



Elektronik II

Große Übung zu Foliensatz E2-F4

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (E2-GF4)
2. Juli 2024



Inhalt Große Übung zu Foliensatz F4:

- Halbleiter
- Dioden
- 2.2 Durchlassbereich
- 2.3 Sperr- und Durchbruchbereich
- 2.4 Sperrschicht- und Diffusionskapazität
- 2.5 Kleinsignalmodell
- Spezielle Dioden
- 3.1 Schottky-Diode
- 3.2 Z-Diode
- 3.3 PIN-Diode
- 3.4 Kapazitätsdiode



Halbleiter



Aufgabe 4.1: Chemisches Potential, Diffusionsspg.

- 1 Wie groß sind in Silizium bei 300 K die Abstände des chemischen Potentials
 - von ζ_p in einem mit $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ dotierten p-Gebiet zur Valenzbandkante und
 - von ζ_n in einem mit $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ dotiertem n-Gebiet zur Leitungsbandkante ?
- 2 Wie groß ist die Diffusionsspannung?
- 3 Wie groß sind die Minoritäts- und Majoritätsladungsdichten in beiden Gebieten?

Hilfestellungen: Die Breite der Bandlücke in Silizium ist

$W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}$, die Temperaturspannung $U_T \approx 26 \text{ mV}$,

die Rechengrößen der Boltzmannnäherung sind

$N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$ und $N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$ und die

intrinsische Leitfähigkeit beträgt für 300 K $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3}$.



1. Halbleiter

1 Abstände des chemischen Potentials

- ζ_p zur Valenzbandkante bei $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$:

$$\zeta_p - W_V = q \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) =$$

- ζ_n zur Leitungsbandkante bei $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$:

$$W_L - \zeta_n = q \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{N_L}{N_D} \right) =$$

2 Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} =$$

3 Majoritäten- und Minoritätendichten:

Akzeptordichte in cm^{-3}	p-Gebiet	n-Gebiet
Majoritätsdichte in cm^{-3}		
Minoritätsdichte in cm^{-3}		

Bandlücke $W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}$; $U_T \approx 26 \text{ mV}$;

$n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$; $N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$; $N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Zur Kontrolle

1 Abstände des chemischen Potentials

- ζ_p zur Valenzbandkante bei $N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$:

$$\zeta_p - W_V = q \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) = q \cdot 26 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{15 \cdot 10^{18}}{10^{13}} \right) = 370 \text{ meV}$$

- ζ_n zur Leitungsbandkante bei $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$:

$$W_L - \zeta_n = q \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{N_L}{N_D} \right) = q \cdot 26 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{24 \cdot 10^{18}}{10^{15}} \right) = 262 \text{ meV}$$

2 Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} = \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q} = 1,1 \text{ V} - 370 \text{ mV} - 262 \text{ mV} = 468 \text{ mV}$$

3 Majoritäten- und Minoritätendichten:

Akzeptordichte in cm^{-3}	p-Gebiet	n-Gebiet
Majoritätsdichte in cm^{-3}	10^{13}	10^{15}
Minoritätsdichte in cm^{-3}	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^3$

Aufgabe 4.2: Maximale Feldstärke

Lösen Sie das Gleichungssystem

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{-q \cdot N_A}{\varepsilon} = \frac{-E_{\max}}{w_p} \quad (\text{Zunahme Feldstärke p-Gebiet})$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q \cdot N_D}{\varepsilon} = \frac{E_{\max}}{w_n} \quad (\text{Abnahme Feldstärke n-Gebiet})$$

$$U_S = \frac{1}{2} \cdot E_{\max} \cdot (w_p + w_n) - U_{\text{Diff}} \quad (\text{Sperrspannung})$$

- 1 nach der Sperrspannung $U_S(E_{\max})$
- 2 nach der maximalen Feldstärke $E_{\max}(U_S)$ auf.

Zur Kontrolle

1 Sperrspannung:

$$w_p = \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q \cdot N_A}$$

$$w_n = \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q \cdot N_D}$$

$$\begin{aligned} U_S &= \frac{1}{2} \cdot E_{\max} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q \cdot N_A} + \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q \cdot N_D} \right) - U_{\text{Diff}} \\ &= \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}^2}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) - U_{\text{Diff}} \end{aligned}$$

2 Maximale Feldstärke:

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot (U_S + U_{\text{Diff}})}{\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

Aufgabe 4.3: Sperrschichtbreite und -kapazität

- 1 Bestimmen Sie die Breiten w , w_p und w_n der Raumladungszone eines spannungsfreien pn-Übergangs mit denselben Akzeptor- und Donatordichten wie in der Aufgabe zuvor ($N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$).
- 2 Wie groß ist die Kapazität des pn-Übergangs bei $U_D = 0$ bei einem Querschnitt des Übergangs von $A = 0,1 \text{mm}^2$?

Hinweise: Die Diffusionsspannung für die gegebenen Dotierdichten laut zwei Aufgaben zuvor $U_{\text{Diff}} = 468 \text{mV}$. Elementarladung $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$. Dielektrizitätskonstante von Silizium $\epsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}$.



1. Halbleiter

1 Gesamtbreite:

$$w = w_p + w_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot U_{\text{Diff}}}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} =$$

Breite des p-Gebiets:

$$w_p = \frac{w \cdot N_D}{N_D + N_A} =$$

Breite des n-Gebiets:

$$w_n = w - w_p =$$

2 Kapazität :

$$C = \epsilon_{\text{Si}} \cdot \frac{A}{w} =$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}; \epsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, \\ A = 0,1 \text{mm}^2.$$



Zur Kontrolle

Gesamtbreite:

$$\begin{aligned}w &= w_p + w_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot U_{\text{Diff}}}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \\&= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 0,468 \text{ V}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \cdot \left(\frac{1}{10^{19} \text{ m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{ m}^{-3}} \right)} = 7,687 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Auflösung nach den Einzelbreiten:

$$\begin{aligned}w_p &= \frac{w \cdot N_D}{N_D + N_A} = \frac{7,687 \mu\text{m} \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{10^{15} \text{ cm}^{-3} + 10^{13} \text{ cm}^{-3}} = 7,611 \mu\text{m} \\w_n &= \frac{w \cdot N_A}{N_D + N_A} = \frac{7,687 \mu\text{m} \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}}{10^{15} \text{ cm}^{-3} + 10^{13} \text{ cm}^{-3}} = 76,1 \text{ nm}\end{aligned}$$

Kapazität nach dem Plattenkondensatormodell:

$$C = \varepsilon_{\text{Si}} \cdot \frac{A}{w} = 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{10^{-7} \text{ m}^2}{7,687 \mu\text{m}} = 1,301 \text{ pF}$$



Aufgabe 4.4: Sperrspannung und max. Feldstärke

Ein abrupter pn-Überung mit den Dotierungen $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ und $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ wird mit den Sperrspannungen $U_S = 10 \text{V}$ bzw. 100V betrieben.

- 1 Wie hoch ist die Diffusionsspannung?
- 2 Wie groß sind für beide Werte der Sperrspannung die max. Feldstärke?
- 3 Welche Breite w_i muss eine intrinsische Schicht zwischen dem p- und dem n-Gebiet haben, um die maximale Feldstärke für $U_S = 100 \text{V}$ auf $10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ zu verringern?

Hinweis: In einer intrinsischen Schicht zwischen dem n- und dem p-Gebiet ist die Raumladung null und damit die Feldstärke konstant.



Zur Lösung von Aufgabenteil 1

- Abstand ζ_p zur Valenzbandkante bei $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$:

$$\zeta_p - W_V = U_T \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln (\quad) =$$

- Abstand ζ_n zur Leitungsbandkante bei $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$:

$$W_L - \zeta_n = U_T \cdot \ln \left(\frac{N_L}{N_D} \right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln (\quad) =$$

- Diffusionsspannung:

$$U_{\text{Diff}} =$$

$$W_g = W_L - W_V \approx 1,1 \text{ eV}; U_T \approx 26 \text{ mV}; N_V \approx 15 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3};$$
$$N_L \approx 24 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}, N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$$



Zur Kontrolle von Aufgabenteil 1

- Abstand des chemischen Potentials im p-Gebiet von der Valenzbandkante: $\zeta_p - W_V = U_T \cdot \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln\left(\frac{15 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{15}}\right) = 148 \text{ mV}$
- Abstand des chemischen Potentials im n-Gebiet von der Leitungsbandkante: $W_L - \zeta_n = U_T \cdot \ln\left(\frac{N_L}{N_D}\right) = 26 \text{ meV} \cdot \ln\left(\frac{24 \cdot 10^{18}}{10^{15}}\right) = 202 \text{ meV}$
- Diffusionsspannung:

$$\begin{aligned} U_{\text{Diff}} &= \frac{\zeta_n - \zeta_p}{q} = \frac{(W_L - W_V) - (W_L - \zeta_n) - (\zeta_p - W_V)}{q} \\ U_{\text{Diff}} &= 1,1 \text{ V} - 130 \text{ mV} - 202 \text{ mV} \approx 750 \text{ mV} \end{aligned}$$



Zur Kontrolle Aufgabenteil 2

Breite des Übergangs:

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (U_{\text{Diff}} + U_S)}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot (0,75 \text{ V} + U_S)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{As}} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{m}^{-3}} \right)} \end{aligned}$$

Maximale Feldstärke:

$$E_{\text{max}} = \frac{2 \cdot (U_{\text{Diff}} + U_S)}{w}$$

U_S	10 V	100 V
w	4 μm	12 μm
E_{max}	5,25 kV/mm	16,75 kV/mm



Zur Kontrolle Aufgabenteil 3

In den dotierten Schichten ist die Raumladung $\rho = q \cdot N_{A/D}$ und die Feldstärke nimmt proportional zu bzw. ab. In einer intrinsischen Schicht dazwischen ist $\rho = 0$ und die Feldstärke E_{\max} . Integral über den Trapezverlauf:

$$U_{\text{Diff}} + U_S = E_{\max} \cdot \left(\frac{w_p + w_n}{2} + w_i \right)$$

Breite der Raumladungsbereiche für E_{\max} :

$$w_p + w_n = \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

Eingesetzt und nach w_i aufgelöst:

$$w_i = \frac{U_{\text{Diff}} + U_S}{E_{\max}} - \frac{\varepsilon \cdot E_{\max}}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}, \varepsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, U_{\text{Diff}} = 0,75 \text{V}, U_S = 100 \text{V}, \\ N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, E_{\max} = 10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}.$$



1. Halbleiter

$$\begin{aligned}w_i &= \frac{U_{\text{Diff}} + U_S}{E_{\text{max}}} - \frac{\varepsilon \cdot E_{\text{max}}}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \\&= \frac{100,75 \text{ V}}{10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}} - \frac{10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{As}} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3}} + \frac{1}{10^{21} \text{m}^{-3}} \right) \\&= 10,75 \mu\text{m} - 3,75 \mu\text{m} = 7 \mu\text{m}\end{aligned}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}, \varepsilon_{\text{Si}} \approx 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}, U_{\text{Diff}} = 0,75 \text{V}, U_S = 100 \text{V}, \\N_A = 10^{13} \text{cm}^{-3}, N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}, E_{\text{max}} = 10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}.$$

Aufgabe 4.5: Diffusionslänge

- 1 Wie groß ist die Diffusionslänge der in ein p-Basisgebiet diffundierenden Elektronen bei $T = 300 \text{ K}$? Die Beweglichkeit der Elektronen sei $\mu_n = 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$ und die mittlere Lebensdauer von Ladungsträgerungleichgewichten im p-Basisgebiet $\tau_p = 200 \mu\text{s}$.
- 2 Welche Breite w_B darf die Basis eines Bipolartransistors max. haben, damit $\geq 99,9\%$ der vom Emitter ankommenden Ladungsträger bis zur Kollektorsperrschicht diffundieren?



1. Halbleiter

1 Diffusionslänge:

$$L_n = \sqrt{U_T (300 \text{ K}) \cdot \mu_n \cdot \tau_p} = \dots$$

2 Abnahme des Diffusionsstroms der beweglichen Elektronen im p-Basisgebiet:

$$n_p(x) = n_{p0} \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{x}{L_n}}$$

Nach einem Weg $x = w_B$ sollen noch 99,9% davon übrig sein:

$$w_B = L_n \cdot \dots$$

$$U_T (300 \text{ K}) = 26 \text{ mV}, \mu_n = 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}, \tau_p = 200 \mu\text{s}.$$



Zur Kontrolle

1 Diffusionslänge:

$$\begin{aligned}L_n &= \sqrt{U_T (300 \text{ K}) \cdot \mu_n \cdot \tau_p} \\ &= \sqrt{26 \text{ mV} \cdot 0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}} \cdot 200 \mu\text{s}} = 510 \mu\text{m}\end{aligned}$$

2 Damit nach einem Weg $x = w_B$ noch 99,9% der in die Basis diffundierenden Ladungsträger übrig sind:

$$\frac{n_p(w_B)}{n_p(0)} = 99,9\% = \frac{n_{p0} \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{w_B}{L_n}}}{n_{p0} \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{0}{L_n}}} = e^{-\frac{w_B}{L_n}}$$

$$w_B = L_n \cdot (-\ln(99,9\%)) = 0,51 \mu\text{m}$$



Dioden



Durchlassbereich

Aufgabe 4.6: Durchlassspannung

- 1 Stellen Sie die Gleichung für die Berechnung des Durchlassstroms unter Vernachlässigung des Rekombinationsstroms und des Hochstromeffekts

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{N \cdot U_T}} - 1 \right)$$

nach der Spannung U_D um.

- 2 Berechnen Sie U_D für eine Diode mit den Spice-Parametern $I_S = 2 \text{ nA}$, $N = 2$ und $T = 300 \text{ K}$ für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
U_D				

Hinweis: Temperaturspannung $U_T (300 \text{ K}) = 26 \text{ mV}$.

Zur Kontrolle

- 1 Spannung über einer Diode in Abhängigkeit vom Durchlassstrom:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{N \cdot U_T}} - 1 \right)$$

$$U_D = N \cdot U_T \cdot \left(\ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) \right)$$

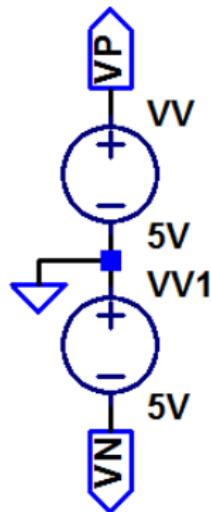
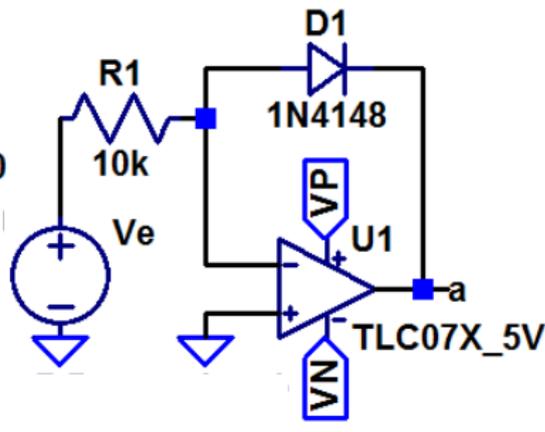
- 2 Spannungen U_D für eine Diode mit den Spice-Parametern $I_S = 2 \text{ nA}$, $N = 2$ und $T = 300 \text{ K}$ für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

$$U_D = 52 \text{ mV} \cdot \left(\ln \left(\frac{I_D}{I_S = 2 \text{ nA}} + 1 \right) \right)$$

I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
U_D	563 mV	682 mV	802 mV	922 mV

Aufgabe 4.7: Logarithmierer mit Diode

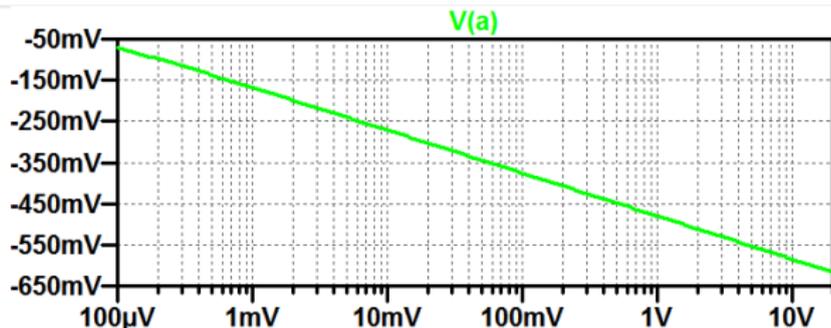
```
.include TLC074.mod
.dc oct Ve 100µV 20V 10
```



- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion (DC sweep) mit einer logarithmischen Darstellung der Eingangsspannung.
- Berechnen Sie die zu erwartende Ausgangsspannung unter der Annahme »idealer Operationsverstärker« und unter Berücksichtigung der Diodenparameter $I_s=2,5\text{nA}$, $n=1,75$ für die Eingangsspannungen $100\ \mu\text{V}$, $1\ \text{mV}$ und $10\ \text{mV}$. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Simulationsergebnis.



Zur Kontrolle



$$U_D = N \cdot U_T \cdot \left(\ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) \right) \quad \text{mit } I_D = \frac{U_e}{R_1}$$

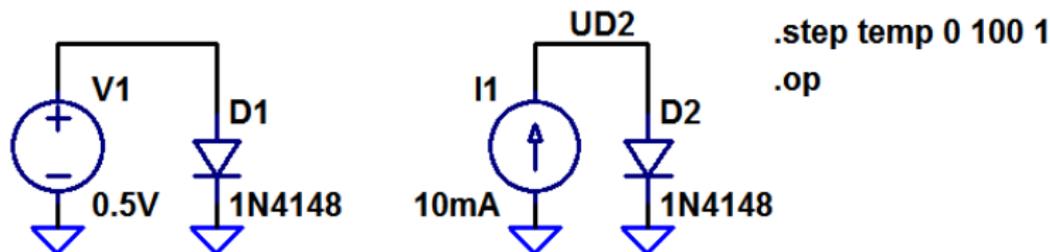
$$= 1,75 \cdot 26 \text{ mV} \cdot \left(\ln \left(\frac{U_e}{10 \text{ k}\Omega \cdot 2,5 \text{ nA}} + 1 \right) \right)$$

U_e	$100 \mu\text{V}$	1 mV	10 mV	100 mV	1 V	10 V
V_a^*	-71 mV	-168 mV	-271 mV	-375 mV	-480 mV	-585 mV
U_D^{**}	-73 mV	-169 mV	-273 mV	-377 mV	-482 mV	-587 mV

(* Simulation; ** Rechnung).

Aufgabe 4.8: Temperaturverhalten

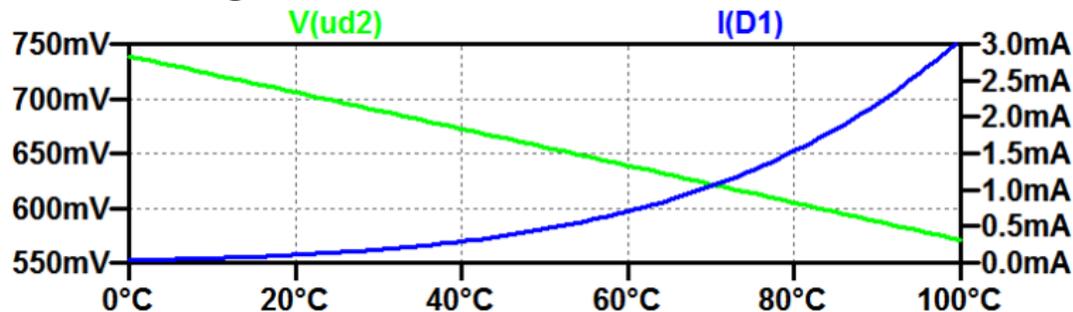
- 1 Bestimmen Sie mit den nachfolgenden Testschaltungen im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C
- den Durchlassstrom bei konstanter Spannung und
 - die Durchlassspannung bei konstantem Strom.



- 2 Schätzen Sie aus den Werten für 20°C , 21°C und 22°C
- die Spannungszunahme und
 - die relative Stromzunahme je Grad Kelvin ab.

Zur Kontrolle

1 Simulationsergebnis:



2 Spannungszunahme und relative Stromzunahme mit T :

$$\frac{dU_D}{dT} \approx \frac{U_D(22^\circ\text{C}) - U_D(20^\circ\text{C})}{2\text{K}}; \quad \frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT} \approx \frac{I_D(22^\circ\text{C}) - I_D(20^\circ\text{C})}{I_D(21^\circ\text{C}) \cdot 2\text{K}}$$

	20°C	21°C	22°C	
I_D	108,64 mA	114,66 mA	120,96 mA	$\frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT} \approx 5,4 \frac{\%}{\text{K}}$
U_D	705,78 mV	704,09 mV	702,39 mV	$\frac{dU_D}{dT} \approx -1,7 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$



Sperr- und Durchbruchbereich

Aufgabe 4.9: Durchbruchspannung

- 1 Stellen Sie die Gleichung für die Berechnung des Stroms im Durchbruchbereich

$$I_S = I_{bv} \cdot e^{\frac{U_S - BV}{U_T}}$$

nach U_S um.

- 2 Berücksichtigen Sie in der Gleichung zur Berechnung des Spannungsabfalls in Sperrrichtung U_S zusätzlich den Bahnwiderstand (Spice-Parameter R_s).
- 3 Berechnen Sie für eine Diode mit den Parametern $I_{bv} = 50 \mu\text{A}$, $BV = 8\text{V}$ und $T = 300\text{K}$, $R_s = 0,8 \Omega$ den Spannungsabfall U_S für die Ströme in der nachfolgenden Tabelle:

I_S	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
U_S				



Zur Kontrolle

- 1 Durchbruchspannung U_S als Funktion des Durchbruchstroms I_S :

$$U_S = BV + U_T \cdot \ln \left(\frac{I_S}{I_{bv}} \right)$$

- 2 Zusätzliche Berücksichtigung des Bahnwiderstands:

$$U_S = BV + U_T \cdot \ln \left(\frac{I_S}{I_{bv}} \right) + R_S \cdot I_S$$

- 3 Mit den Beispielwerten für die Parameter:

$$U_S = 8 \text{ V} + 26 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{I_S}{50 \mu\text{A}} \right) + 0,8 \Omega \cdot I_S$$

I_S	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
U_S	8,018 V	8,079 V	8,146 V	8,278 V



Sperrschicht- und Diffusionskapazität

Aufgabe 4.10: Sperrschicht- und Diffusionskapazität

Berechnen Sie für eine Diode mit den Spice-Parametern $C_{jo} = 2 \text{ pF}$, $M = 0,4$, $V_j = 500 \text{ mV}$, $T_t = 10 \text{ ns}$ und $N=15$ und eine Temperatur von $T = 300 \text{ K}$

- 1 die Sperrschichtkapazität C_S für die Sperrspannungen

U_S	0 V	1 V	3 V	10 V
C_S				

- 2 die Diffusionskapazität C_D für die Durchlassströme

I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
C_D				

- 3 Kontrollieren Sie das Ergebnis durch Simulation.

- Zusatzaufgaben: C_S für Spannungen im Durchlassbereich und Durchlassspannungen zu den Durchlassströmen.

Zur Kontrolle

1 Sperrschichtkapazität:

$$C_S = C_{j0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{V_j}\right)^M} = \frac{2 \text{ pF}}{\left(1 + \frac{U_S}{500 \text{ mV}}\right)^{0,4}}$$

U_S	0 V	1 V	3 V	10 V
C_S	2 pF	1,29 pF	0,918 pF	0,592 pF

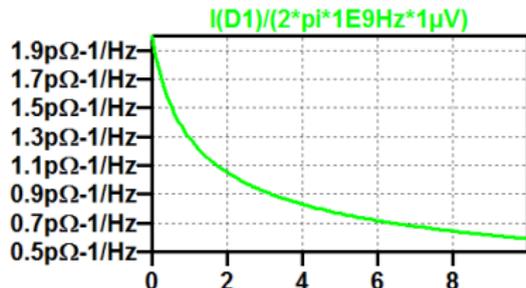
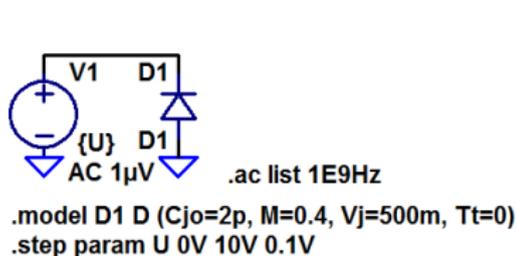
2 Diffusionskapazität

$$C_D = \frac{\tau_t \cdot I_D}{N \cdot U_T} = \frac{10 \text{ ns} \cdot I_D}{1,5 \cdot 26 \text{ mV}}$$

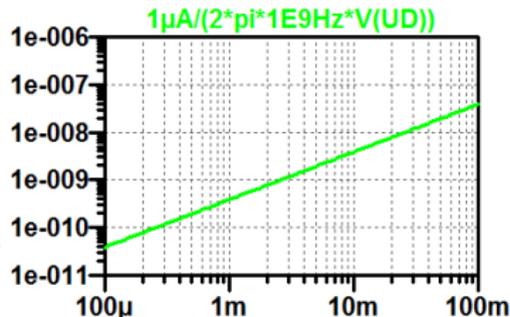
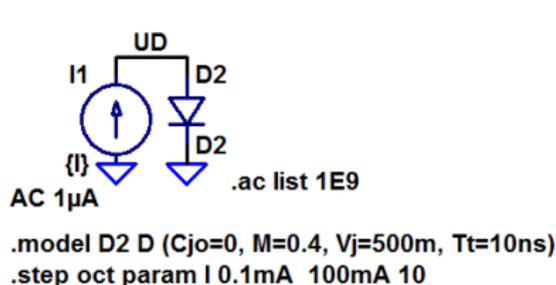
I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
C_D	25,6 pF	256 pF	2,56 nF	25,6 nF

3 Kontrolle durch Simulation siehe nächste Folie:

- Sperrschichtkapazität: »Durchsteppen der Sperrspannung« und Berechnung der Kapazität aus dem AC-Strom bei $T_t = 0$.

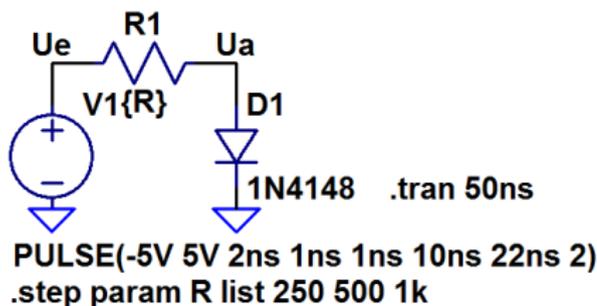


- Diffusionskapazität: »Durchsteppen des Durchlassstroms« und Berechnung der Kapazität aus der AC-Spannung bei $C_{jo} = 0$.



Aufgabe 4.11: Schaltverzögerung von Dioden

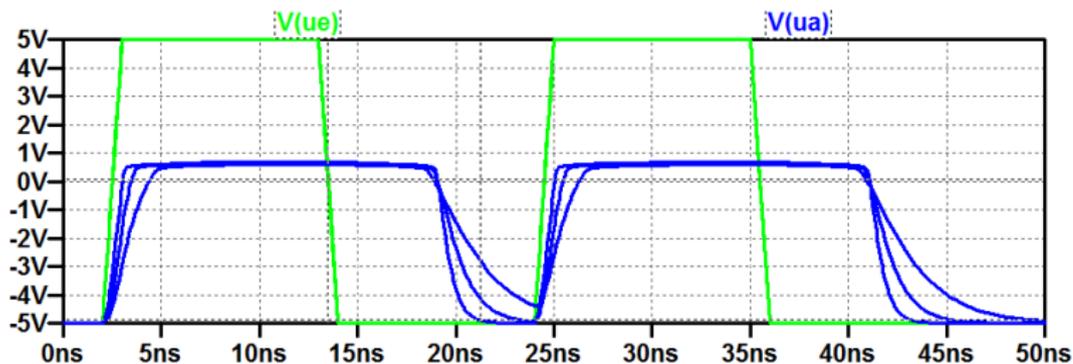
Bestimmen Sie für folgende RD-Schaltung die Ein- und Ausschaltverzögerung¹ zwischen einer 50%-igen Ein- und -ausgabeänderung. Füllen Sie dazu die nachfolgende Tabelle aus:



	$R = 250 \Omega$	$R = 500 \Omega$	$R = 1 \text{ k}\Omega$
Einschaltverzögerung			
Ausschaltverzögerung			

¹Einschalten: Wechsel U_e von -5 V nach 5 V.

Zur Kontrolle



	$R = 250 \Omega$	$R = 500 \Omega$	$R = 1 \text{ k}\Omega$
Einschaltverzögerung	$\approx 160 \text{ ps}$	$\approx 360 \text{ ps}$	$\approx 730 \text{ ps}$
Ausschaltverzögerung	$\approx 6 \text{ ns}$	$\approx 6,6 \text{ ns}$	$\approx 7,7 \text{ ns}$

Vergleichswerte: $T_t = 10 \text{ ns}$, $C_{jo} = 2 \text{ pF}$



Kleinsignalmodell

Aufgabe 4.12: Kleinsignalwiderstand

Berechnen Sie für eine Diode mit den Parametern $N=15$ und $I_{kf} \gg 100 \text{ mA}$ den Kleinsignalwiderstand in Abhängigkeit vom Strom durch die Diode

- 1 bei einer Temperatur von $T = 300 \text{ K}$ und
- 2 bei einer Temperatur von $T = 320 \text{ K}$.

I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
$r_D (300 \text{ K})$				
$r_D (320 \text{ K})$				

Hinweis: Durchlassbereich unterhalb des Hochstrombereichs. Die Rekombinationsströme und Bahnwiderstände seien vernachlässigbar.

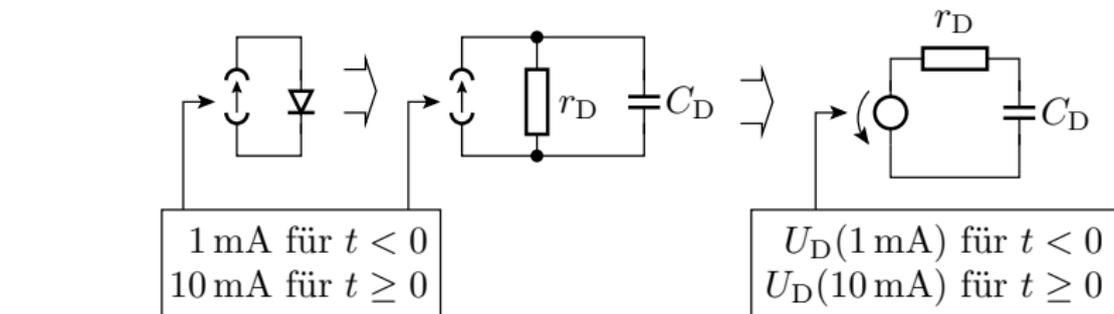
Zur Kontrolle

$$\begin{aligned}r_{DD} &= \frac{N \cdot k_B \cdot T}{q \cdot I_{DD}} \\ &= \frac{1,5 \cdot 8,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \cdot T}{1 \text{ eV} \cdot I_{DD}}\end{aligned}$$

I_D	0,1 mA	1 mA	10 mA	100 mA
r_D (300 K)	388 Ω	38,8 Ω	3,88 Ω	0,388 Ω
r_D (320 K)	414 Ω	41,4 Ω	4,14 Ω	0,414 Ω

Aufgabe 4.13: Verständnisfragen

- 1 Nimmt die Verlustleistung der Dioden eines Gleichrichters bei Erwärmung und gleichem Strom zu oder ab²?
- 2 Wie groß ist die Zeitkonstanten $\tau = C_D \cdot r_D$ des nachfolgenden Ersatzschaltungs-RC-Gliedes aus Diffusionskapazität C_D und Durchlasswiderstand r_D einer Diode in Abhängigkeit vom Durchlassstrom I_D unter Vernachlässigung von Sperrschichtkapazität und Hochstromeffekt?



²Durchlassspannung nimmt bei gleichem Strom mit der Temperatur ab.

Zur Kontrolle

- 1 Bei Erwärmung und gleichem Strom nimmt die Flussspannung und damit auch die Verlustleistung ab.
- 2 Diffusionskapazität:

$$C_D = \frac{dQ_D}{dU_D} \approx \frac{Tt \cdot I_D}{N \cdot U_T}$$

Kleinsignalwiderstand ohne Hochstromeffekt:

$$r_{DD} = \frac{N \cdot U_T}{I_D}$$

Das Produkt $\tau = C_D \cdot r_D$ ist die Transitzeit:

$$\tau = Tt$$



Spezielle Dioden



Schottky-Diode



Aufgabe 4.14: Schottky-Diode

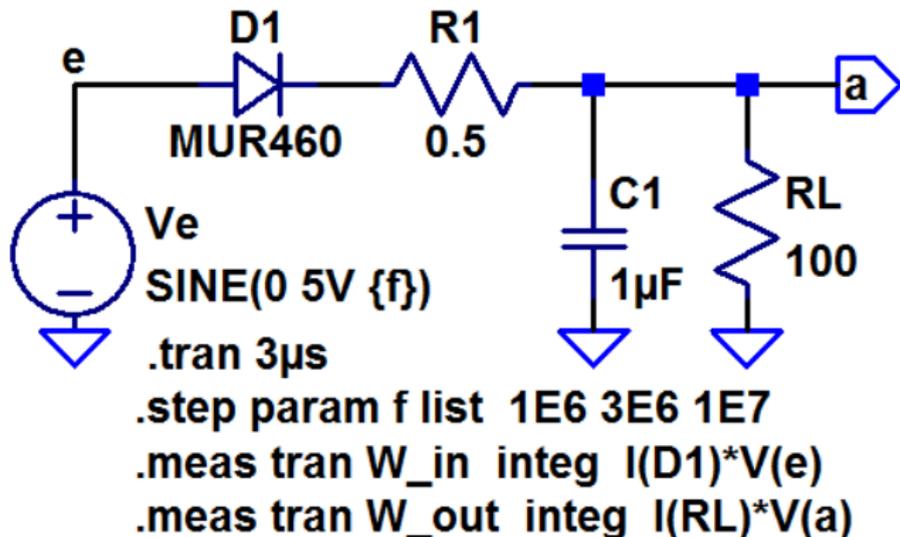
Welche wesentlichen Vorteile haben Schottky-Dioden gegenüber pn-Dioden beim Einsatz als Gleichrichter?

Vorteile von Schottky-Dioden:

- kleinere Flussspannung,
- keine Diffusionsladung und damit wesentlich kürzere Ausschaltzeiten.

Aufgabe 4.15: Gleichrichter

Die Abbildung zeigt eine Experimentierschaltung zur Untersuchung des Wirkungsgrads eines einfachen Gleichrichters in Abhängigkeit von der Frequenz.





- 1 Wozu wird R_1 benötigt³?
- 2 Welche Ströme entstehen durch die Stromschleife?
- 3 Bestimmen Sie die Ausgangsspannungsverläufe. In welchen Zeitfenstern wird C_1 aufgeladen, in welchen durch die Stromschleife und in welchen nur durch R_L entladen?
- 4 Die Integralanweisungen berechnen die von der Eingabequelle »Ve« abgegebene und die in R_L verbrauchte Energie während der simulierten Zeit. Bestimmen Sie die im Mittel aufgenommene und die im Mittel abgegebene Leistung sowie den Wirkungsgrad für die drei vorgegebenen Frequenzen.
- 5 Ersetzen Sie die pn-Diode durch eine geeignete Schottky-Diode aus der Bibliothek des Simulators und vergleichen Sie die Stromaufnahme, den Ausgangsspannungsverlauf und den Wirkungsgrad.

³Führen Sie die Simulation einmal mit und einmal ohne R_1 aus und vergleichen Sie die Stromverläufe. Der kurzzeitig zulässige Maximalstrom durch die Diode ist 150 A.



Z-Diode



Aufgabe 4.16: Z-Diode

Gegeben sind die Durchbruchspannungen in V und die Temperaturkoeffizienten (Tk) in $\text{mV}/^\circ\text{C}$ für Z-Dioden vom Typ BZT585...

Typ	U_{BR}	TC in $\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$	Typ	U_{BR}	Tk in $\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$
...B2V4T	$2,4 \pm 0,05 \text{ V}$	-1,3	...B4V3T	$4,3 \pm 0,09 \text{ V}$	-1,7
...B2V7T	$2,7 \pm 0,05 \text{ V}$	-1,4	...B4V7T	$4,7 \pm 0,09 \text{ V}$	-1,2
...B3V3T	$3,3 \pm 0,07 \text{ V}$	-1,8	...B5V1T	$5,1 \pm 0,10 \text{ V}$	-0,5
...B3V6T	$3,6 \pm 0,07 \text{ V}$	-1,9	...B5V6T	$5,6 \pm 0,11 \text{ V}$	1,0
...B3V9T	$3,9 \pm 0,08 \text{ V}$	-1,9	...B6V2T	$6,2 \pm 0,12 \text{ V}$	2,2

Konstruieren Sie daraus ein Bauteil mit einer Durchbruchspannung von ca. 9 V und möglichst geringem Temperaturkoeffizient.

Zur Kontrolle

Typ	U_{BR}	TC in $\frac{mV}{^{\circ}C}$	Typ	U_{BR}	Tk in $\frac{mV}{^{\circ}C}$
...B2V4T	$2,4 \pm 0,05 V$	-1,3	...B4V3T	$4,3 \pm 0,09 V$	-1,7
...B2V7T	$2,7 \pm 0,05 V$	-1,4	...B4V7T	$4,7 \pm 0,09 V$	-1,2
...B3V3T	$3,3 \pm 0,07 V$	-1,8	...B5V1T	$5,1 \pm 0,10 V$	-0,5
...B3V6T	$3,6 \pm 0,07 V$	-1,9	...B5V6T	$5,6 \pm 0,11 V$	1,0
...B3V9T	$3,9 \pm 0,08 V$	-1,9	...B6V2T	$6,2 \pm 0,12 V$	2,2

- Reihenschaltung BZT585B2V4T und BZT585B5V6T:
 $U_{BR} = 7,5 \pm 1,5 V$, $Tk = -0,3 \frac{mV}{^{\circ}C}$
- Reihenschaltung BZT585B3V6T und BZT585B6V2T:
 $U_{BR} = 9,8 \pm 1,9 V$, $Tk = 0,4 \frac{mV}{^{\circ}C}$



PIN-Diode

Aufgabe 4.17: PIN-Diode

Was ist die wesentliche Eigenschaft einer PIN-Diode gegenüber einer normalen pn-Diode beim Einsatz als spannungsgesteuerter Widerstand für hochfrequente Signale?

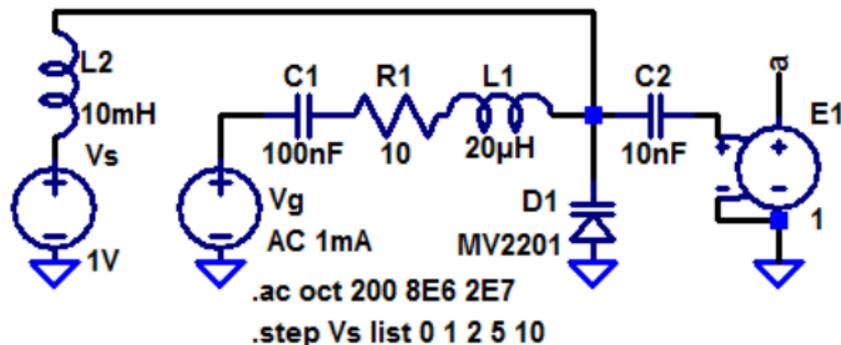
Die große Transitzeit, wegen der sie für hohe Frequenzen wie ein spannungsgesteuerter Widerstand wirkt.



Kapazitätsdiode

Aufgabe 4.18: Kapazitätsdiode

Gegeben ist die nachfolgende RLC-Filterschaltung mit einer Kapazitätsdiode zur Abstimmung:



- Bestimmen Sie die Frequenzgänge für die Sperrspannungen $U_S \in \{0 \text{ V}, 1 \text{ V}, 2 \text{ V}, 5 \text{ V}, 10 \text{ V}\}$ durch Simulation und tragen Sie in die Tabelle auf der nächsten Folie für jede U_S die Resonanzfrequenz f_0 ein, bei der die Ausgangsspannung am größten ist.



- 2 Bestimmen Sie die komplexe Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von R_1 , L_1 und C_{SD1} unter Vernachlässigung der Ströme durch L_2 und C_2 sowie der Bahnwiderstände von D1 (C_{SD1} – Sperrschichtkapazität von D1).
- 3 Stellen Sie die Gleichung aus dem Aufgabenteil 2 um in

$$\frac{U_a}{U_g} = f(R_1, L_1, C_{SD1}) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{Q \cdot f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

und leiten Sie daraus die Berechnungsvorschriften

$$f_0 = f(R_1, L_1, C_{SD1})$$

für die Resonanzfrequenz ab.

- 4 Bestimmen Sie für die Resonanzfrequenzen f_0 aus Aufgabenteil 1 die Sperrschichtkapazitäten $C_{SD1} = f(U_S)$.

U_S	0V	1V	2V	5V	10V
f_0					
C_{SD1}					



- 5 Lesen Sie aus dem Spice-Modell der Diode MV2201 die Parameter $C_S = C_{j0}$, $U_{\text{Diff}} = V_j$ und $m_s = M$ ab und kontrollieren Sie die Ergebnisse über die Gleichung:

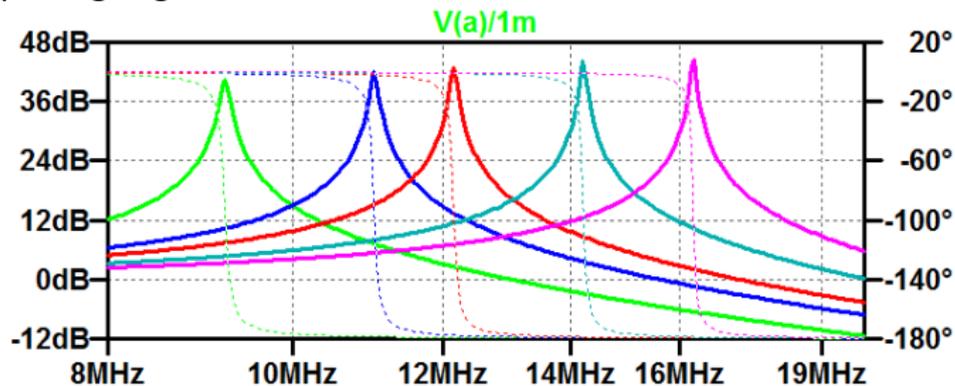
$$C_S = C_{S0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{U_{\text{Diff}}}\right)^{m_S}} \quad \text{für } U_S \geq 0$$

U_S	0V	1V	2V	5V	10V
f_0					
C_{SD1}					
C_S^*					

C_{SD1} – Sperrschichtkapazität nach Aufgabenteil 1 bis 4; C_S^* – berechnete Sperrschichtkapazität

Zur Kontrolle von Aufgabenteil 1 bis 3

1 Frequenzgang:



2 Komplexe Übertragungsfunktion:

$$\frac{U_a}{U_g} = \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_S \cdot f - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_1 \cdot C_S}$$

3 Resonanzfrequenz:

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot L_1 \cdot C_S}$$

Zur Kontrolle Aufgabenteil 4 und 5

- Sperrschichtkapazität mit den Parametern aus dem Spice-Modell der Diode MV2201:

$$C_S = C_{j0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{V_j}\right)^M} = 14,93 \text{ pF} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{U_S}{0,75 \text{ V}}\right)^{0,4261}}$$

- Sperrschichtkapazität nach Aufgabenteil 1 bis 4 (C_{SD1}) und berechnete Sperrschichtkapazität (C_S^*) für die Sperrspannungen $U_S \in \{0 \text{ V}, 1 \text{ V}, 2 \text{ V}, 5 \text{ V}, 10 \text{ V}\}$:

U_S	0 V	1 V	2 V	5 V	10 V
f_0	9,22 MHz	11,04 MHz	12,18 MHz	14,23 MHz	16,26 MHz
C_{SD1}	14,90 pF	10,39 pF	8,54 pF	6,25 pF	4,79 pF
C_S^*	14,93 pF	10,45 pF	8,64 pF	6,33 pF	4,87 pF