



# Elektronik II

## Grosse Übung zu Foliensatz E2\_F5

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (E2-GF5)  
9. Juli 2024



## Inhalt Große Übung zu Foliensatz F5:

- 1.2 Spice-Modell stationär
- 1.3 Kleinsignalmodell
- 1.4 Grundsaltungen
  - J- und MesFet
  - 2.1 Aufgaben



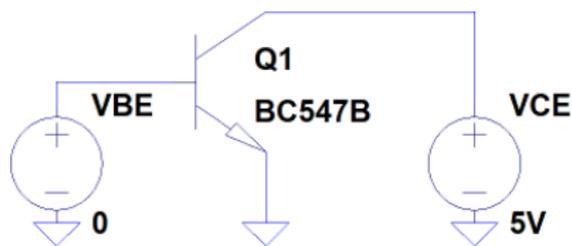
## Bipolartransistor



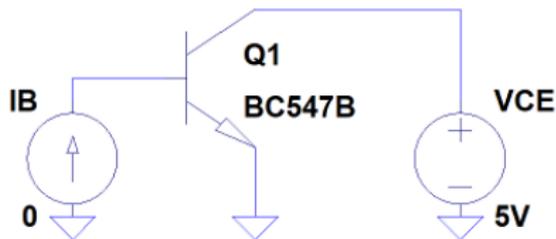
## Spice-Modell stationär

## Aufgabe 5.1: Transistorkennlinie

- 1 Bestimmen Sie mit der linken Testschaltung den Emitter- und Basisstrom für  $U_{BE} \in [500 \text{ mV}, 700 \text{ mV}]$  mit logarithmisch unterteilter Stromachse.
- 2 Bestimmen Sie mit der rechten Testschaltung den Emitterstrom in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung für die Basisströme  $0,5 \text{ mA}$ ,  $1 \text{ mA}$ , ...,  $3 \text{ mA}$ .

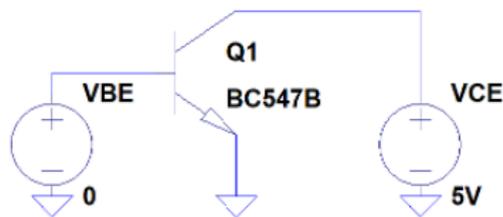


`.dc VBE 0.5 0.7V 10mV`

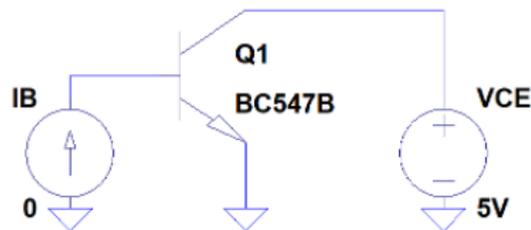
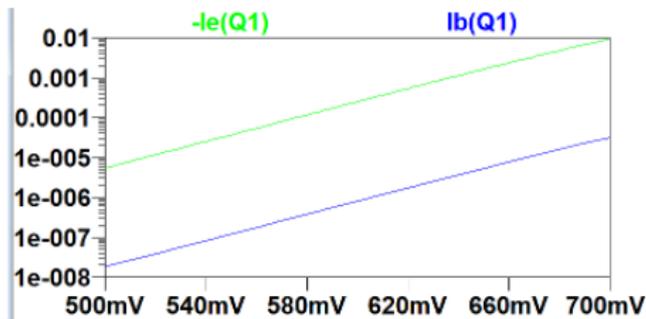


`.dc VCE 0 3V 10mV IB 0.5mA 3mA 0.5mA`

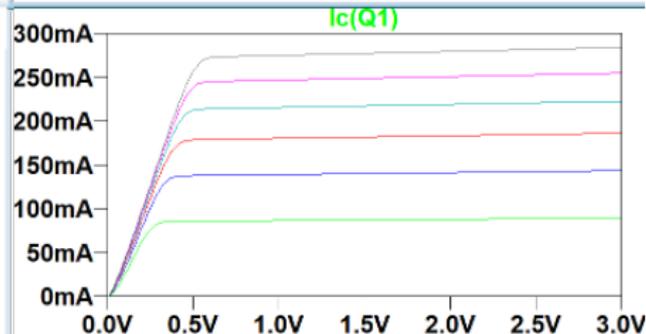
## Ergebnisse zur Kontrolle



.dc VBE 0.5 0.7V 10mV

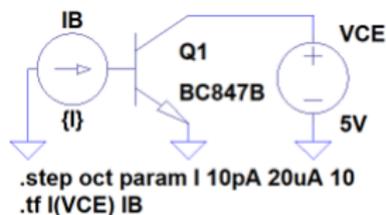


.dc VCE 0 3V 10mV IB 0.5mA 3mA 0.5mA



## Aufgabe 5.2: Verstärkung

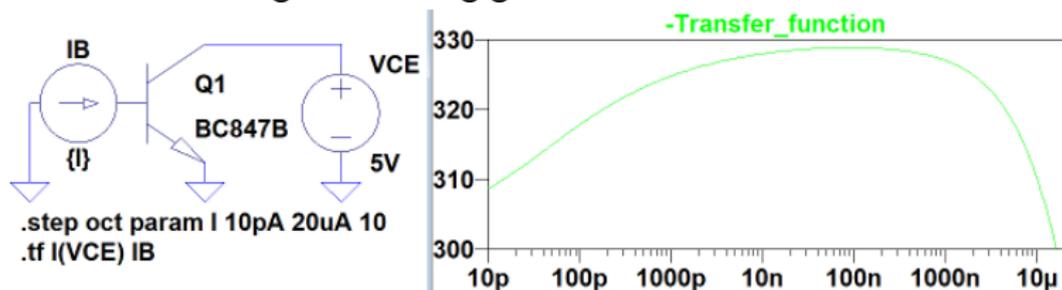
- Bestimmen Sie mit der Testschaltung die Stromverstärkung ( $\text{Transfer\_function} * (-1)$ ) für Basiströme im Bereich von  $10 \mu\text{A}$  bis  $20 \mu\text{A}$  und stellen Sie das Ergebnis mit logarithmischer Stromachse dar.



- In welchem Bereich des Basisstroms hat der Transistor mindestens 95% seine maximalen Stromverstärkung?

## Ergebnisse zur Kontrolle

- 1 Stromverstärkung in Abhängigkeit vom Basisstrom:



- 2 Maximale Stromverstärkung ist 326. Davon mindestens 95% sind 311. Der Bereich des Basisstroms, in dem der Transistor mindestens 95% seine maximalen Stromverstärkung besitzt, ist 23 pA bis 9  $\mu$ A.



## Aufgabe 5.3: Transistorparameter

```
.MODEL BFW92 NPN
+IS=0.23fA BF=43 NF=1 VAF=31V IKF=2.8A ISE=12pA NE=2.7
+BR=15 NR=1 VAR=13 IKR=0.3A ISC=0.62fA NC=1.1 RB=10
+IRB=1E-6 RBM=10 RE=30 RC=2.8 EG=1.11 XTI=3 CJE=0.9pF
+VJE=0.6V MJE=0.28 TF=0.1ns XTF=86 VTF=4.17E-2
+ITF=9.8E-2 PTF=-10 CJC=1.1E-12 VJC=0.41 ...
```

- 1 Welche der Parameter bestimmen das statische Verhalten im Normalbereich bei maximaler Verstärkung (Vernachlässigbar seien Leckströme, Hochstromeffekt, Temperaturabhängigkeit und Rauschen)? Begründen Sie ihre Auswahl.
- 2 Welche Parameter benötigen Sie weiterhin für die Abschätzung der Sperrschichtkapazitäten.
- 3 Welche Parameter werden zur Abschätzung der Diffusionskapazität des in Durchlassrichtung betriebenen BE-Übergangs benötigt?



## Ergebnisse zur Kontrolle

.MODEL BFW92 NPN

+IS=0.23fA BF=43 NF=1 VAF=31V IKF=2.8A ISE=12pA NE=2.7

+BR=15 NR=1 VAR=13 IKR=0.3A ISC=0.62fA NC=1.1 RB=10

+IRB=1E-6 RBM=10 RE=30 RC=2.8 EG=1.11 XTI=3 CJE=0.9pF

+VJE=0.6V MJE=0.28 TF=0.1ns XTF=86 VTF=4.17E-2

+ITF=9.8E-2 PTF=-10 CJC=1.1E-12 VJC=0.41 ...

Kollektorstrom mit Early-Effekt:

$$I_C(U_{CE}) = I_{C0} \cdot \left(1 + \frac{U_{CE}}{V_{af}}\right) \quad \text{mit } I_{C0} = I_s \cdot \left(e^{\frac{U_{BE}}{n_f \cdot U_T}} - 1\right)$$

Sperrschichtkapazitäten ( $i \in \{e, c\}$ ):

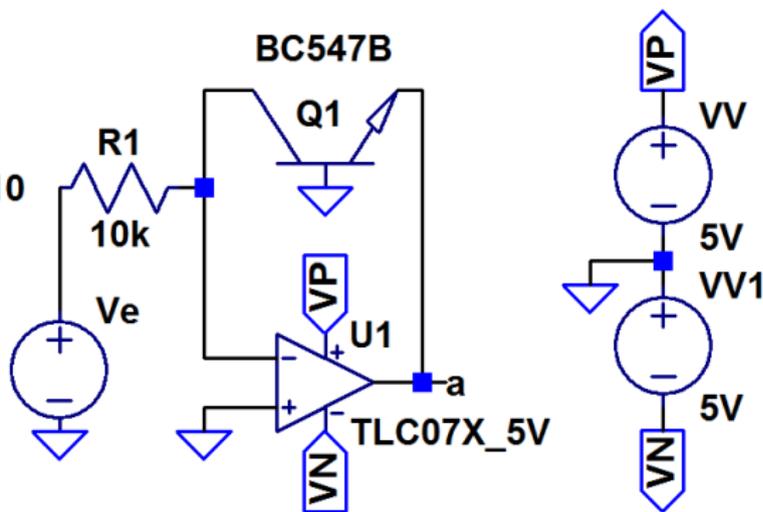
$$C_{S,i} = C_{j,i} \cdot \left(1 - \frac{U_D}{V_{j,i}}\right)^{M_{j,i}} \quad \text{für } U_D < F_c \cdot V_{j,i}$$

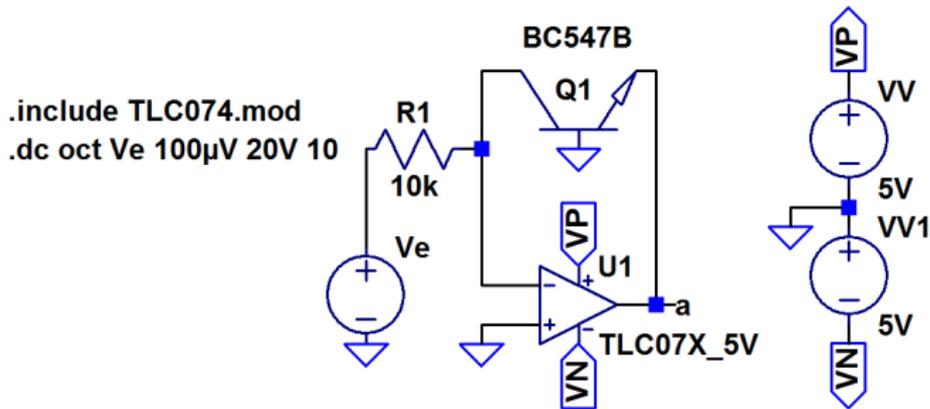
Diffusionskapazität:

$$C_{BE,D} = \frac{dQ_{BE,D}}{dU_{BE}} = \frac{T_f \cdot B_f \cdot I_{B,N}}{n_f \cdot U_T}$$

## Aufgabe 5.4: Logarithmierer Bipolartransistor

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





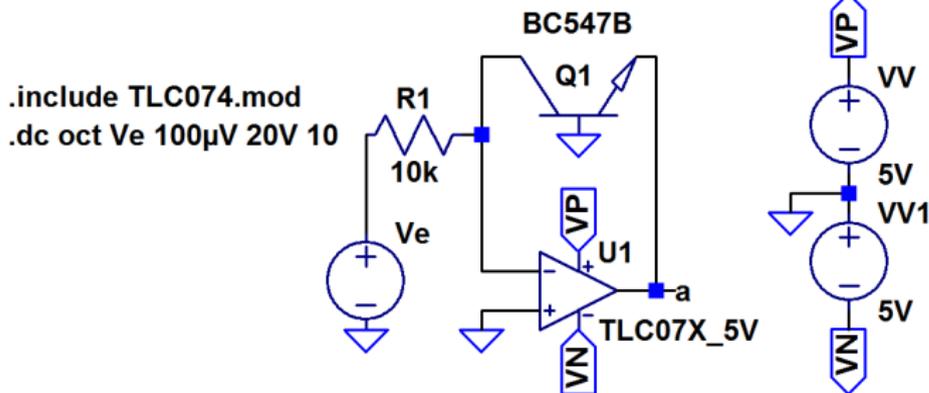
- Schätzen Sie die Übertragungsfunktion  $U_a = f(U_e)$  im Normalbetrieb mit der vereinfachten Transistorgleichung

$$I_C = I_s \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{N_f \cdot U_T}} \right)$$

und den Parametern  $I_s = 7 \text{ fA}$ ,  $N_f = 1$  und  $U_T = 26 \text{ mV}$  und einem idealen Operationsverstärker ab.

- Kontrollieren Sie das Ergebnis durch Simulation der realen Schaltung.

## Ergebnisse zur Kontrolle



$$0 = \frac{U_e}{R_1} + I_s \cdot \left( e^{\frac{U_a}{N_f \cdot U_T}} \right)$$

$$U_a = -N_f \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{U_e}{I_s \cdot R_1} \right)$$



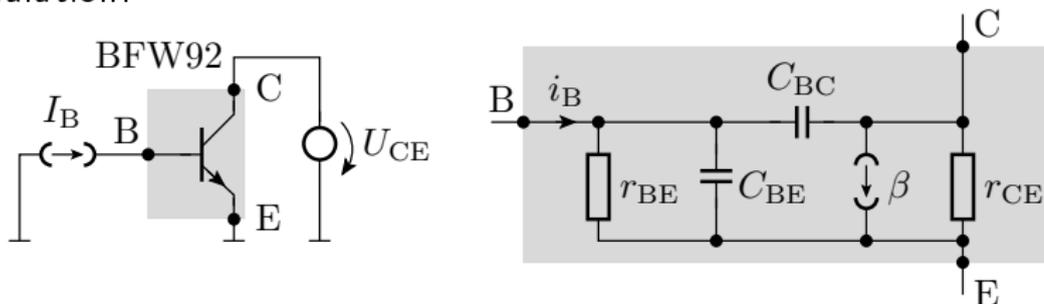
## Kleinsignalmodell

## Aufgabe 5.5: Kleinsignalersatzschaltung

Bestimmen Sie mit den Modellparametern von Folie 9 die Parameter der linearen Kleinsignalersatzschaltung

- 1 Eingangswiderstand  $r_{BE}$ , Ausgangswiderstand  $r_{CE}$  und Stromverstärkung  $\beta$ ,
- 2 die Sperrschichtkapazitäten des BE- und des BC-Übergangs,
- 3 die Diffusionskapazität des BE-Übergangs

für  $I_C = 2 \text{ mA}$  und  $U_{CE} = 1,9 \text{ V}$  rechnerisch<sup>1</sup> und Kontrolle durch Simulation.



<sup>1</sup>Unter Nutzung der in der Vorlesung verwendeten Näherungen.

## Ergebnisse Aufgabenteil a

```
.MODEL BFW92 NPN
```

```
+IS=0.23fA BF=43 NF=1 VAF=31V IKF=2.8A ISE=12pA NE=2.7
```

```
+BR=15 NR=1 VAR=13 IKR=0.3A ISC=0.62fA NC=1.1 RB=10 ...
```

Eingangswiderstand:

$$r_{BE} = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_B} \right|_A = \frac{Nf \cdot U_T}{I_B}$$

Ausgangswiderstand:

$$r_{CE} = \left. \frac{dU_{CE}}{dI_C} \right|_A = \frac{Vaf}{I_{C0}}$$

Stromverstärkung:  $\beta = Bf$  im optimalen Bereich,



## Ergebnisse Aufgabenteil b und c

```
.MODEL BFW92 NPN
+IS=0.23fA BF=43 NF=1 VAF=31V IKF=2.8A ISE=12pA NE=2.7
+BR=15 NR=1 VAR=13 IKR=0.3A ISC=0.62fA NC=1.1 RB=10
+IRB=1E-6 RBM=10 RE=30 RC=2.8 EG=1.11 XTI=3 CJE=0.9pF
+VJE=0.6V MJE=0.28 TF=0.1ns XTF=86 VTF=4.17E-2
+ITF=9.8E-2 PTF=-10 CJC=1.1E-12 VJC=0.41 ...
```

Sperrschichtkapazitäten:

$$C_{S.E} = C_{je} \cdot \left(1 - \frac{U_D}{V_{je}}\right)^{M_{je}} \quad \text{für } U_D < F_c \cdot V_{je}$$

$$C_{S.E} = C_{jc} \cdot \left(1 - \frac{U_D}{V_{jc}}\right)^{M_{jc}} \quad \text{für } U_D < F_c \cdot V_{jc}$$

Diffusionskapazität:

$$C_{BE.D} = \frac{dQ_{BE.D}}{dU_{BE}} = \frac{T_f \cdot B_f \cdot I_{B.N}}{N_f \cdot U_T}$$

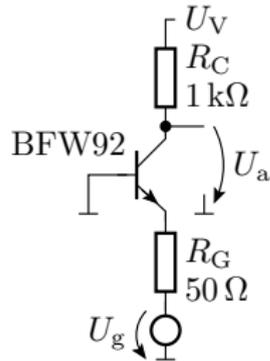


## Grundsaltungen

## Aufgabe 5.6: Transistorverstärker

Gegeben ist der dargestellte Transistorverstärker in Basisschaltung:

- 1 Legen Sie die Gleichanteile der Eingangsspannung  $U_g$  und der Versorgungsspannung  $U_V$  so fest, dass der Transistor im Arbeitspunkt  $I_C = 2 \text{ mA}$  und  $U_{CE} = 1,9 \text{ V}$  betrieben wird. Kontrolle durch Simulation.
- 2 Zeichnen Sie die lineare Kleinsignalersatzschaltung der Gesamtschaltung und bestimmen Sie für alle Widerstände, Kapazitäten und Quellen die Werte.
- 3 Schätzen Sie die Übertragungsfunktion  $\underline{U}_a/\underline{U}_g$  als Funktion der Frequenz und daraus die Verstärkung für niedrige Frequenzen und die Bandbreite<sup>2</sup>. Kontrolle durch Simulation.

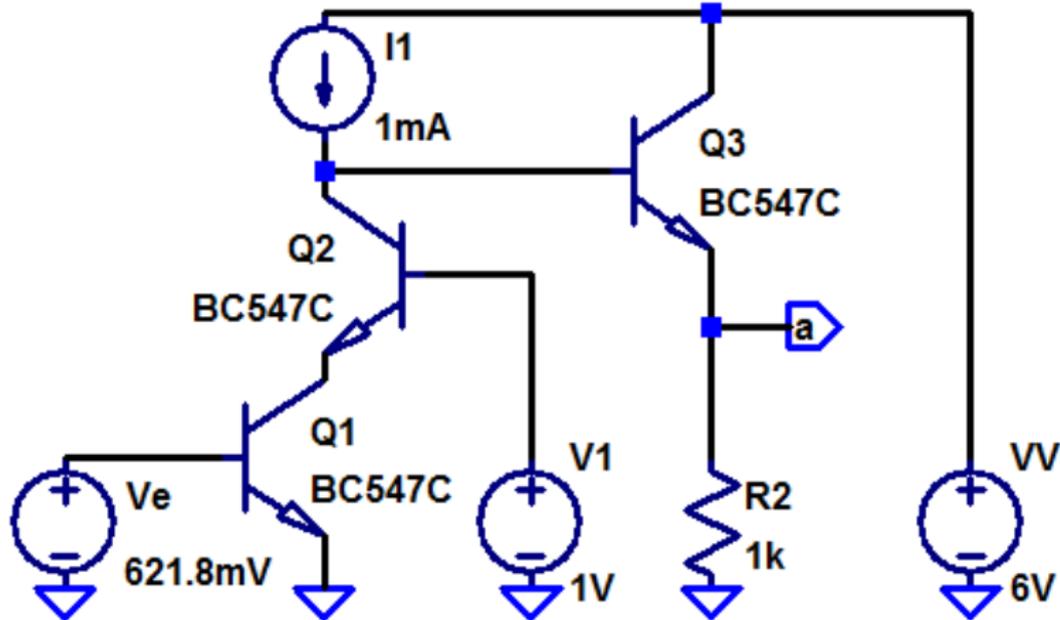


<sup>2</sup>Unter Nutzung der in der Vorlesung verwendeten Vereinfachungen.

## Aufgabe 5.7: Kaskodenschaltung

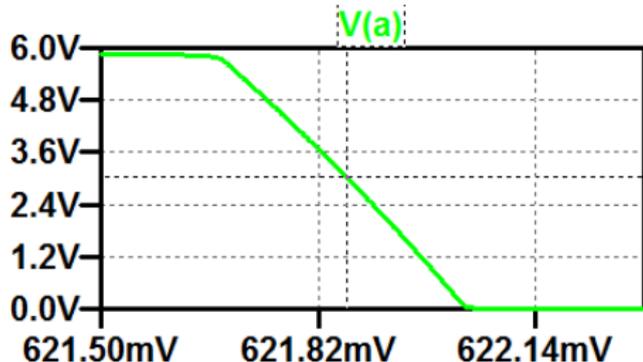
Gegeben ist die Kaskodenschaltung auf der nachfolgenden Folie:

- 1 Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion und daraus den erforderlichen Gleichanteil der Eingangsspannung für eine Ausgangsspannung im Arbeitspunkt von  $U_{a.A} = 3\text{ V}$ .
- 2 Bestimmen Sie den Eingangswiderstand, den Ausgangswiderstand und die Spannungsverstärkung im Arbeitspunkt.
- 3 Bestimmen Sie den Klirrfaktor für eine Amplitude der Ausgangsspannung von  $1\text{ V}$ .
- 4 Bestimmen Sie die Bandbreite.



## Zur Kontrolle Aufgabenteil 1 und 2

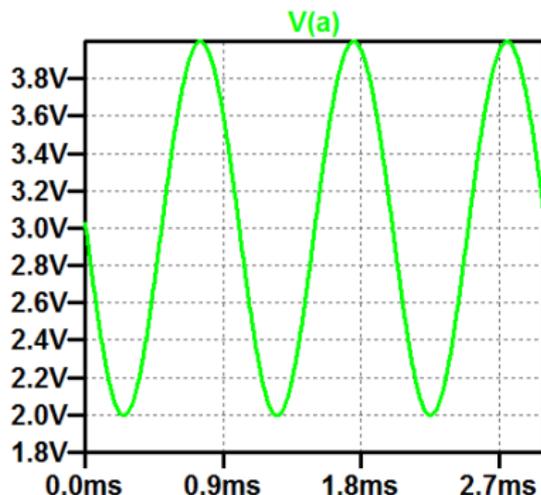
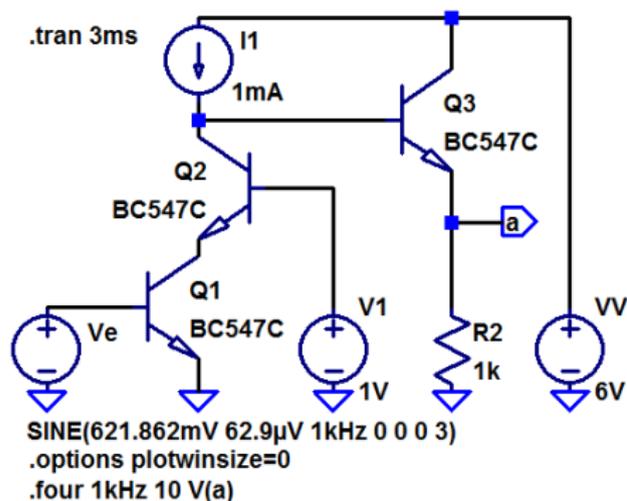
### 1 Festlegung des Arbeitspunkts:



### 2 Spannungsverstärkung, Eingangs- und Ausgangswiderstand und im Arbeitspunkt:

Transfer_function:	-15903.8	transfer
ve#Input_impedance:	11947.8	impedance
output_impedance_at_V(a):	928.956	impedance

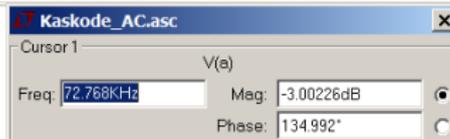
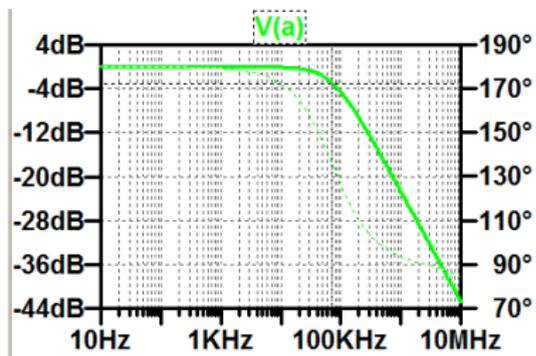
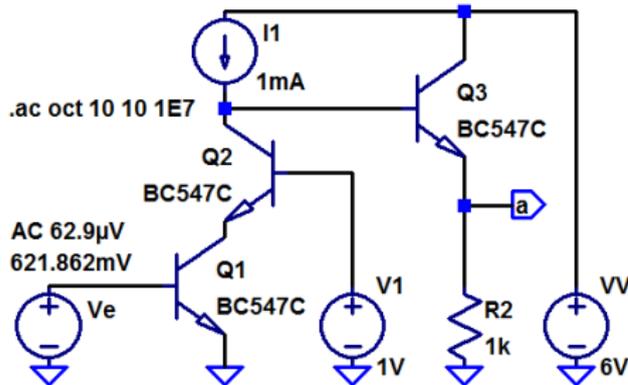
## Zur Kontrolle Aufgabenteil 3 (Klirrfaktor)



Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component
1	1.000e+03	1.001e+00
2	2.000e+03	1.274e-02
3	3.000e+03	1.972e-04

Total Harmonic Distortion: 1.273568%

## Zur Kontrolle Aufgabenteil 4 (Bandbreite)



Obere Grenzfrequenz:  $f_0 = 72,786 \text{ kHz}$



# J- und MesFet



# Aufgaben

## Aufgabe 5.8: Spice-Parameter

Gegeben ist folgendes Modell für den einen Sperrschicht-Fet BF256A:

```
.MODEL BF256A NJF
+VT0=-2.13 BETA=1E-3 LAMBDA=1.69E-2 RD=14 RS=14
+IS=3.5E-16 CGS=2.1pF CGD=2.3pF PB=0.77 B=0,4
```

Wie groß sind

- 1 die Einschaltspannung,
- 2 die Steilheit,
- 3 die Kapazität zwischen Gate und Drain bei einer Gate-Drain-Spannung von  $-3\text{ V}$  und
- 4 der Drain-Strom bei  $U_{GS} = 0\text{ V}$  und  $U_{GD} = -3\text{ V}$ ?

## Zur Kontrolle

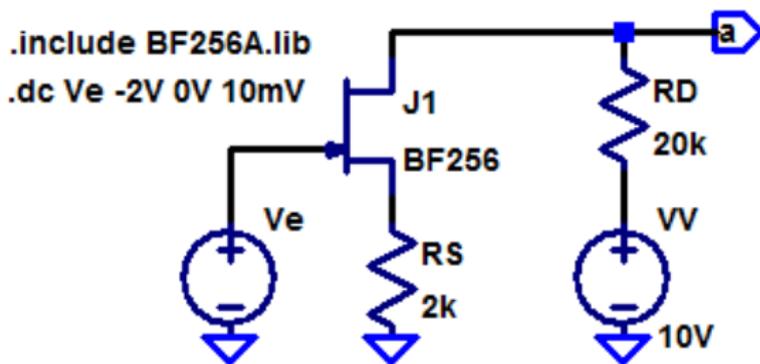
- 1 Einschaltspannung:  $V_{TO} = -2,13\text{V}$
- 2 Steilheit:  $BETA = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$
- 3 Kapazität zwischen Gate und Drain bei  $U_{GD} = -3\text{V}$ :

$$\begin{aligned} C_{GS} &= C_{gs} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{U_{GS}}{P_B}\right)^B} \\ &= 2,1\text{ pF} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{3\text{V}}{0,77\text{V}}\right)^{0,4}} = 0,463\text{ pF} \end{aligned}$$

- 4 Drain-Strom bei  $U_{GS} = 0\text{V}$  und  $U_{GD} = -3\text{V}$ . Wegen  $U_{GD} < V_{TO}$  Abschnürbereich.  $U_{DS} = U_{GS} - U_{GD} = 2\text{V}$ :

$$\begin{aligned} I_D &= \text{Beta} \cdot (1 + \text{Lambda} \cdot U_{DS}) \cdot (U_{GS} - V_{to})^2 \\ &= 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \cdot (1 + 0,0169 \cdot 2\text{V}) \cdot (0 - (-2,13\text{V}))^2 = 4,69\text{ mA} \end{aligned}$$

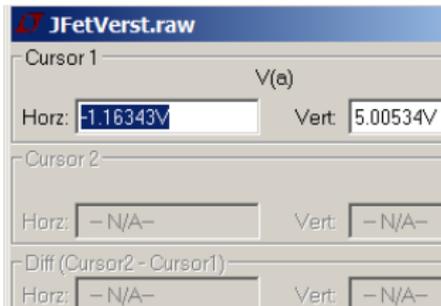
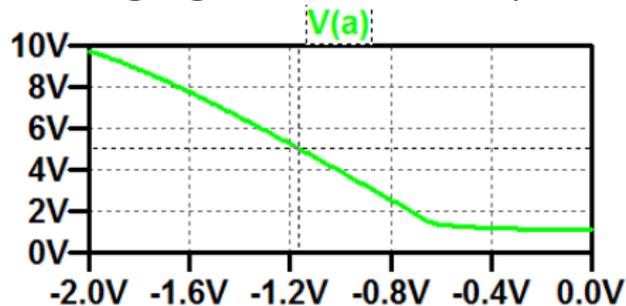
## Aufgabe 5.9: JFET-Verstärker



- 1 Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion und daraus den erforderlichen Gleichanteil der Eingangsspannung für eine Ausgangsspannung im Arbeitspunkt von  $U_{a.A} = 5V$ .
- 2 Bestimmen Sie den Eingangswiderstand, den Ausgangswiderstand und die Spannungsverstärkung im Arbeitspunkt.

## Zur Kontrolle

- 1 Übertragungsfunktion, Arbeitspunkt:



- 2 Verstärkung, Ein- und Ausgangswiderstand:

Transfer_function:	-6.59462	transfer
ve#Input_impedance:	1.26021e+011	impedance
output_impedance_at_V(a):	19519.9	impedance