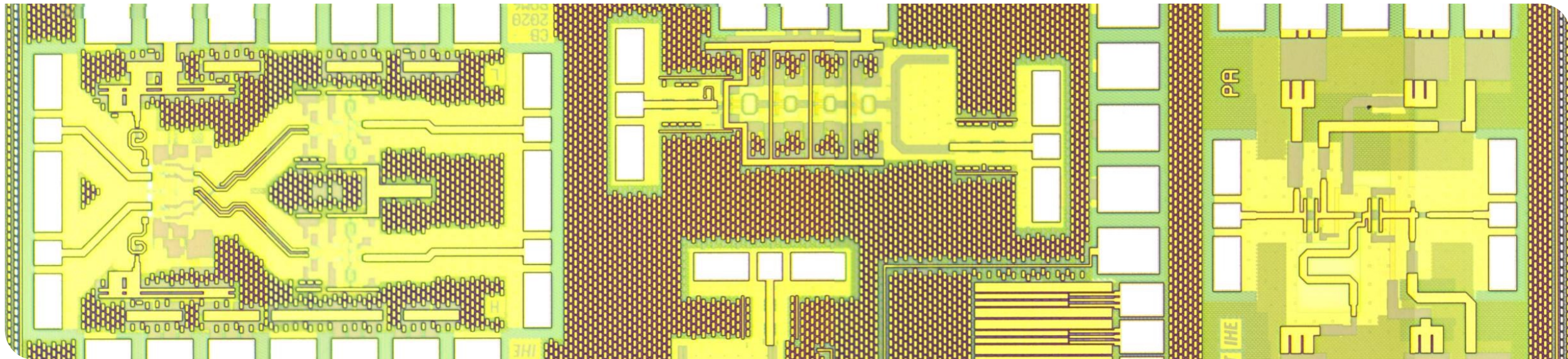
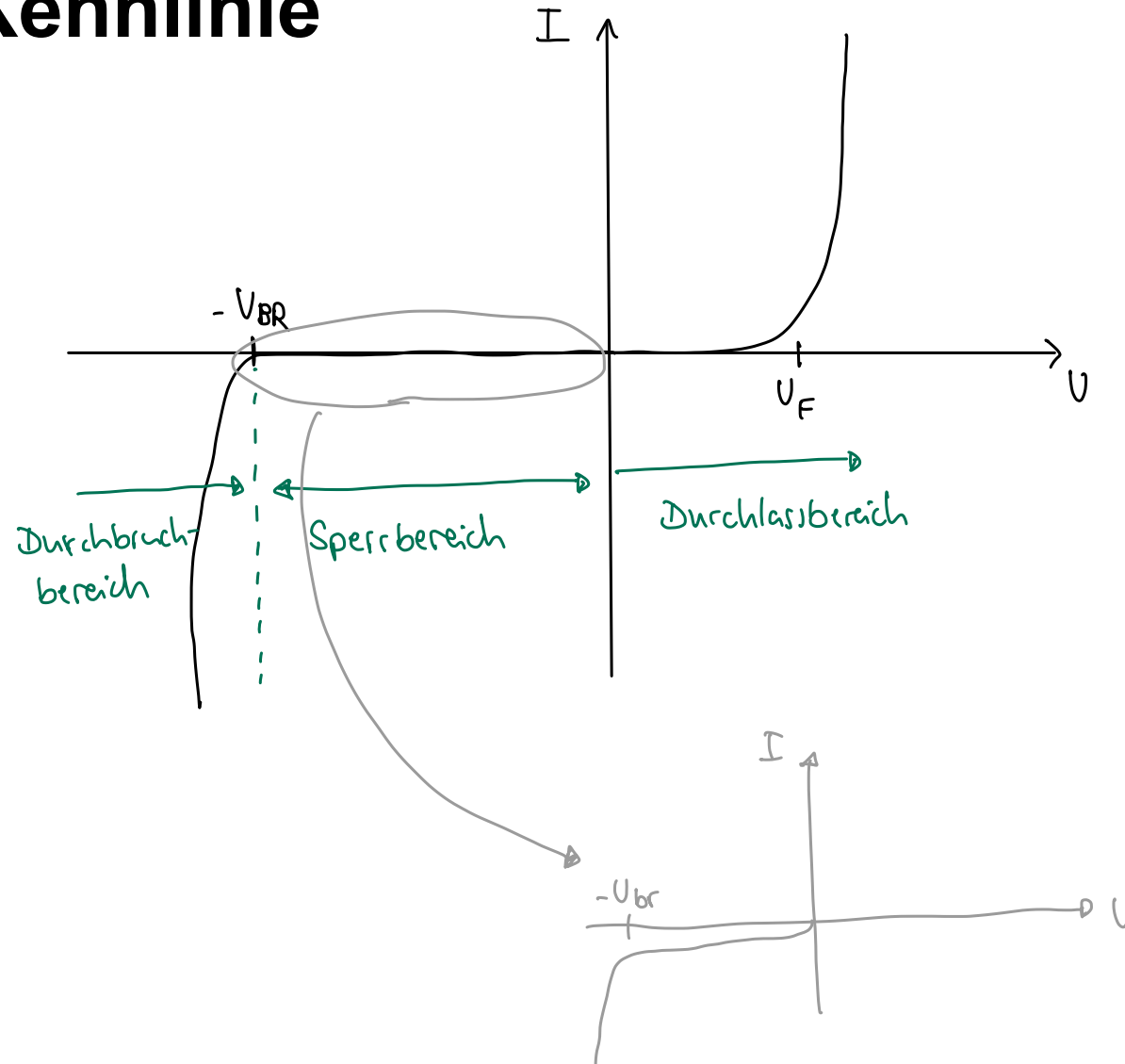


ES Übung 2 - Dioden

M.Sc. Selina Eckel



Dioden-Kennlinie



$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1 \right)$$

n : Emissionskoeffizient

U_T : Temperaturspannung

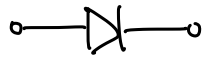
$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e}$$

Ideale Dioden:

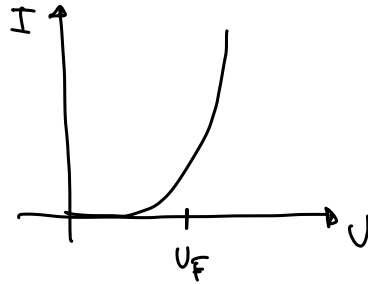
$$I = I_s \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

Dioden-Modelle

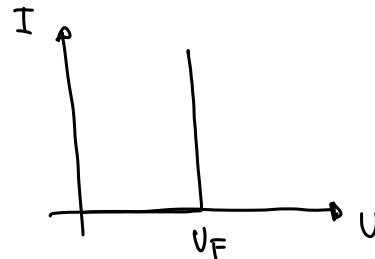
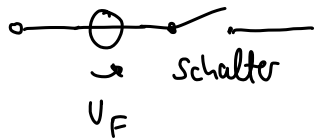
Exponentielle Modell



$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}}$$



Modell mit konst. Spannungsabfall



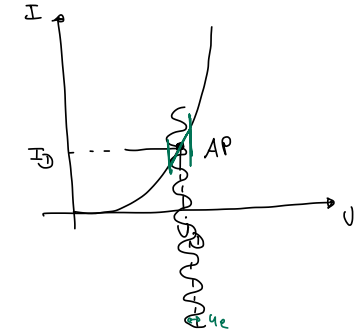
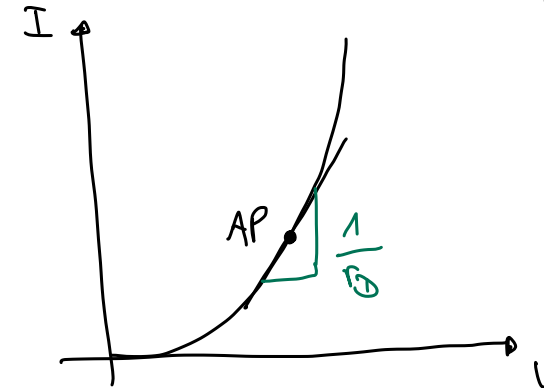
$U < U_F$: Diode "aus"
 $\hookrightarrow I_D = 0$ Schalter offen

$U > U_F$: Diode "an"
 $\hookrightarrow I_D > 0$ Schalter geschlossen

Kleinsignal Modell

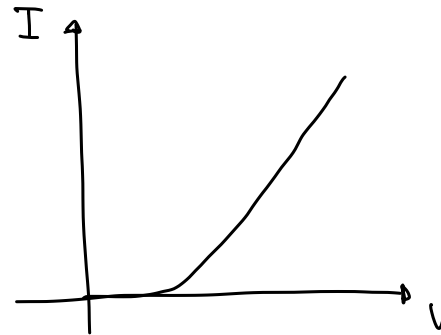
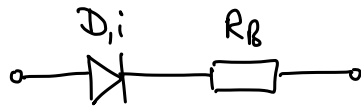


$$r_D = \frac{\partial U}{\partial I} = \frac{U_T}{I_D}$$

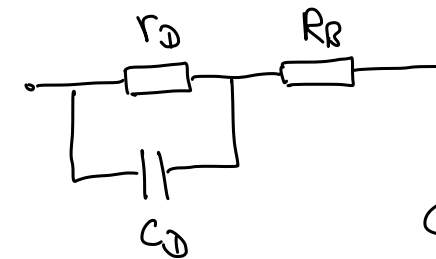


Reale Diode

Exponentielles Modell

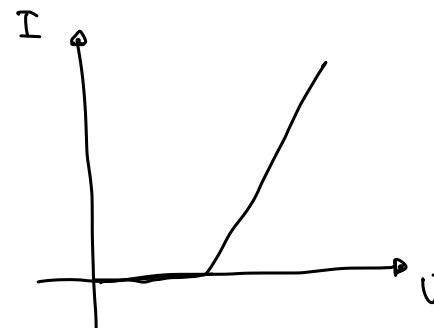
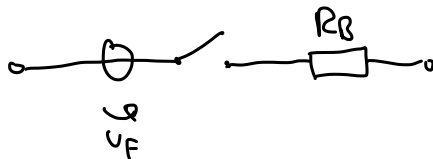


Kleinsignal Modell



$$C_D = C_S + C_{D,D}$$

Modell mit konst. Spannungsabfall



Aufgabe 1 - Großsignalanalyse

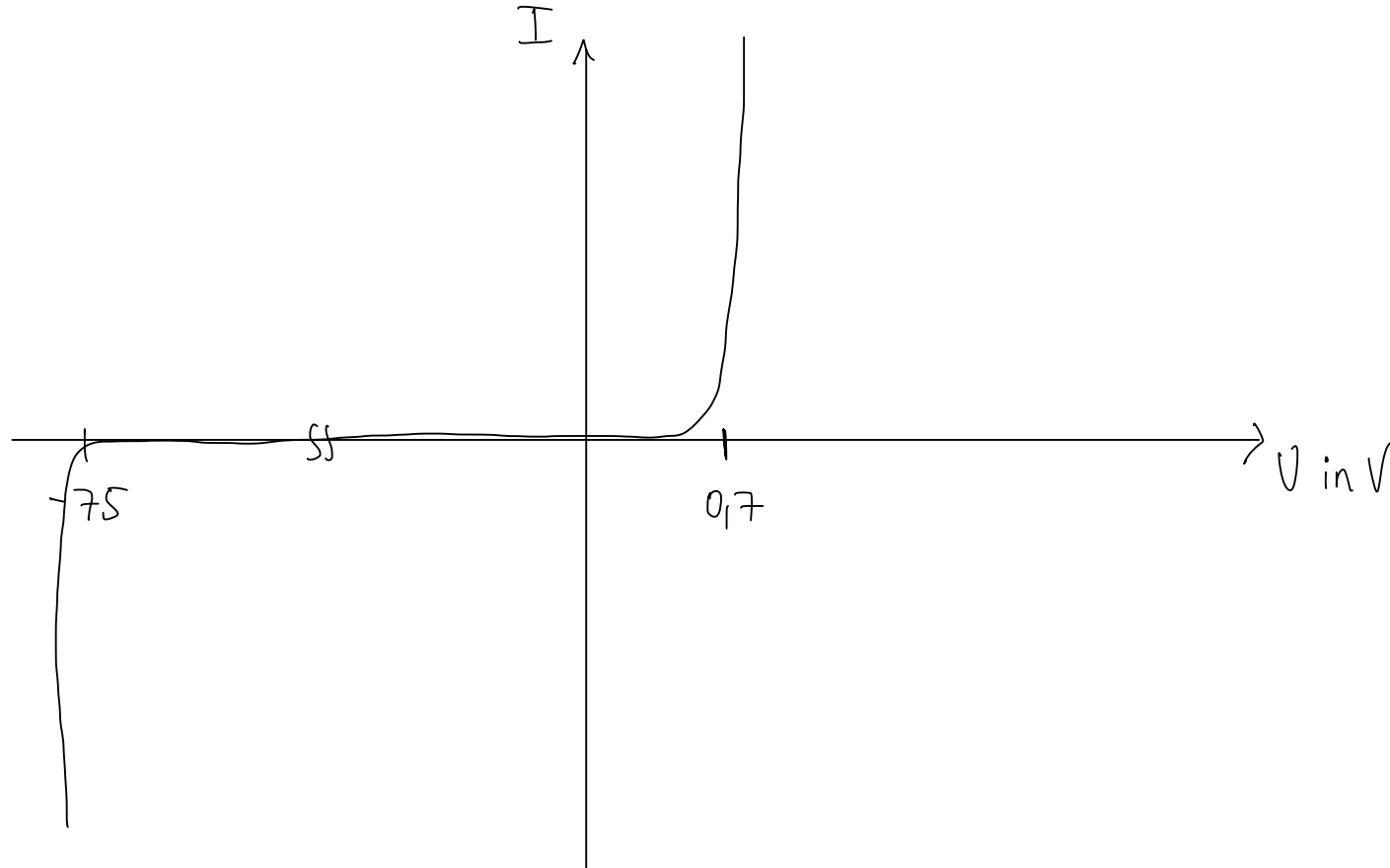
a) ges.: I-U Kennlinie der Diode

Gegeben:

$$U_F = 0,7 \text{ V}, U_{Br} = 75 \text{ V}$$

$$I_S = 10 \text{ fA}$$

$$T = 300,15 \text{ K}$$



Aufgabe 1 - Großsignalanalyse

b) ges.: I_D im Arbeitspunkt

Gegeben:

$$U_F = 0,7 \text{ V}, U_{Br} = 75 \text{ V}$$

$$I_S = 10 \text{ fA}$$

$$T = 300,15 \text{ K}$$

$$U_D = 0,8 \text{ V}$$

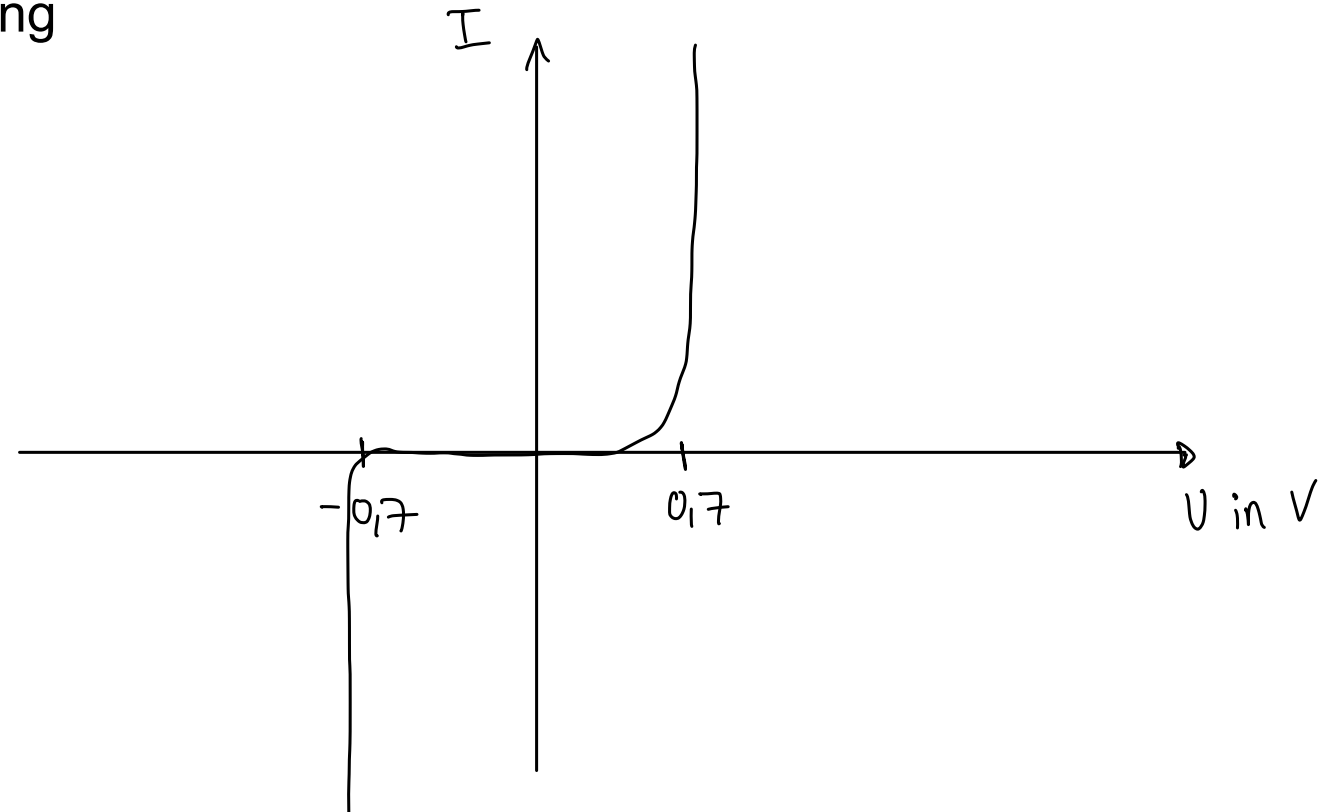
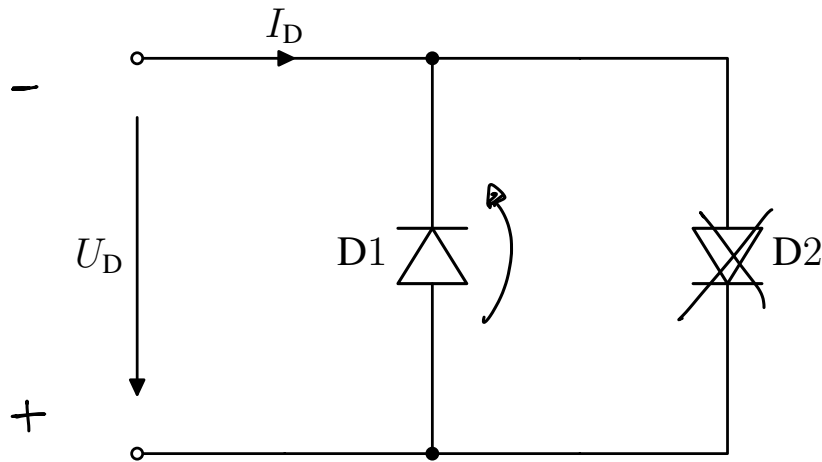
$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

$$\text{mit } U_T = \frac{k_B \cdot T}{e} = 25,865 \text{ mV}$$

$$I_D = 10 \text{ fA} \cdot e^{\frac{0,8 \text{ V}}{25,865 \text{ mV}}} \approx 271 \text{ nA} //$$

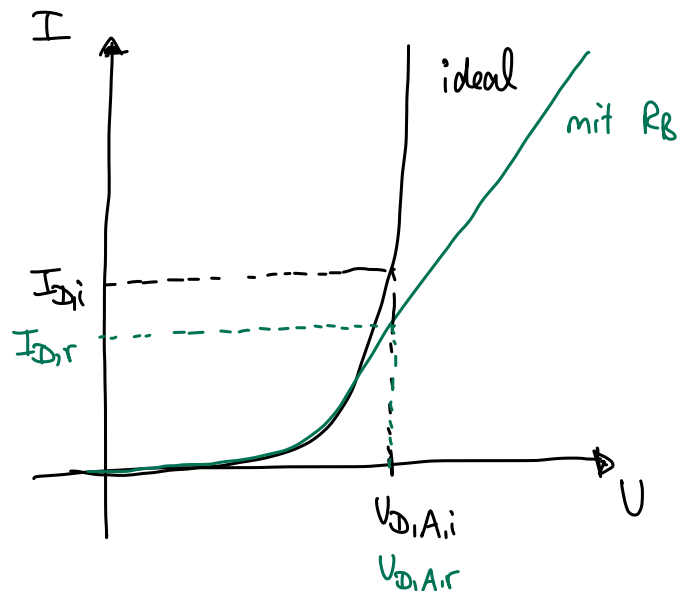
Aufgabe 1 - Großsignalanalyse

c) ges.: I-U Kennlinie der Parallelschaltung



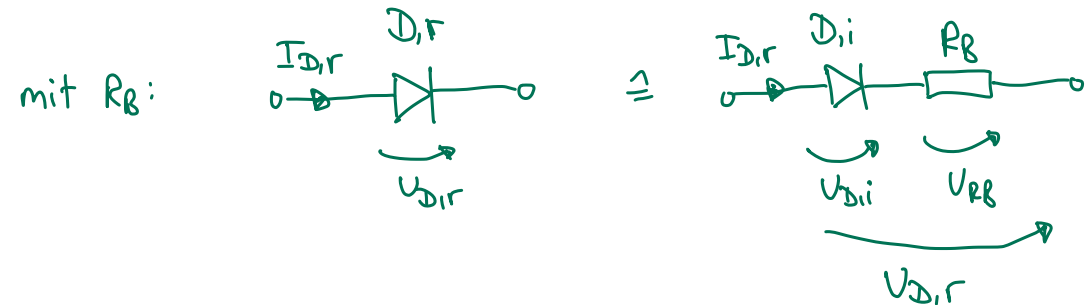
Aufgabe 1 - Großsignalanalyse

- d) ges.: - Unterschied der I-U Kennlinie einer Diode mit Bahnwiderstand
- Gleichung für U_D für eine Diode mit und ohne Bahnwiderstand



ideal: $I_{D,i} = I_S \cdot e^{U_{D,i}/U_T}$

$$\ln \frac{I_{D,i}}{I_S} = \frac{U_{D,i}}{U_T} \rightarrow U_{D,i} = U_T \cdot \ln \frac{I_{D,i}}{I_S}$$



$$U_{D,r} = U_{D,i} + U_{R,B} = U_T \cdot \ln \frac{I_{D,r}}{I_S} + I_{D,r} \cdot R_B$$

Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

a) ges.: Zeitlicher Verlauf der Spannung $u_D(t)$

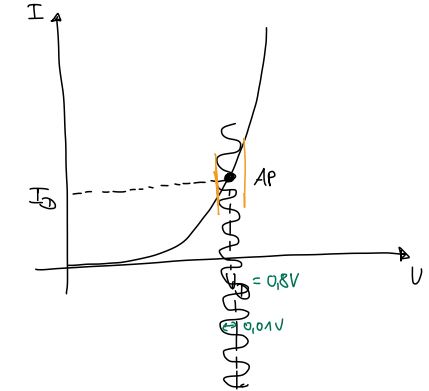
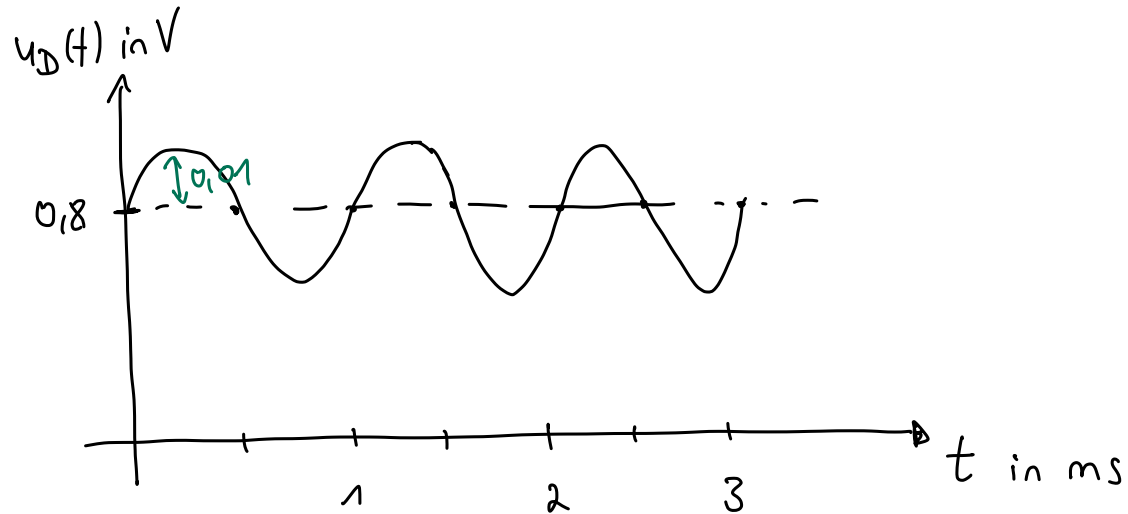
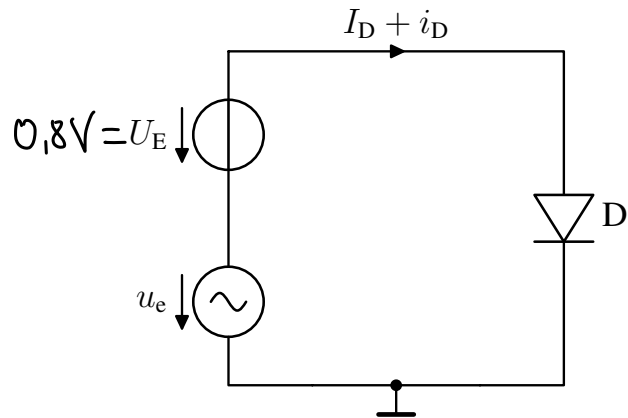
Gegeben:

$$U_D = 0,8 \text{ V}, I_D = 271 \text{ mA}$$

$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

$$T = \frac{1}{f} = 1 \text{ ms}$$



Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

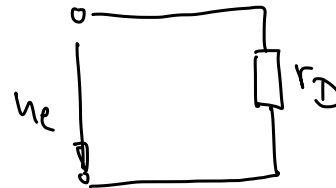
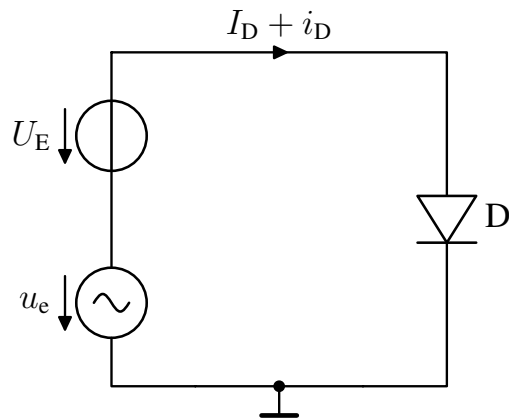
b) ges.: Kleinsignalersatzschaltbild der Diode und Größen berechnen

Gegeben:

$$U_D = 0,8 \text{ V}, I_D = 271 \text{ mA}$$

$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

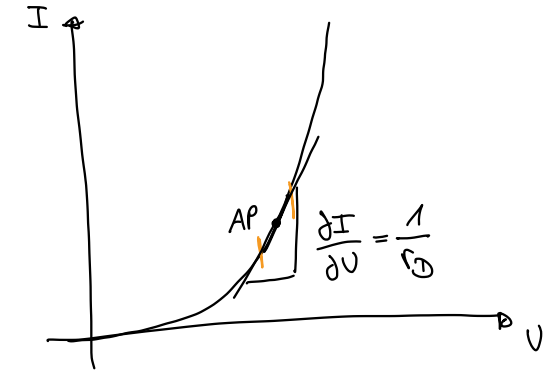
$$U_T = 26 \text{ mV}$$



$$r_D = \frac{\partial U}{\partial I} = \frac{U_T}{I_D}$$

$$\text{mit } \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{\partial (I_S \cdot e^{U/4})}{\partial U_D} = \frac{I_S}{U_T} \cdot e^{U/4} = \frac{I_D}{U_T}$$

$$r_D = \frac{26 \text{ mV}}{271 \text{ mA}} = 96 \text{ m}\Omega //$$



Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

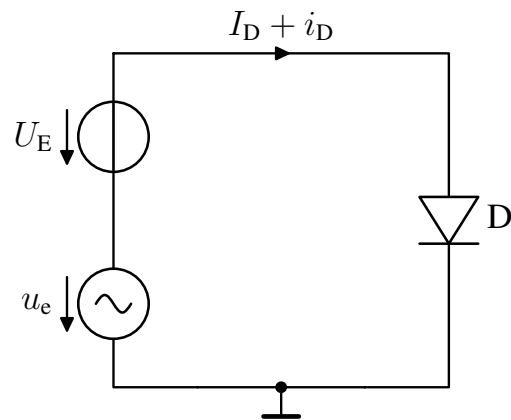
c) ges.: Zeitlicher Verlauf des Stroms $i_D(t)$

Gegeben:

$$U_D = 0,8 \text{ V}, I_D = 271 \text{ mA}$$

$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

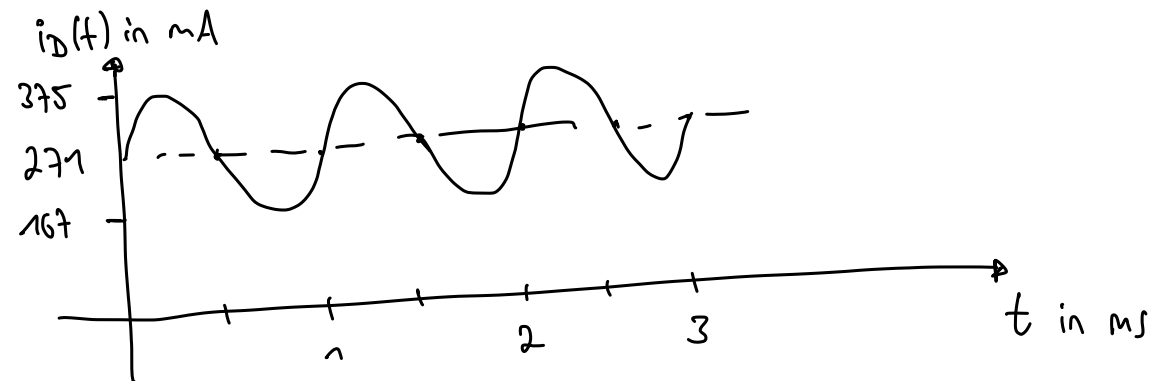


$$i_D(t) = I_D + i_D$$

$$\underbrace{271 \text{ mA}}_{I_D} + \underbrace{\frac{u_D}{r_D}}_{i_D} = \frac{0,01 \text{ V}}{96 \text{ m}\Omega} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$= 104 \text{ mA} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$= 271 \text{ mA} + 104 \text{ mA} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$



Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

d) ges.: KS ESB und zeitlicher Verlauf des Stroms $i_D(t)$

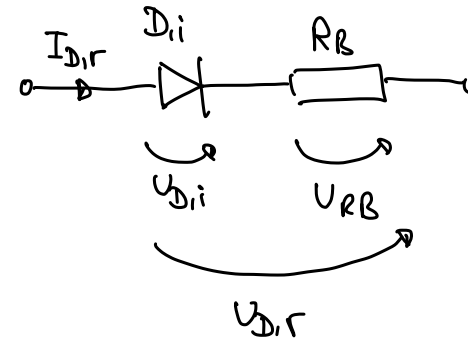
Gegeben: reale Diode

$$R_B = 500 \text{ m}\Omega$$

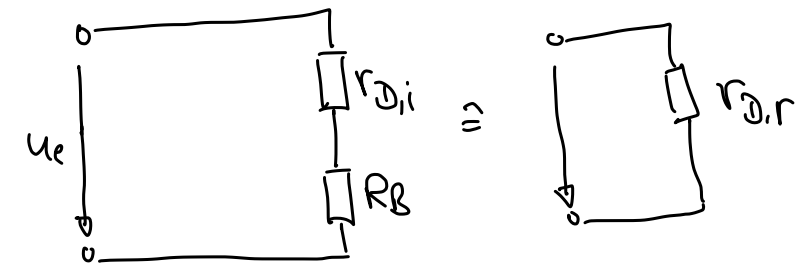
$$U_D = 0,8 \text{ V}$$

$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$



KS ESB



$$\frac{\partial U_{D,r}}{\partial I_{D,r}} = \frac{\partial (U_{D,i} + U_{R,B})}{\partial I_{D,r}}$$

$$\text{mit } \left. \begin{aligned} \frac{\partial U_{D,i}}{\partial I_{D,r}} &= r_{D,i} = \frac{U_T}{I_{D,r}} = \frac{26 \text{ mV}}{70 \text{ mA}} = 370 \text{ m}\Omega \\ \frac{\partial U_{R,B}}{\partial I_{D,r}} &= \frac{\partial (I_{D,r} \cdot R_B)}{\partial I_{D,r}} = R_B \end{aligned} \right\} \begin{aligned} r_{D,r} &= r_{D,i} + R_B \\ &= 870 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

d) ges.: KS ESB und zeitlicher Verlauf des Stroms $i_D(t)$

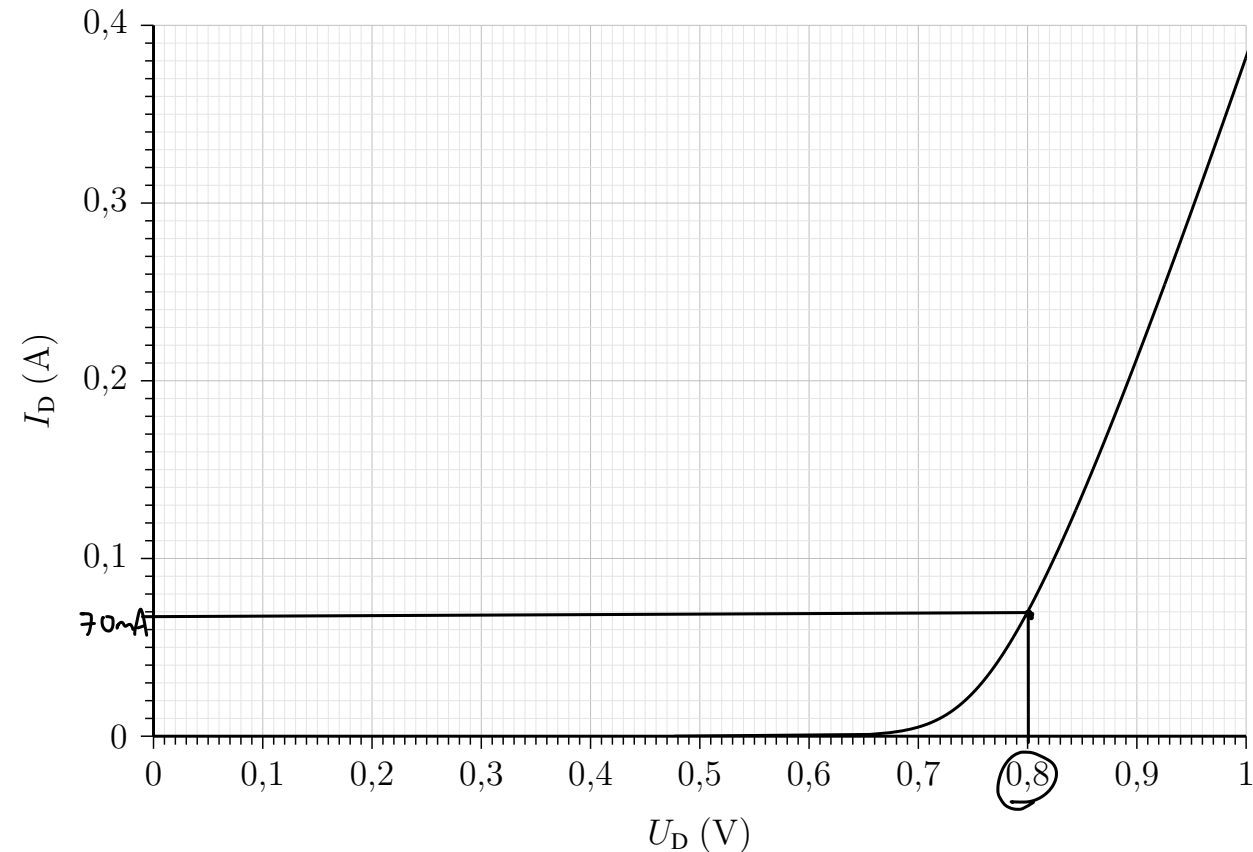
Gegeben: reale Diode

$$R_B = 500 \text{ m}\Omega$$

$$U_D = 0,8 \text{ V}$$

$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$



Aufgabe 2 – Kleinsignalanalyse - Zeitbereich

d) ges.: KS ESB und zeitlicher Verlauf des Stroms $i_D(t)$

Gegeben: reale Diode

$$R_B = 500 \text{ m}\Omega$$

$$U_D = 0,8 \text{ V}$$

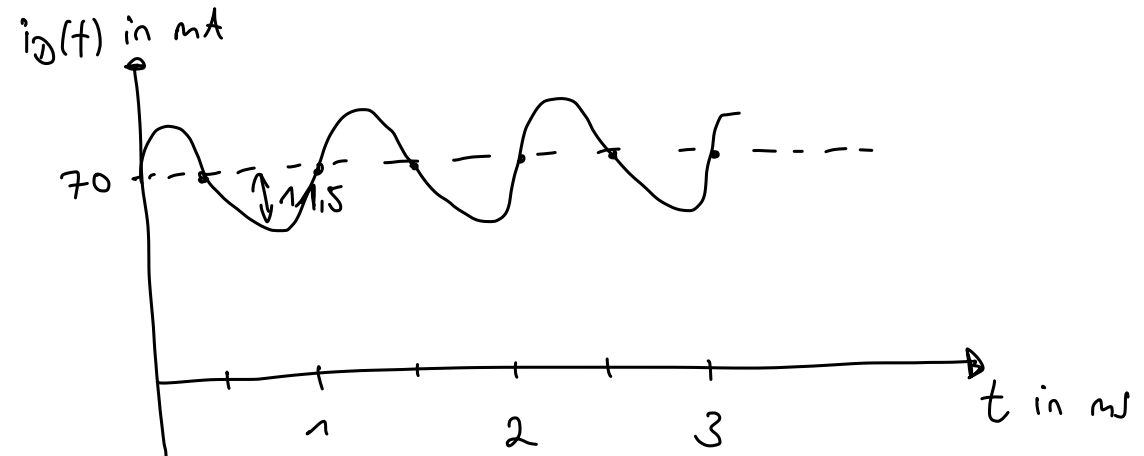
$$u_e = 0,01 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

$$r_{D,r} = r_{D,i} + R_B = 870 \text{ m}\Omega$$

$$i_{D,r}(t) = I_D + i_D = 70 \text{ mA} + \frac{0,01 \text{ V}}{870 \text{ m}\Omega} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$

$$= 70 \text{ mA} + 11,5 \text{ mA} \cdot \sin(2\pi \cdot 1\text{kHz} \cdot t)$$



Aufgabe 3 – Arbeitspunkt Bestimmung

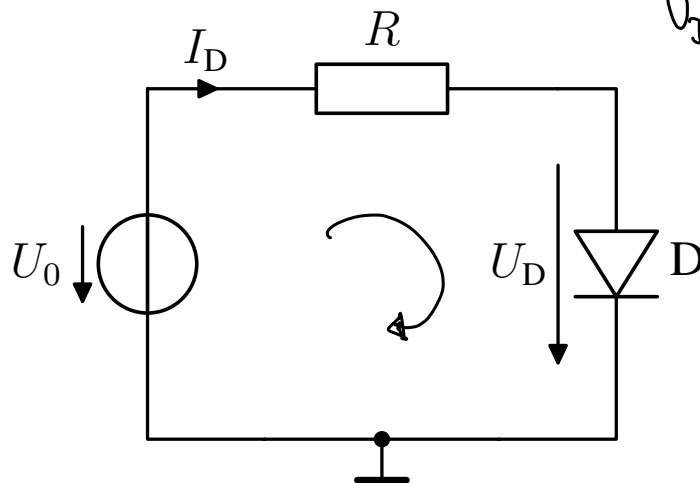
a) ges.: Graphische Bestimmung des Arbeitspunktes

Gegeben:

$$U_0 = 3 \text{ V}, I_S = 1 \text{ fA}$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

$$R = 1 \text{ k}\Omega$$



$$U_0 = I_D \cdot R + U_D$$

$$I_D = \frac{U_0 - U_D}{R}$$

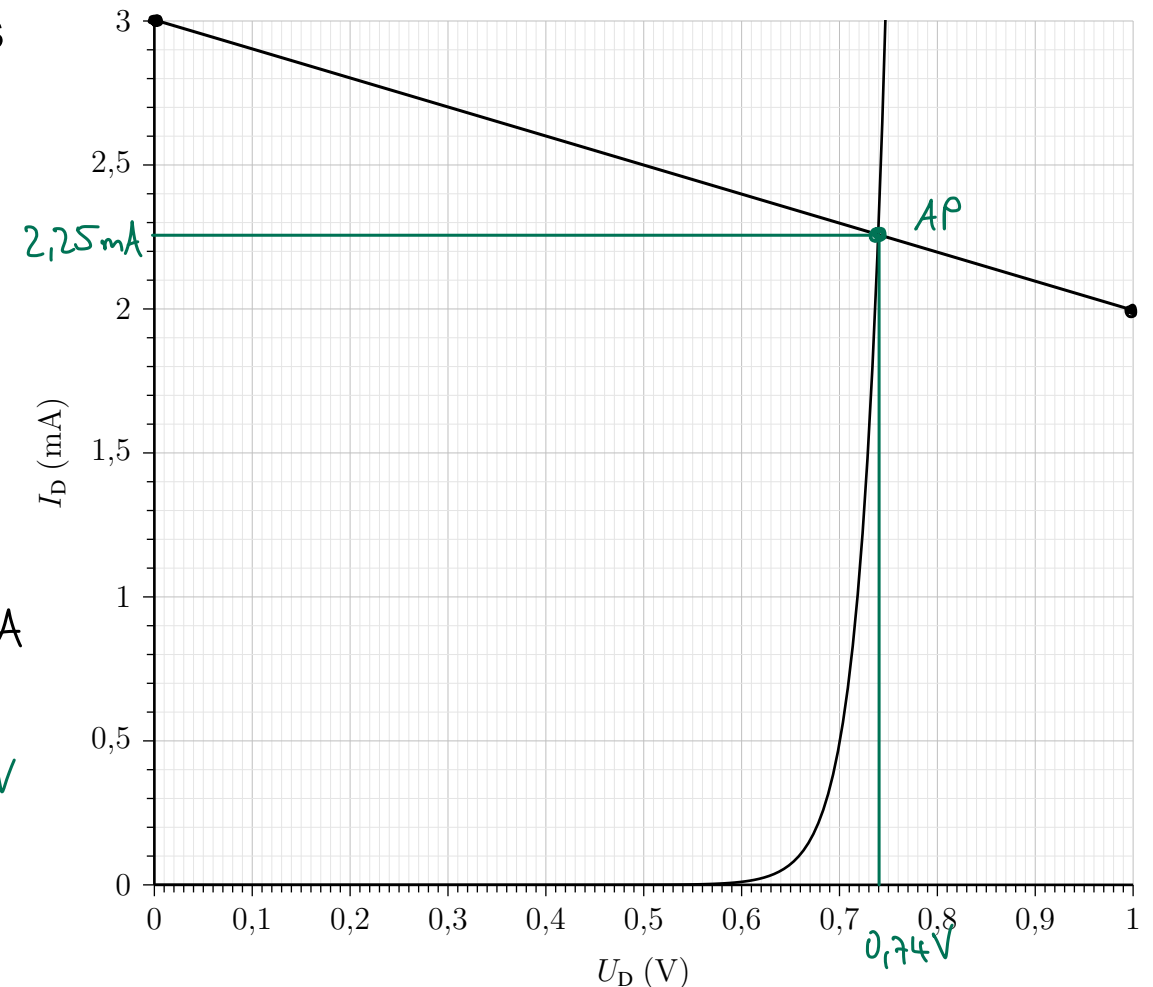
$$I_D = 0 \rightarrow U_D = U_0 = 3 \text{ V}$$

$$U_D = 1 \text{ V} \rightarrow I_D = \frac{3 \text{ V} - 1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$U_D = 0 \rightarrow I_D = \frac{3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

AP:

$$I_D = 2,25 \text{ mA} \quad U_D = 0,74 \text{ V}$$



Aufgabe 3 – Arbeitspunkt Bestimmung

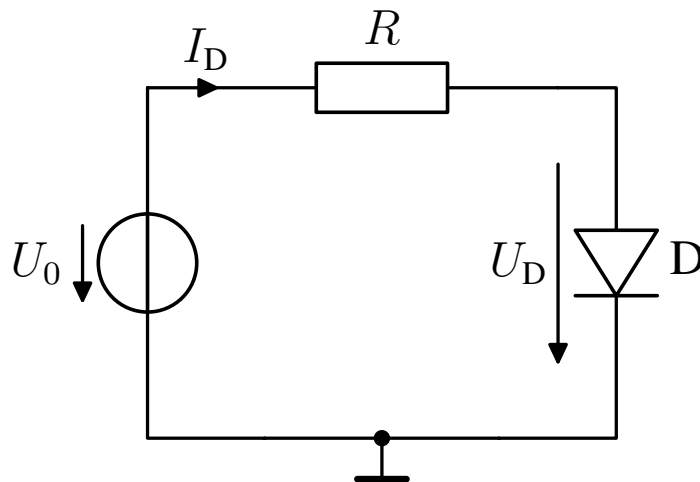
a) Zusatz: Rechnerische Bestimmung des Arbeitspunktes

Gegeben:

$$U_0 = 3 \text{ V}, I_S = 1 \text{ fA}$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

$$R = 1 \text{ k}\Omega$$



$$U_D = U_0 - R \cdot I_D \quad (\text{I})$$

$$U_D = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \quad (\text{II})$$

$$U_0 - R \cdot I_D = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right)$$

$$I_D = \frac{1}{R} \cdot \left(U_0 - U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \right)$$

$f(I_D)$

Fixpunktiteration:

$$I_D^{(0)} = 1 \text{ nA}$$

Abbruchkriterium

$$I_D^{(n)} - I_D^{(n-1)} < 1 \text{ nA}$$

Aufgabe 3 – Arbeitspunkt Bestimmung

a) Zusatz: Rechnerische Bestimmung des Arbeitspunktes

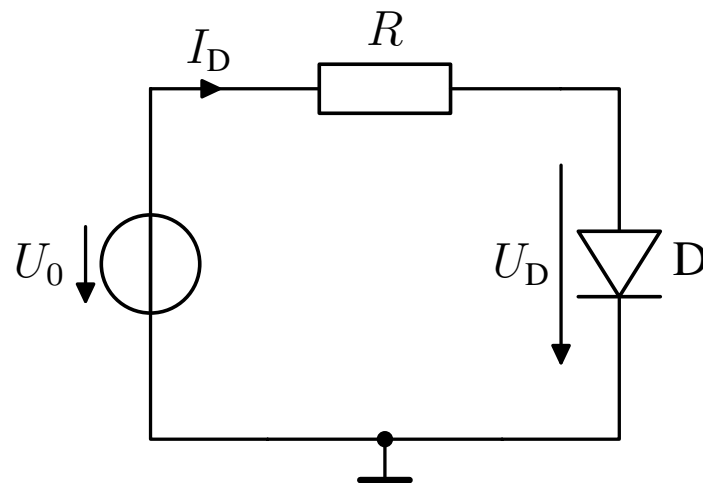
Gegeben:

$$U_0 = 3 \text{ V}, I_S = 1 \text{ fA}$$

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

$$R = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_D = \frac{1}{R} \cdot \underbrace{\left(U_0 - U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \right)}_{f(I_D)}$$



n	$I_D^{(n)}$ (mA)	$f(I_D^{(n)})$ (mA)	$I_D^{(n)} - I_D^{(n-1)}$ (mA)
0	1	2,281 593	—
1	2,281 593	2,260 147	1,281 593
2	2,260 147	2,260 392	0,021 446
3	2,260 392		0,000 246 < 1 μ A

$$U_D = U_0 - I_D^{(3)} \cdot R = 0,740 \text{ V} \quad , \quad I_D = 2,260 392 \text{ mA}$$

Aufgabe 3 – Arbeitspunkt Bestimmung

b) ges.: Widerstand R

Gegeben:

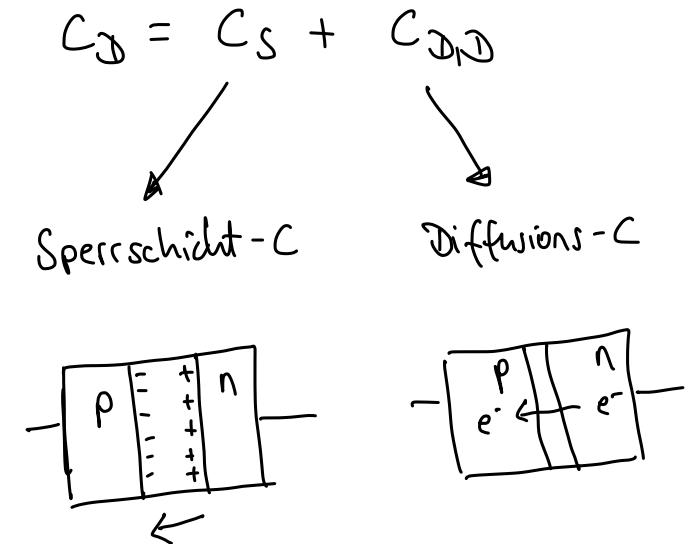
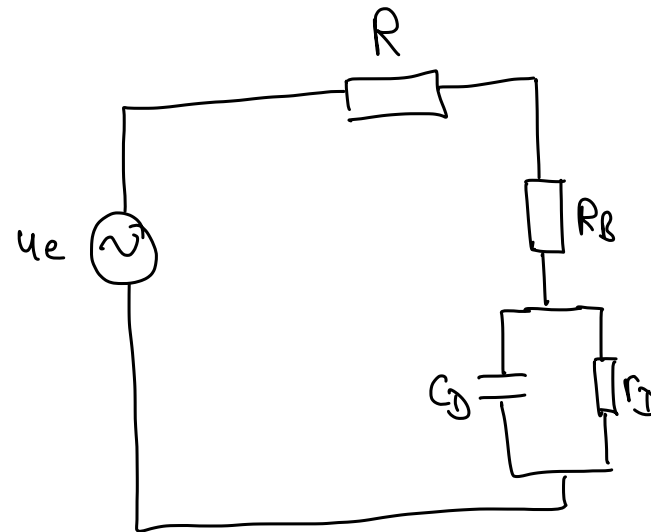
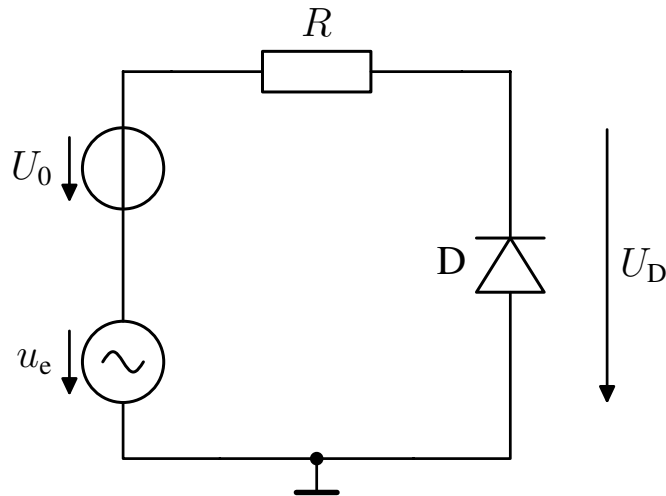
$$U_0 = 5 \text{ V}$$

$$U_D = 0,65 \text{ V}, I_D = 1,5 \text{ mA}$$

$$R = \frac{U_0 - U_D}{I_D} = \frac{5 \text{ V} - 0,65 \text{ V}}{1,5 \text{ mA}} = 2,9 \text{ k}\Omega$$

Aufgabe 4 – Kleinsignalanalyse - Frequenzbereich

a) ges.: Kleinsignalersatzschaltbild



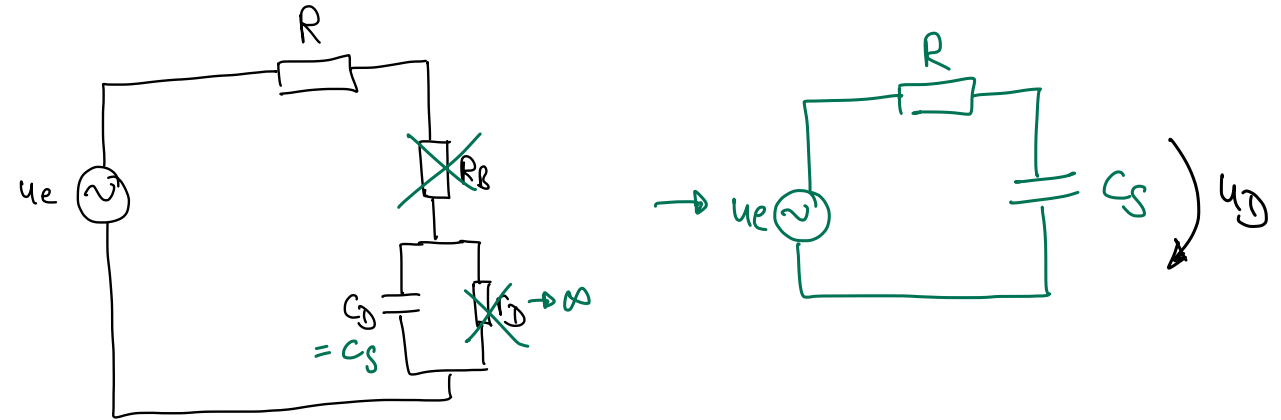
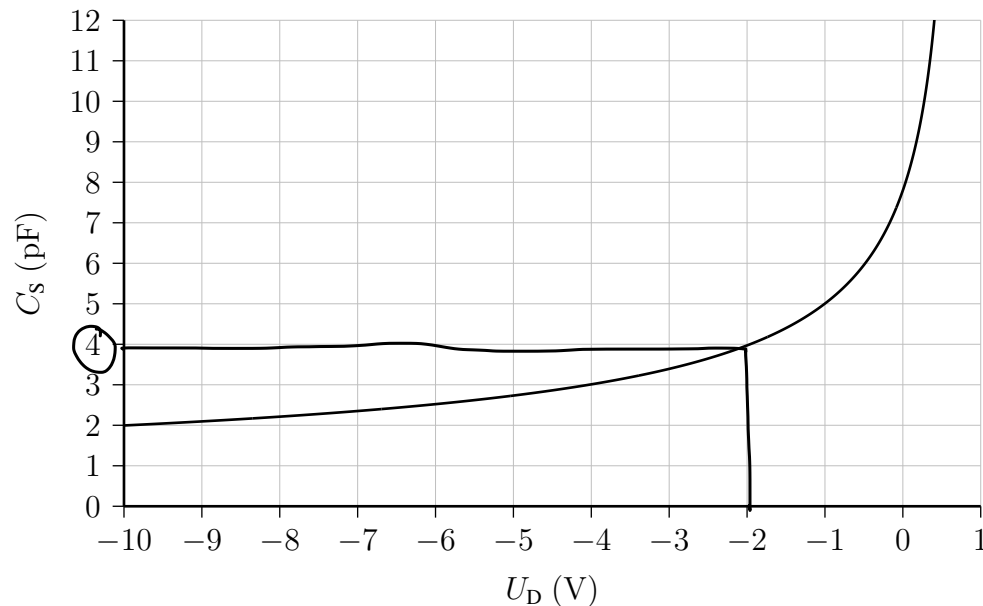
Aufgabe 4 – Kleinsignalanalyse - Frequenzbereich

b) ges.: 3dB Grenzfrequenz von $\left| \frac{u_D}{u_e} \right|$

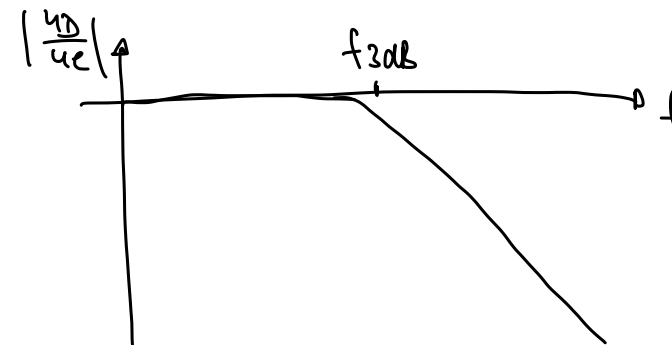
Gegeben:

$$U_0 = 2 \text{ V}$$

$$R = 300 \Omega$$



$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C_S} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \Omega \cdot 4 \text{ pF}} = 132,6 \text{ MHz}$$



Aufgabe 4 – Kleinsignalanalyse - Frequenzbereich

c) ges.: Verhalten der Diode für hohe Frequenzen

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow \text{Kurzschluss für hohes } f \rightarrow \text{Diode wird durchlässiger}$$