



Elektronik II

Grosse Übung zu Foliensatz F3

G. Kemnitz

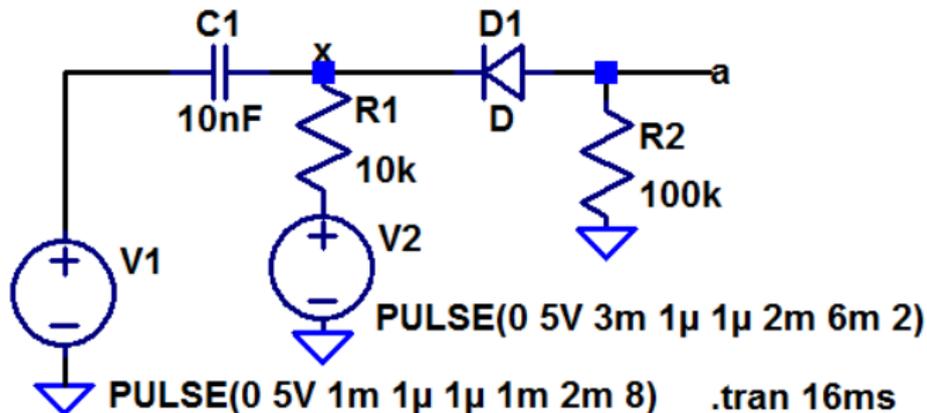
Institut für Informatik, TU Clausthal (E2-GrÜb-F3)
8. Juli 2016



Zeitdisk. Simulation

Aufgabe 3.1: Impulstor

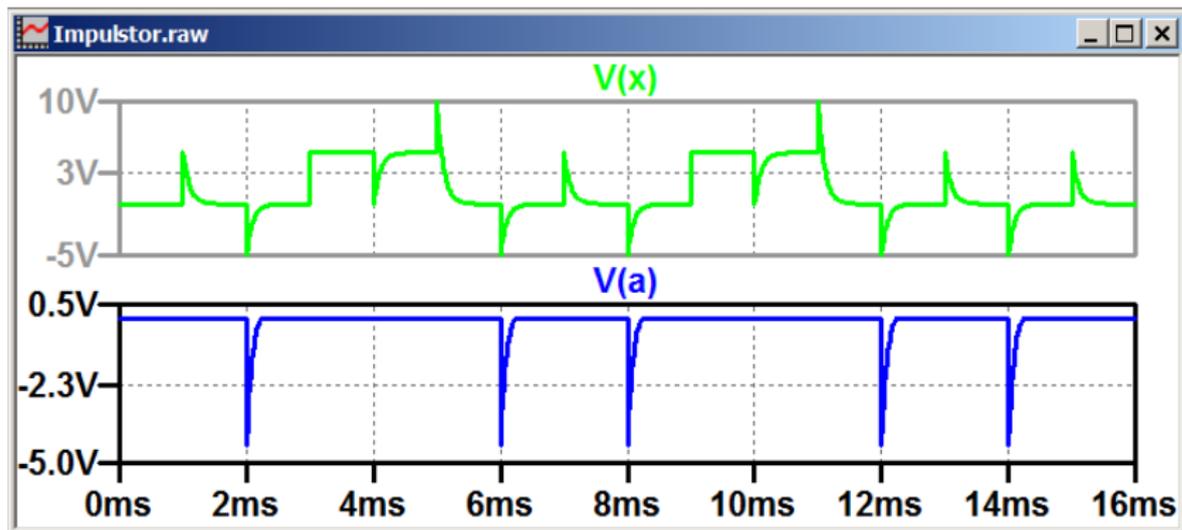
Ein Impulstor diente früher¹ zur Erzeugung von Setz- und Rücksetzimpulsen an der aktiven Flanke des Takts (V1), die mit einer logischen »1« am Gate (V2) ungedrückt werden konnten.



Bestimmen Sie die Zeitverläufe von a und x und beschreiben Sie die Funktion der Schaltung.

¹Als Rechner noch aus Röhren und Transistoren zusammengelötet waren.

Zur Kontrolle

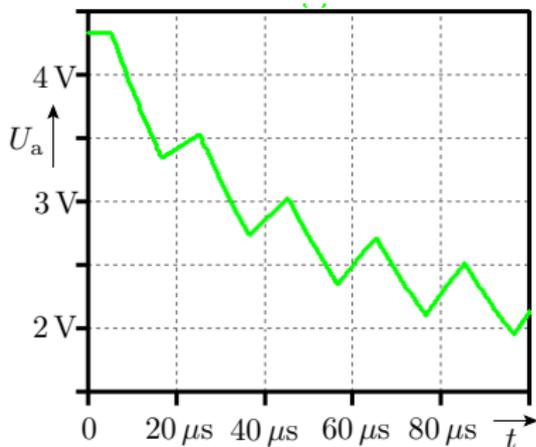
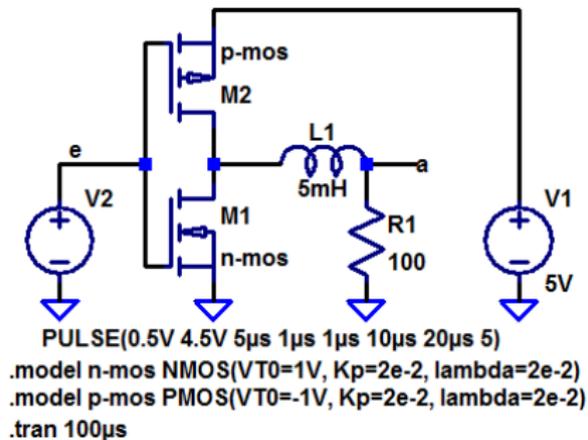


- An x addieren sich die Nadelimpuls und die Spannung von V2.
- Die Diode lässt nur Pulse nach unten durch, wenn $V2$ kleiner als die Sprunghöhe ist.



Geschaltetet RC-Glieder

Aufgabe 3.2: Glättungsinduktivität



- Verkürzen Sie die Signalperiode der Quelle auf $0,1 \cdot \tau$.
- Erhöhen Sie die Anzahl der simulierten Perioden auf 40 und die Simulationszeit auf $4 \cdot \tau$.



- Untersuchen Sie die mittlere Ausgangsspannung, die sich nach $4 \cdot \tau$ in Abhängigkeit von der relativen Pulsbreite

$$\eta = \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}}$$

einstellt.

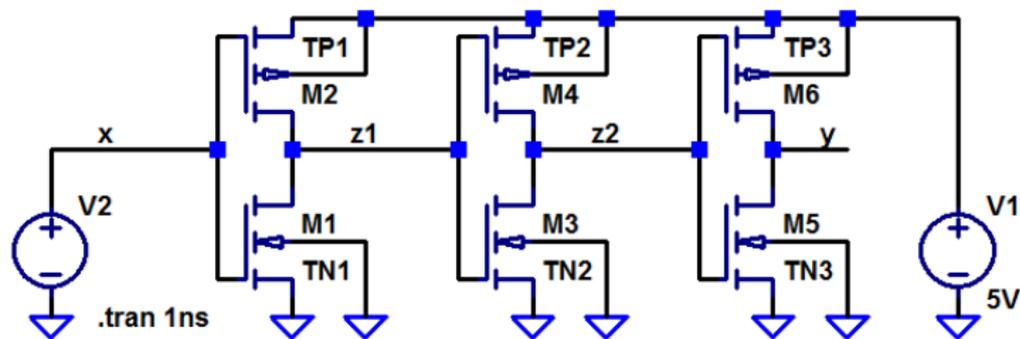
- Füllen Sie dazu die nachfolgende Tabelle aus:

η	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
\bar{U}_a									



Gatterschaltzeiten

Aufgabe 3.3: CMOS-Inverter



```
PULSE(0 5V 50p 50p 50p 350p 800p 2)
```

```
.model myNMOS NMOS(VT0=0.73V Kp=69μ lambda=33m tox=25n CJ=360μ CJSW=250p)
```

```
.model myPMOS PMOS(VT0=-0.75V, Kp=23μ, lambda=55m tox=25n CJ=340μ CJSW=220p)
```

```
.model TN1 ako:myNMOS l=1μ w=1μ ad=1.5p as=1.5p pd=5μ ps=5μ
```

```
.model TP1 ako:myPMOS l=1μ w=2μ ad=3p as=3p pd=7μ ps=7μ
```

```
.model TN2 ako:myNMOS l=1μ w=1μ ad=1.5p as=1.5p pd=5μ ps=5μ
```

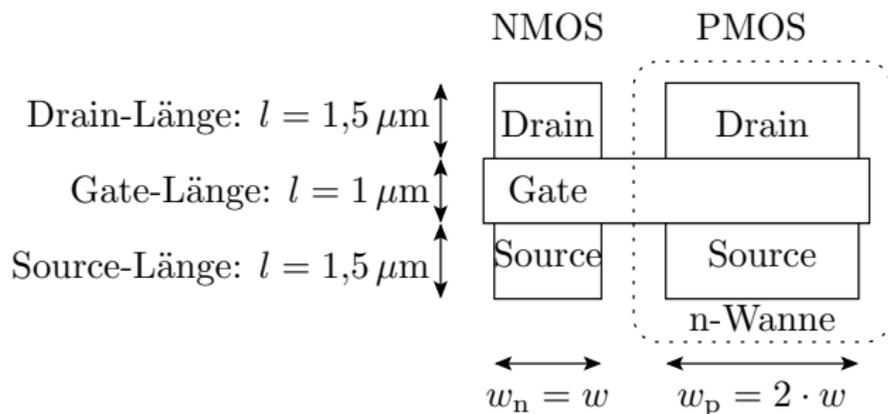
```
.model TP2 ako:myPMOS l=1μ w=2μ ad=3p as=3p pd=7μ ps=7μ
```

```
.model TN3 ako:myNMOS l=1μ w=2μ ad=3p as=3p pd=7μ ps=7μ
```

```
.model TP3 ako:myPMOS l=1μ w=4μ ad=6p as=6p pd=11μ ps=11μ
```

l/w – Kanallänge / -breite in m; ad / as – Fläche des Drain- / Source-Gebiets in m^2 ; pd / ps – Umfang des Drain- / Source-Gebiets in m.

Geometrie und Verzögerung



Gesucht: Verzögerung von z_1 nach z_2 für die Transistorbreiten:

	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 3
Schaltung 1	$w = 1 \mu\text{m}$	$w = 1 \mu\text{m}$	$w = 1 \mu\text{m}$
Schaltung 2	$w = 1 \mu\text{m}$	$w = 1 \mu\text{m}$	$w = 4 \mu\text{m}$
Schaltung 3	$w = 1 \mu\text{m}$	$w = 2 \mu\text{m}$	$w = 4 \mu\text{m}$



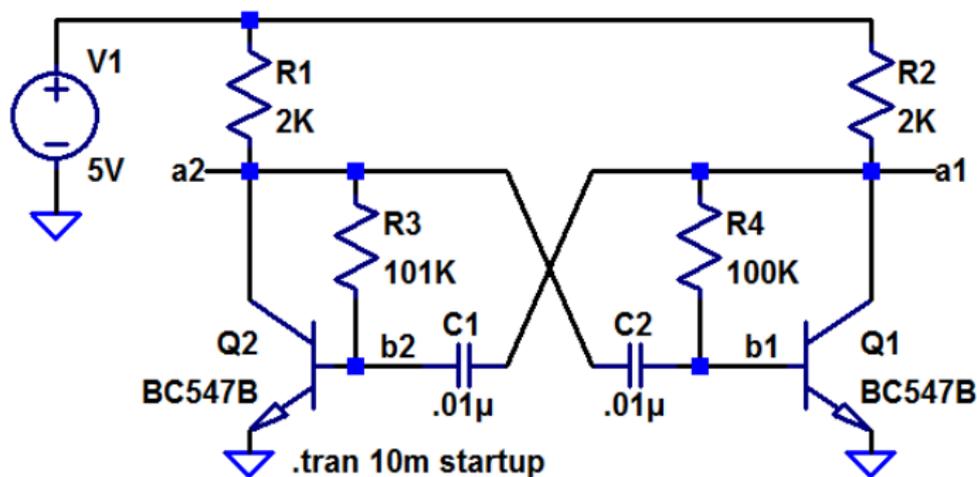
Zusammenstellen der Parameterwerte:

$w = 1$	Kanal- länge (l)	Kanal- breite (w)	Source- Fläche (as)	Source- Umf. (ps)	Drain- Fläche (ad)	Drain- Umf. (pd)
NMOS						
PMOS						
$w = 2$						
NMOS						
PMOS						
$w = 4$						
NMOS						
PMOS						



Kippstufen

Aufgabe 3.4: Astabiler Multivibrator



- Simulieren Sie die dargestellte Schaltung.
- Was passiert, wenn Sie $R_3 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ wählen?
- Ändern Sie die Schaltung so, dass die relative Pulsbreite η bei gleicher Periode am Ausgang 25% beträgt.



Sinussignale

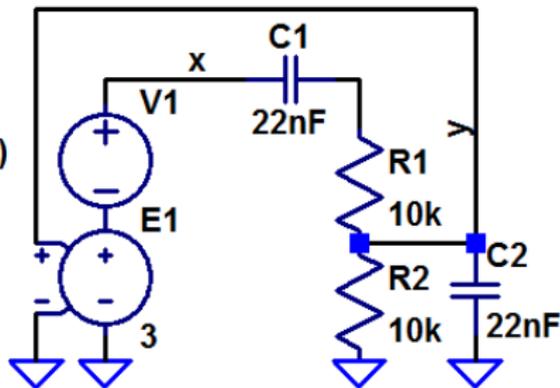
Aufgabe 3.5: Wien-Oszillator

Die Wienbrücke, ein Spannungsteiler aus einer RC-Reihen- und einer RC-Parallelschaltung, hat für eine bestimmte Frequenz das Spannungsteilerverhältnis $\frac{1}{3}$. Rückgekoppelt mit einem spannungsgesteuerten Verstärker mit der Verstärkung 3 erzeugt die Schaltung, wenn man sie mit einem Impuls anregt, ein Sinussignal.

Startimpuls:

`PULSE(0 1V 1m 1μ 1μ 1m 2m 1)`

`.tran 10ms`



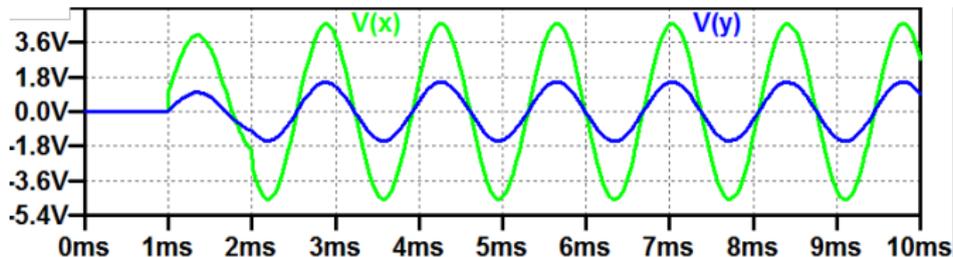
- Bestimmen Sie die Zeitverläufe der Signale x und y .



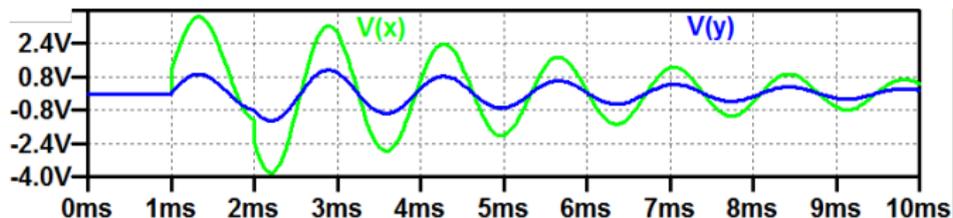
- 2 Berechnen Sie die Frequenz, bei der das Spannungsteilerverhältnis der Wienbrücke $1/3$ ist, und vergleichen Sie diese mit der Frequenz, mit der der Oszillator schwingt.
- 3 Was passiert, wenn die Amplitude des Startpulses auf zwei Volt vergrößert wird?
- 4 Wie ändert sich der Signalverlauf von x , wenn die Verstärkung des spannungsgesteuerten Verstärkers auf $2,9$ verringert wird?
- 5 Wie ändert sich der Signalverlauf von x , wenn die Verstärkung auf $3,1$ vergrößert wird?

Zur Kontrolle

- 1 Zeitverläufe der Signale x und y :



- 2 Etwa 1 kHz.
 3 Verdopplung aller Amplituden.
 4 Abklingendes Sinussignal:



- 5 Aufschwingendes Sinussignal.

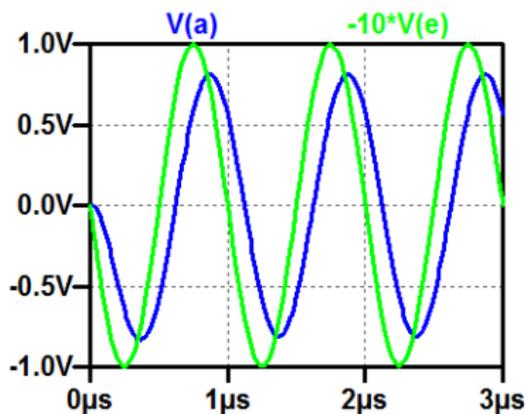
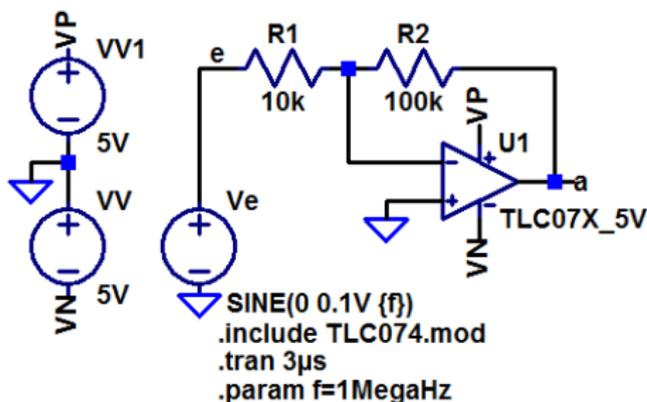


Frequenzbereich



Frequenzgang

Aufgabe 3.6: Invertierender Verstärker mit OV



- Bestimmen Sie für die Frequenzen 300 kHz, 1 MHz, 3 MHz und 10 MHz mit einer zeitdiskreten Simulation die Ausgangsamplituden und Verzögerungen.



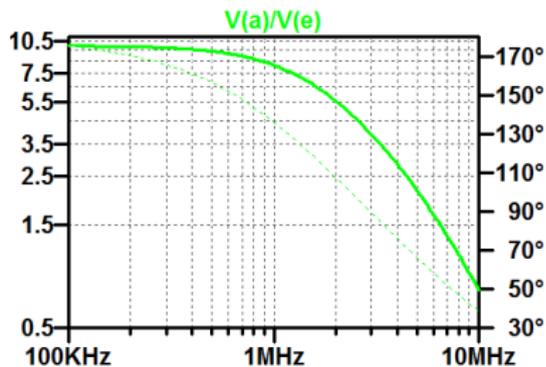
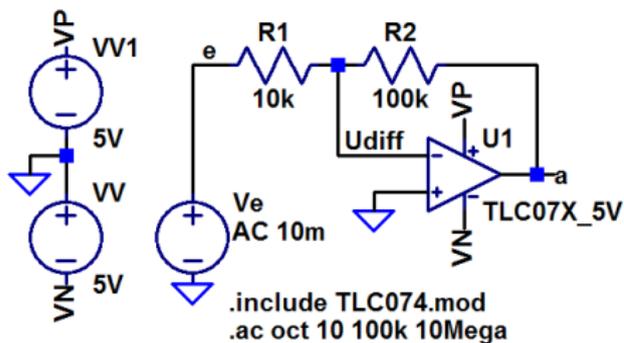
- 2 Errechnen Sie aus den Eingangs- und Ausgangsamplituden und den Verzögerungen und Frequenzen die Verstärkungen und Phasenverschiebungen.

f	300 kHz	1 MHz	3 MHz	10 MHz
Amplitude von u_a				
Verzögerung von u_e nach u_a				
Betrag der Verstärkung				
Phasenverschiebung Verstärkung				



- 3 Kontrollieren Sie das Ergebnis mit einer AC-Simulation.
- 4 Lesen Sie aus dem Ergebnis der AC-Simulation die Grenzfrequenz und die Transitfrequenz des Verstärkers ab.

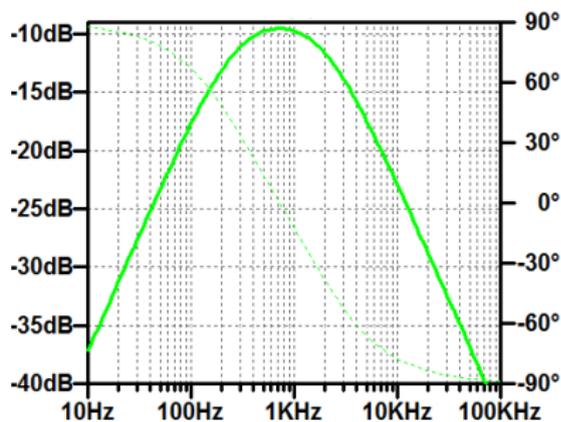
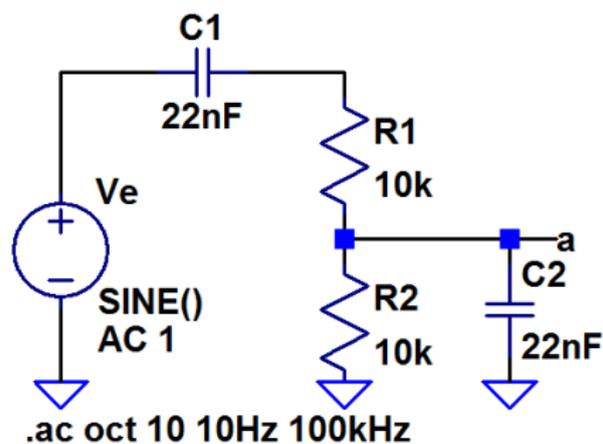
Zur Kontrolle





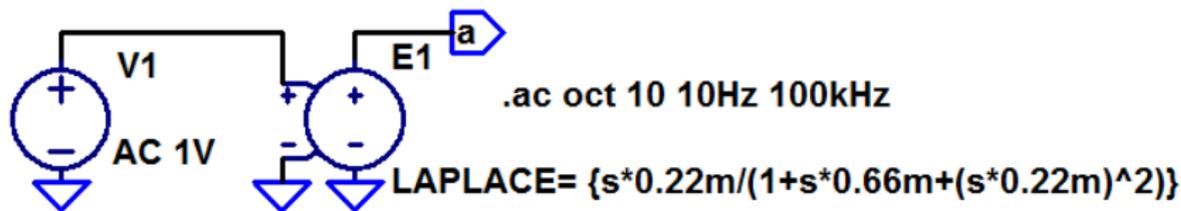
Laplace-Transformierte

Aufgabe 3.7: Wien-Brücke



- 1 Stellen Sie die Gleichung für das Verhältnis aus Ausgangs- und Eingangsspannung als gebrochene Funktion von $j\omega$ auf.
- 2 Ersetzen Sie $j\omega$ durch die komplexe Variable s .

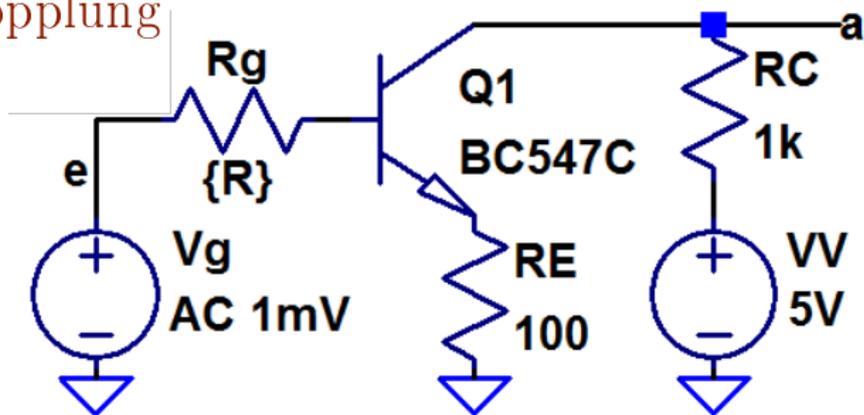
- 3 Kontrollieren Sie, dass Sie die Funktion der Schaltung auch mit einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle mit der Laplace-Transformierten als Übertragungsfunktion simulieren können.





Verstärker

Aufgabe 3.8: NF-Verstärker mit Stromgegenkopplung



- 1 Legen Sie mit einem DC-Sweep den Gleichanteil von V_g fest.
- 2 Bestimmung des Frequenzgangs $V(a)/V(e)$ und der Übergangsfrequenz der Spannungsverstärkung für $R_g = 100 \Omega$ und $1 k\Omega$.
- 3 Bestimmen Sie für die Stromverstärkung $I_c(Q1)/I_b(Q1)$ die Verstärkung für niedrige Frequenzen in dB, die Übergangs- und die Transitfrequenz.



Zur Kontrolle

- 1 DC-Analyse zur Festlegung des Gleichanteils: von V_g .
Simulationskommando:

```
.step param R list 100 1k
.dc Vg 0.4V 1.2V 0.01V
```

Sinnvolle Festlegung des Gleichanteil: 0,85V

- 2 Frequenzgang $V(a)/V(e)$:

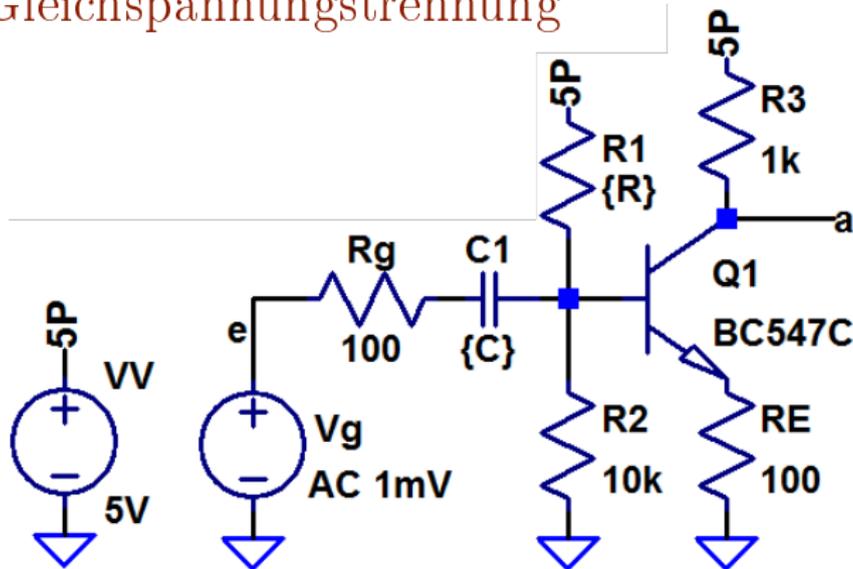
```
.ac oct 10 1E5 1E8
```

	$R_g = 100 \Omega$	$R_g = 1 \text{ k}\Omega$
Überg.-Freq. Spg.-Verst	30 MHz	4 MHz

- 3 Stromverstärkung für niedrige Frequenzen, Übergangs- und Transitfrequenz der Stromverstärkung:

$\beta_0 = 52,9 \text{ dB}$	$f_0 = 106,5 \text{ kHz}$	$f_T = 46,8 \text{ MHz}$
-----------------------------	---------------------------	--------------------------

Aufgabe 3.9: Gleichspannungstrennung



- 1 Suchen Sie mit ».op« und einer Step-Anweisung für R1 einen Wert zur Einstellung des Arbeitspunktes $V(a) \approx 3\text{V}$.
- 2 Legen Sie mit einer Step-Anweisung den Wert von C so fest, dass die untere Übergangsfrequenz $\leq 200\text{Hz}$ beträgt.



- 3 Wie groß ist der Widerstand R

$$f_{u0} = \frac{1}{2\pi RC}$$

der die untere Übergangsfrequenz mit festlegt und aus welchen Widerständen in der Schaltung setzt er sich wie zusammen?

Zur Kontrolle

- 1 R1 für den Arbeitspunkt $V(a) \approx 3\text{ V}$:

Simulationskommando:

```
.step param R 20k 100k 1k
.op
```

Ergebnis: $R_1 \approx 47\text{ k}\Omega$

- 2 C für die untere Übergangsfrequenz $\leq 200\text{ Hz}$:

Simulationskommando:

```
.step param C list 22n 33n 47n 68n 150n 220n
.ac oct 10 1E2 1E6
```

Ergebnis: $C \approx 150\text{ nF}$, 147 Hz (für 100 nF ist $f_{u0} > 100\text{ Hz}$)

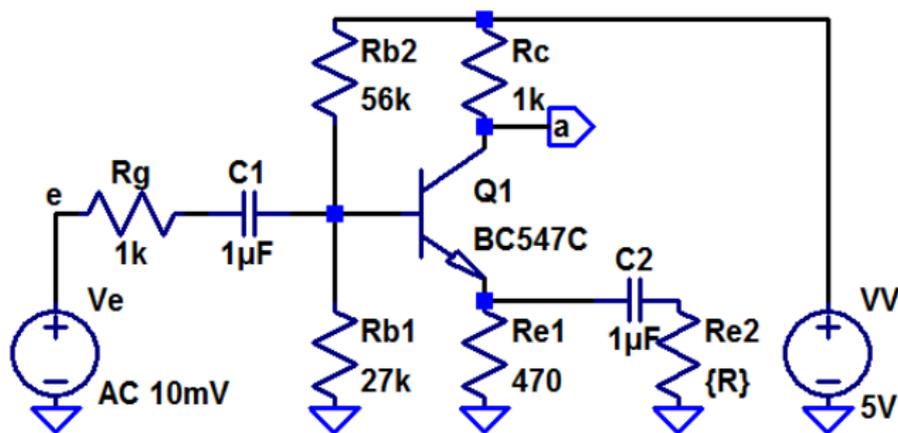
- 3

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 147\text{ Hz} \cdot 150\text{ nF}} = 7218\ \Omega$$

hauptsächlich Eingangswiderstand $R_1 \parallel R_2 \parallel \beta \cdot R_E$

Aufgabe 3.10: Frequenzabhängige Stromgegenkopplung

In der nachfolgenden Schaltung wird der Gegenkopplungswiderstand für Wechselgrößen mit C_2 und R_{E2} verringert.



- 1 Kontrollieren Sie, dass U_a im Arbeitspunkt $3\text{ V} \pm 10\%$ beträgt und korrigieren Sie bei Bedarf den Wert von R_{B2} .



- 2 Bestimmen Sie den Frequenzgang für $R_{E2} = 10 \Omega$, 20Ω und 100Ω .
- 3 Lesen Sie für alle 3 Widerstandswerte
 - die untere Grenzfrequenz,
 - die Verstärkung im mittleren Bereich,
 - die obere Grenzfrequenz und
 - die obere Transistfrequenzab.
- 4 Gilt auch hier »Verstärkung mal Bandbreite gleich Transistfrequenz?



Filter



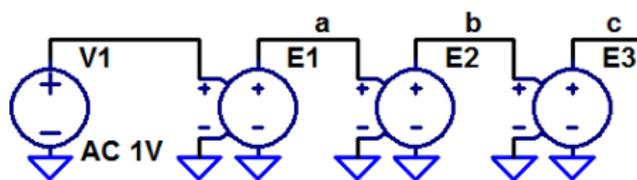
Aufgabe 3.11: Tschebyscheff-Tiefpass

Ein Tschebyscheff-Tiefpass 6 Ordnung mit 1 dB Restwelligkeit hat nach² die Filterkoeffizienten $a_1 = 3,8437$, $b_1 = 8,5529$, $a_2 = 0,6092$, $b_2 = 1,9124$, $a_3 = 0,1296$, $b_3 = 1,0766$.

- 1 Stellen Sie die Laplace-Transformierte für einen Filter mit der Übergangsfrequenz 10 kHz auf und simulieren Sie den Filter mit einer E-Quelle.
- 2 Entwerfen Sie eine funktionsgleiche Filterschaltung mit drei RLC-Gliedern und zwei Trennverstärkern.
- 3 Entwerfen Sie eine funktionsgleiche Filterschaltung mit 3 beschalteten Operationsverstärkern.
- 4 Monte-Carlo-Simulation mit 1% Bauteilparameterstreuung.

²http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/physikalischeelektronik/phys_elektr/phys_elektrap6.html

Simulation als Kette von Filtern 2. Ordnung

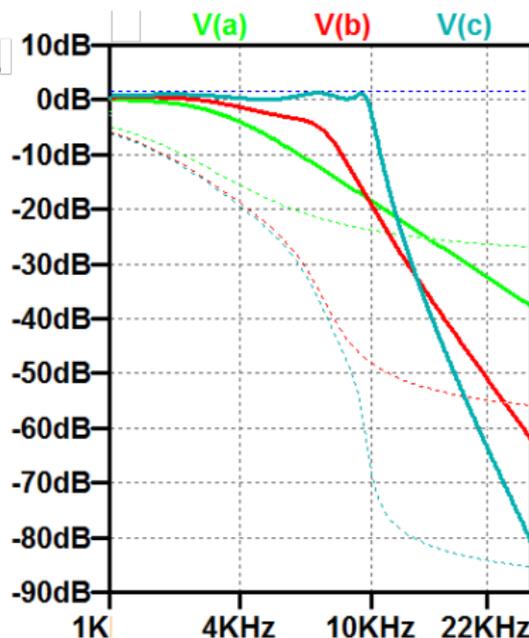


$$\text{Laplace} = 1/(1+\{a1\} * s + \{b1\} * (s^2))$$

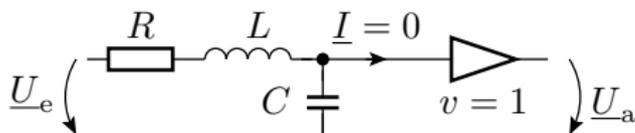
$$\text{Laplace} = 1/(1+\{a3\} * s + \{b3\} * (s^2))$$

$$\text{Laplace} = 1/(1+\{a2\} * s + \{b2\} * (s^2))$$

```
.param om0 2*pi*10kHz
.param a1 = 3.8437/{om0}
.param b1 = 8.5529/{om0}/{om0}
.param a2 = 0.6092/{om0}
.param b2 = 1.9124/{om0}/{om0}
.param a3 = 0.1296/{om0}
.param b3 = 1.0766/{om0}/{om0}
.ac oct 50 1kHz 30kHz
```



Filterschaltung mit drei RLC-Gliedern



$$\frac{1}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} = \frac{1}{1 + a_i \cdot \frac{j\omega}{2\pi f_0} + b_i \cdot \left(\frac{j\omega}{2\pi f_0}\right)^2}$$

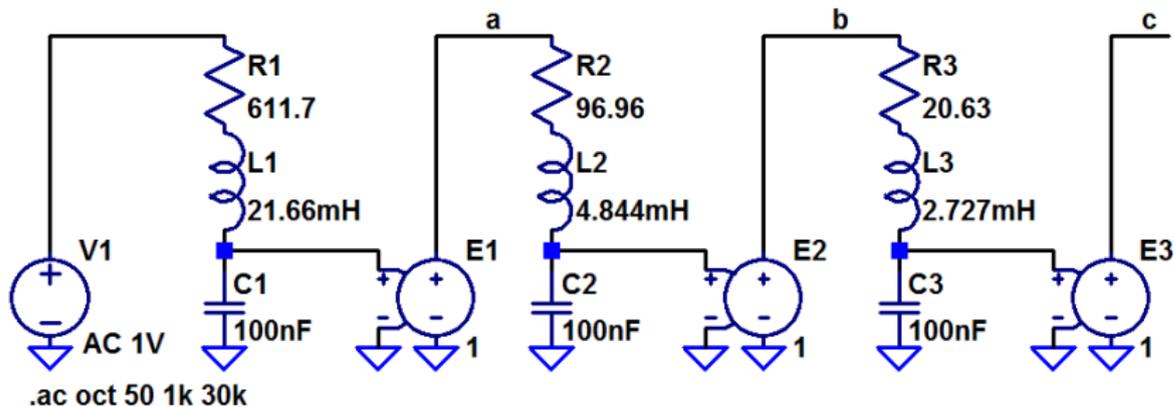
$$R = \frac{a_i}{2\pi f_0 \cdot C}; \quad L = \frac{b_i}{C \cdot (2\pi f_0)^2}$$

Für $f_0 = 10 \text{ kHz}$, $C = 100 \text{ nF}$:

	a_i	b_i	C_i	R_i	L_i
Stufe 1	3,8437	8,5529	100 nF	611,7 Ω	21,66 mH
Stufe 2	0,6092	1,9124	100 nF	96,96 Ω	4,844 mH
Stufe 3	0,1296	1,0766	100 nF	20,63 Ω	2,727 mH

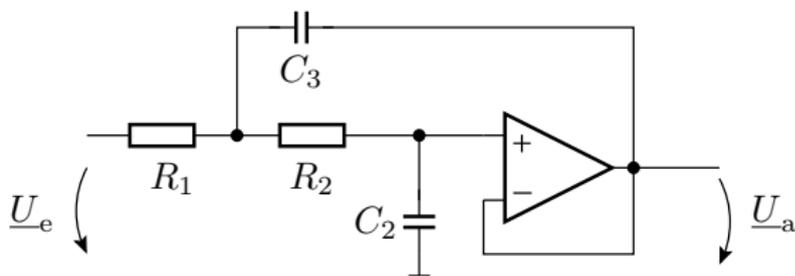


	a_i	b_i	C_i	R_i	L_i
Stufe 1	3,8437	8,5529	100 nF	611,7 Ω	21,66 mH
Stufe 2	0,6092	1,9124	100 nF	96,96 Ω	4,844 mH
Stufe 3	0,1296	1,0766	100 nF	20,63 Ω	2,727 mH



- Frequenzgang identisch mit Simulation der Laplace-Transformierten.

Filterschaltung mit drei Op-Amp



$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot C_2 \cdot (R_1 + R_2) - \omega^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot C_3} = \frac{1}{1 + a_i \cdot s_n + b_i \cdot s_n^2}$$

$$C_2 \cdot (R_1 + R_2) = \frac{a_i}{2\pi f_0}; \quad R_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot C_3 = \frac{b_i}{(2\pi f_0)^2}$$

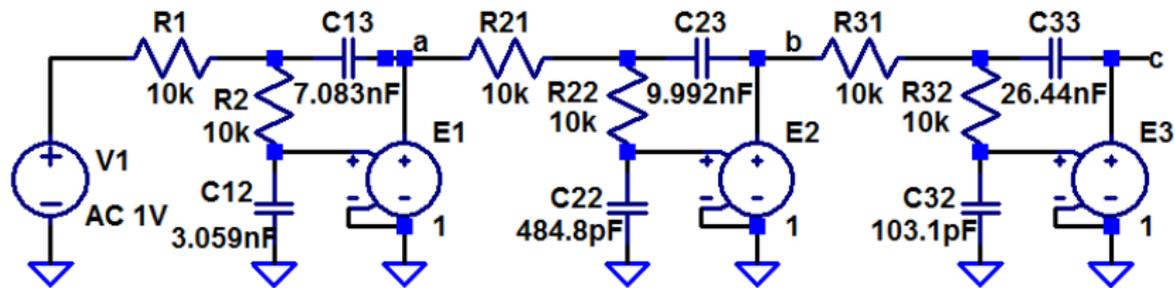
Vorgabe: $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$



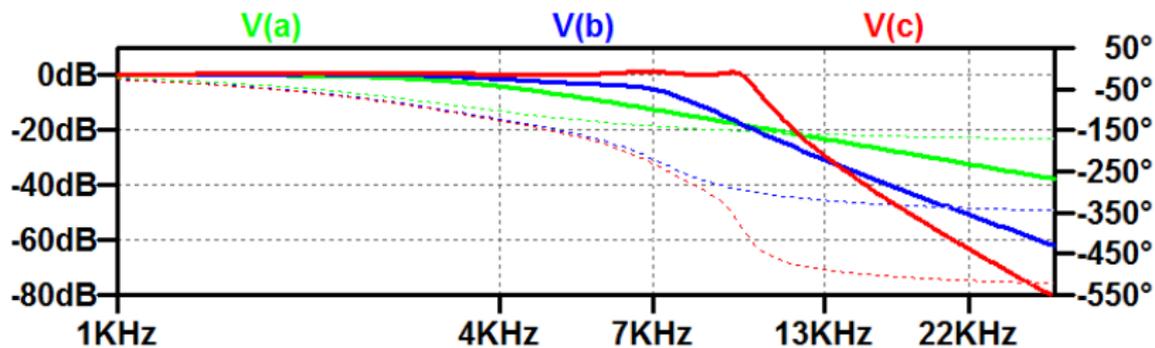
Berechnung der Parameter

```
a = [3.8437 0.6092 0.1296];  
b = [8.5529 1.9124 1.0766];  
R1=1E4; R2=1E4; f0=1E4;  
for i=1:3  
    C2(i) = a(i)/((R1+R2)*2*pi*f0);  
    C3(i) = b(i)/(R1*R2*C2(i)*(2*pi*f0)^2);  
end
```

	a_i	b_i	$R_1 = R_2$	$C_{2,i}$	$C_{3,i}$
Stufe 1	3,8437	8,5529	10 k	3,059 nF	7,083 pF
Stufe 2	0,6092	1,9124	10 k	484,8 pF	9,992 nF
Stufe 3	0,1296	1,0766	10 k	103,1 pF	26,44 nF

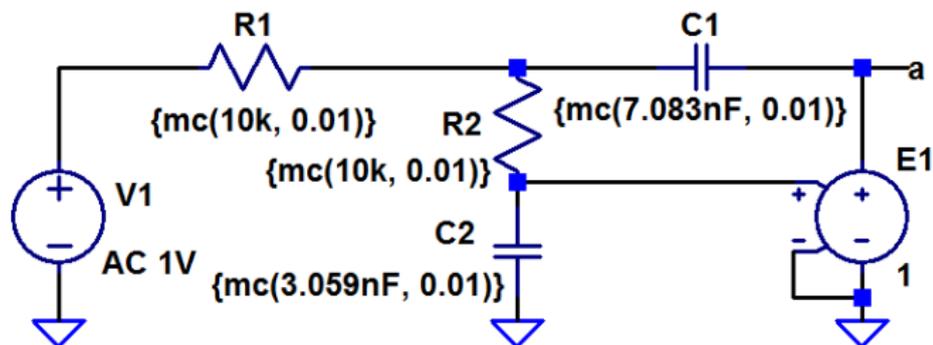


.ac oct 50 1kHz 30kHz

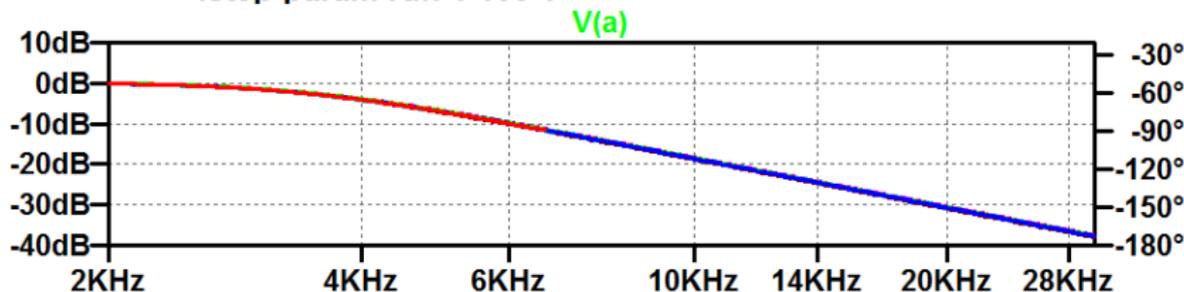




Simulation mit 1% Bauteiltoleranzen



```
.ac oct 50 1kHz 30kHz  
.step param run 1 100 1
```





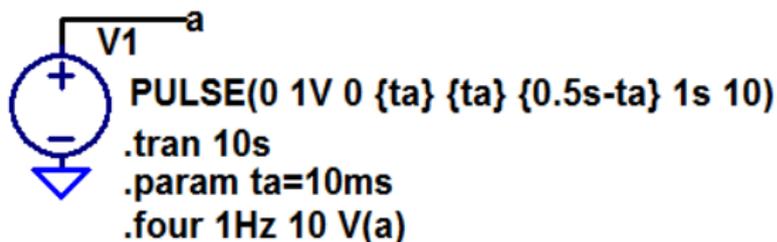
Spektralanalyse



Fouriertransformation

Aufgabe 3.12: Flankensteilheit und Spektrum

Gegeben ist eine Spannungsquelle für symmetrische Pulse (Einschaltzeit gleich Ausschaltzeit), einer Periode von 1 s, Ein- und Ausschaltzeit t_a und einer Amplitude von 1 V.



- 1 Bestimmen Sie die Amplituden der Spektralwerte für 1, 2, ..., 10 Hz für $t_a=10$ ms und von 0,2 s.
- 2 Wie wirkt sich eine kurze Anstiegs- und Abstiegszeit auf die Amplituden der Spektralwerte der höheren Frequenzen aus?



Zur Kontrolle

1

Frequenz	Ampl. für $t_a = 10$ ms	Ampl. für $t_a = 200$ ms
1 Hz	637 mV	596 mV
2 Hz	0	0
3 Hz	212 mV	107 mV
4 Hz	0	0
5 Hz	127 mV	0
6 Hz	0	0
7 Hz	90 mV	20 mV
8 Hz	0	0
9 Hz	70 mV	7 mV
10 Hz	0	0

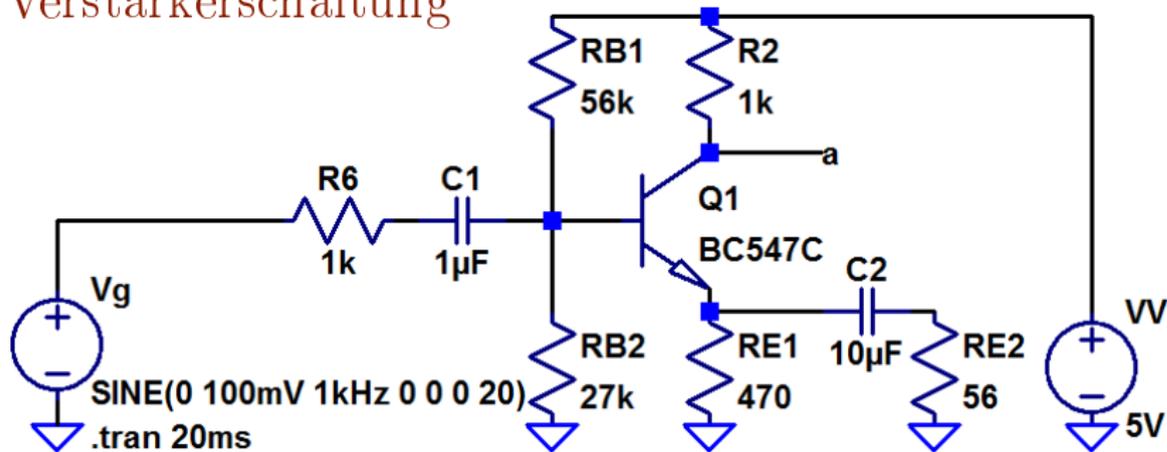
2

Kurze Ein- und Ausschaltzeiten (steile Flanken) erhöhen die Amplituden der hochfrequenten Spektralanteile.



Klirrfaktor

Aufgabe 3.13: Zu untersuchende Verstärkerschaltung



- 1 Untersuchen Sie mit einer AC-Simulation mit einem 1kHz-Sinuseingabesignal, bis zu welcher Amplitude des Eingangesignals am Ausgang ein sinusförmiges Signal ausgegeben wird.
- 2 Bestimmen Sie für 20%, 50%, 80% und 120% der in Aufgabenteil a bestimmten Amplitude den Klirrfaktor.



Zur Kontrolle

1 Max. Eingabeamplitude ohne erkennbare Verzerrung ca. 150 mV.

2 Klirrfaktoren:

Amplitude:	30 mV	75 mV	120 mV	180 mV
Klirrfaktor:	0,7%	2,9%	5,6%	11,2%



AC-Untersuchungen

- Bestimmen Sie den Frequenzgang für $R_{E2} = 10 \Omega$.
- Passen Sie die Kapazitäten C_1 und C_2 so an, dass die untere Grenzfrequenz (Verstärkungsabfall 3 dB) 20 Hz beträgt.
- Wie groß ist die obere Grenzfrequenz mit $R_{E2} = 10 \Omega$?
- Bestimmen Sie die Verstärkung in Abhängigkeit von R_{E2} .

Verstärkungen lassen sich gut mit der Analyseart »noise« bestimmen. Erforderliche Measure- und Step-Anweisung:

```
.noise V(a) Ve oct 10 20Hz 20kHz  
.meas noise vmax max gain  
.step param R 10 200 10
```

Erzeugung von Graphiken aus Tabelleinträgen im Err-Log: Err-Log öffnen, rechte Maustaste, »plot step'ed .meas data«, rechte Maustaste, »add trace«.



Rauschen



Rauschquellen



Aufgabe 3.14: Wärmerauschen an Widerständen

Bestimmen Sie für einen Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ und $T = 300\text{ K}$

- 1 die Rauschspannungsdichte,
- 2 die Rauschstromdicht,
- 3 die Rauschleistungsdichte,

und im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz

- 4 die effektive Rauschspannung,
- 5 den effektiven Rauschstrom und
- 6 die mittlere Rauschleistung.

Um welchen Faktor erhöht sich die effektive Rauschspannung

- 4 bei Verdopplung der Obergrenze des Frequenzbereichs auf 40 kHz ,
- 5 bei Halbierung der Untergrenze des Frequenzbereichs auf 10 Hz .



Zur Kontrolle

1 Rauschspannungsdichte:

$$\begin{aligned} |u_{r.R}(f)| &= \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{W_S}{K} \cdot 300 K \cdot 10 k\Omega} \\ &= 1,3 \cdot 10^{-8} \frac{V}{\sqrt{Hz}} \end{aligned}$$

2 Rauschstromdicht:

$$|i_{r.R}(f)| = \frac{|u_{r.R}(f)|}{R} = 1,3 \cdot 10^{-12} \frac{A}{\sqrt{Hz}}$$

3 Rauschleistungsdichte:

$$|u_{r.R}(f)| \cdot |i_{r.R}(f)| = 1,66 \cdot 10^{-20} \frac{W}{Hz}$$



Im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz:

- 4 Effektive Rauschspannung:

$$U_{\text{Reff}} = |\underline{u}_{r.R}(f)| \cdot \sqrt{20 \text{ kHz} - 20 \text{ Hz}} = 1,8 \mu\text{V}$$

- 5 Effektiver Rauschstrom:

$$I_{\text{Reff}} = \frac{U_{\text{Reff}}}{R} = 180 \text{ pA}$$

- 6 Mittlere Rauschleistung:

$$U_{\text{Reff}} \cdot I_{\text{Reff}} = 3,3 \cdot 10^{-16} \text{ W}$$

Um welchen Faktor erhöht sich die Rauschleistung

- 7 bei Verdopplung der Obergrenze des Frequenzbereichs auf 40 kHz: ca. Verdopplung der Rauschleistung
- 8 bei Halbierung der Untergrenze des Frequenzbereichs auf 10 Hz: vernachlässigbare Erhöhung der Rauschleistung.



Aufgabe 3.15: Stromrauschen an pn-Übergängen

Wie groß sind die Rauschstromdichte und der effektive Rauschstrom an einem pn-Übergang bei einem Durchlassstrom von 100 mA im Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz

- 1 nur Strom- ohne 1/f-Rauschen,
- 2 zusätzlich durch eine 1/f-Rauschen mit den Parametern $A_F = 1,3$, $k_F = 10^{-9} \text{ A}^{0,7} \text{ Hz}$.
- 3 Was verringert den Rauschstrom mehr, eine Halbierung der Obergrenze oder eine Verdopplung der Untergrenze des Frequenzbereichs?

Zur Kontrolle

- 1 Stromrauschen ohne $1/f$ -Rauschen:

$$|\dot{i}_{r.sd}(f)| = \sqrt{2 \cdot q \cdot I} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I} = 180 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$I_{\text{Reffr.sd}} = |\dot{i}_{r.sd}(f)| \cdot \sqrt{1 \text{ MHz} - 0,1 \text{ Hz}} = 180 \text{ nA}$$

- 2 $1/f$ -Rauschen mit $A_F = 1,3$, $k_F = 10^{-9} \text{ A}^{0,7}$:

$$|\dot{i}_{rr.fd}(f)| = \sqrt{\frac{k_F \cdot I^{A_F}}{f}} = \sqrt{\frac{10^{-9} \cdot 0,1^{1,3} \cdot \text{A}^2}{f}} = \frac{7,08 \mu\text{A}}{\sqrt{f}}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{Reff.fd}} &= \sqrt{\int_{f_u}^{f_o} \frac{k_F \cdot I^{A_F}}{f} \cdot df} = \sqrt{k_F \cdot I_D^{A_F} \cdot \ln\left(\frac{f_o}{f_u}\right)} \\ &= \sqrt{10^{-9} \cdot 0,1^{1,3} \cdot \text{A}^2 \cdot \ln(10^7)} = 26 \mu\text{A} \end{aligned}$$

- 3 Das Stromrauschen verringert sich bei Halbierung der Obergrenze auf deutlich und bei Verdopplung der Untergrenze kaum. Beim $1/f$ Rauschen ist die Änderung in beiden Fällen dieselbe.



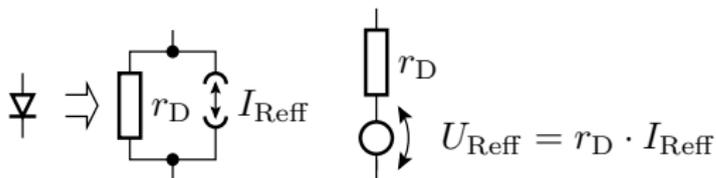
Aufgabe 3.16: Ersatzrauschquellen pn-Übergang

Ein pn-Übergang soll in der Kleinsignal-AC-Ersatzschaltung durch eine Reihenschaltung aus Ersatzwiderstand und Ersatzrauschspannungsquelle nachgebildet werden:

- 1 Hat der Ersatzwiderstand ein Wärmerauschen?
- 2 Wie berechnet sich die effektive Rauschspannung der Ersatzquelle?

Zur Kontrolle

- 1 Der pn-Übergang selbst und damit sein Ersatzwiderstand haben nur ein Stromrauschen, aber die Bahn- und Leitungswiderstände, über die der pn-Übergang angeschlossen ist, haben ein Wärmerauschen.
- 2 Transformation des Strom- in ein äquivalentes Spannungsauschen:

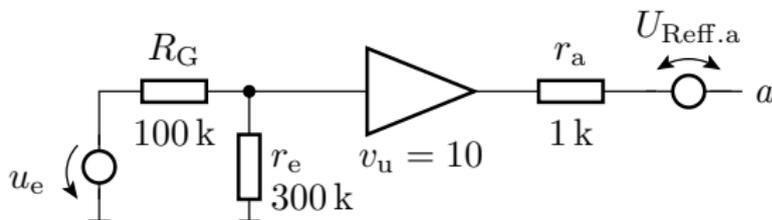




Rauschquellentransformation

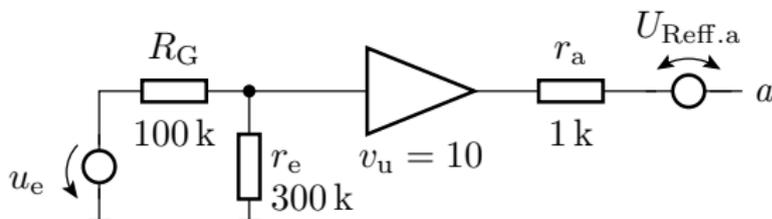
Aufgabe 3.17: Transformation des Rauschens des Generatorwiderstand auf das Ausgangsrauschen

In der nachfolgenden Schaltung ist der Verstärker durch seinen Eingangswiderstand, eine spannungsgesteuerte Quelle mit Verstärkung 10 und seinen Ausgangswiderstand dargestellt:



- 1 Wie groß ist das Wärmerauschen des Generatorwiderstands R_g bei 300 K im Frequenzbereich 100 Hz bis 1 MHz?
- 2 Wie groß ist das äquivalente durch den Generatorwiderstand verursachte Rauschen am Schaltungsausgang $U_{\text{Reff.a.Rg}}$?

Zur Kontrolle



- 1 Wärmerauschen des Generatorwiderstands R_g bei 300 K im Frequenzbereich 100 Hz bis 1 MHz?

$$\begin{aligned}
 U_{\text{Reff.Rg}} &= \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot (f_o - f_u)} \\
 &= \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}} \cdot 300 \text{ K} \cdot 100 \text{ k}\Omega \cdot (1 \text{ MHz} - 100 \text{ Hz})} \\
 &= 40,7 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

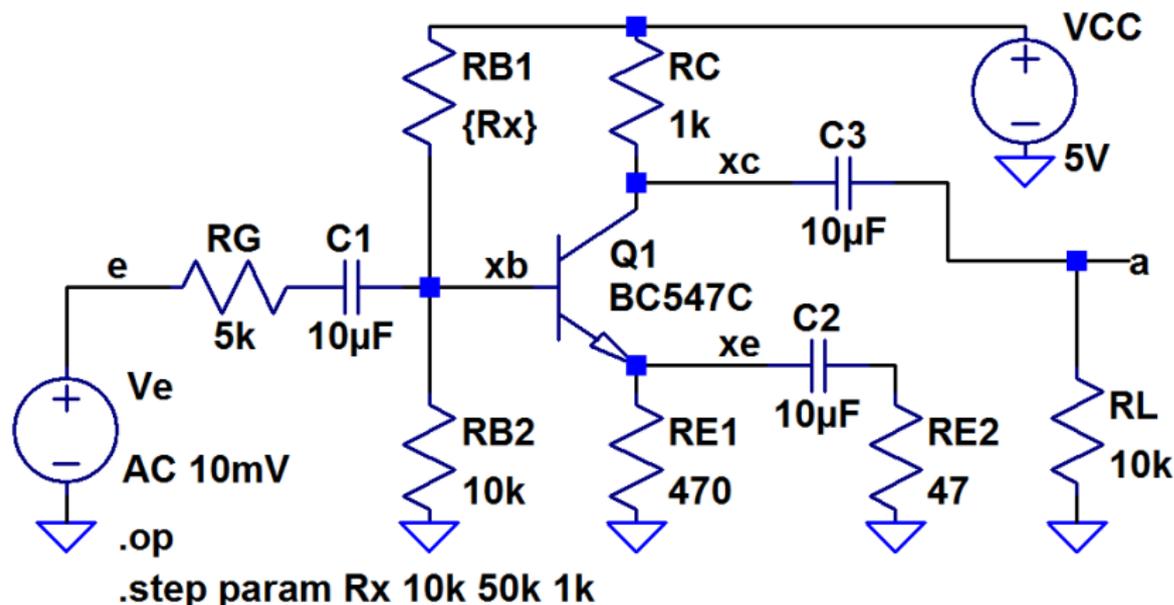
- 1 Äquivalentes Rauschen am Ausgang:

$$U_{\text{Reff.a.Rg}} = U_{\text{Reff.Rg}} \cdot \frac{r_e}{R_G + r_e} \cdot v_u = 305 \mu\text{V}$$



Rauschanalyse

Aufgabe 3.18: Komplexaufgabe Verstärker

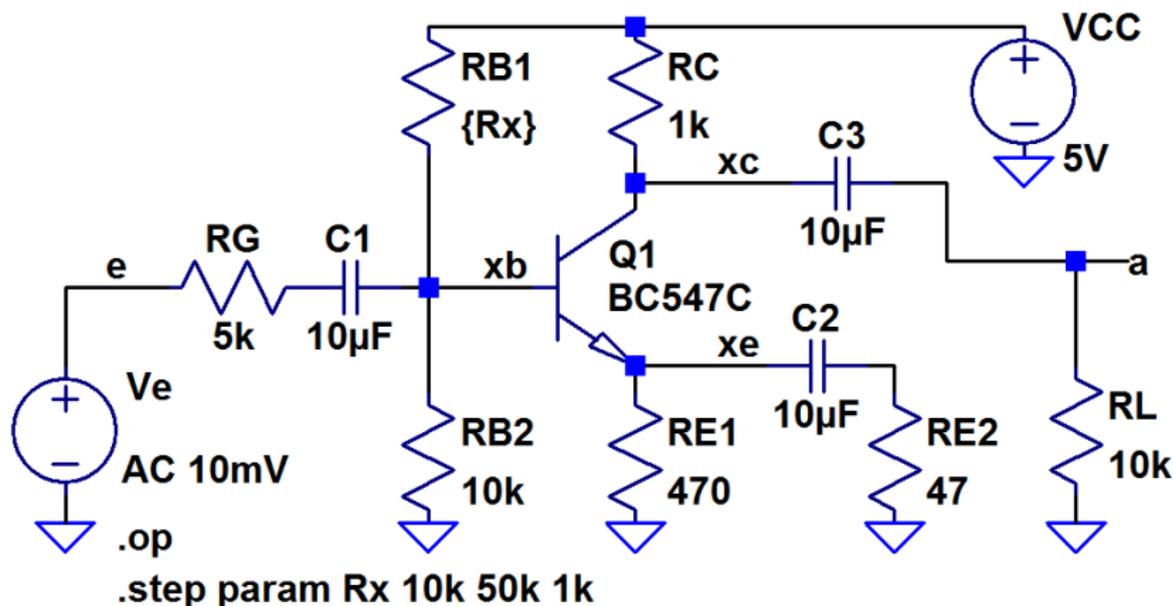


Arbeitspunkt, Kleinsignalersatzschaltung, Aussteuerungsbereich,
 Klirrfaktor, Rauschanalyse



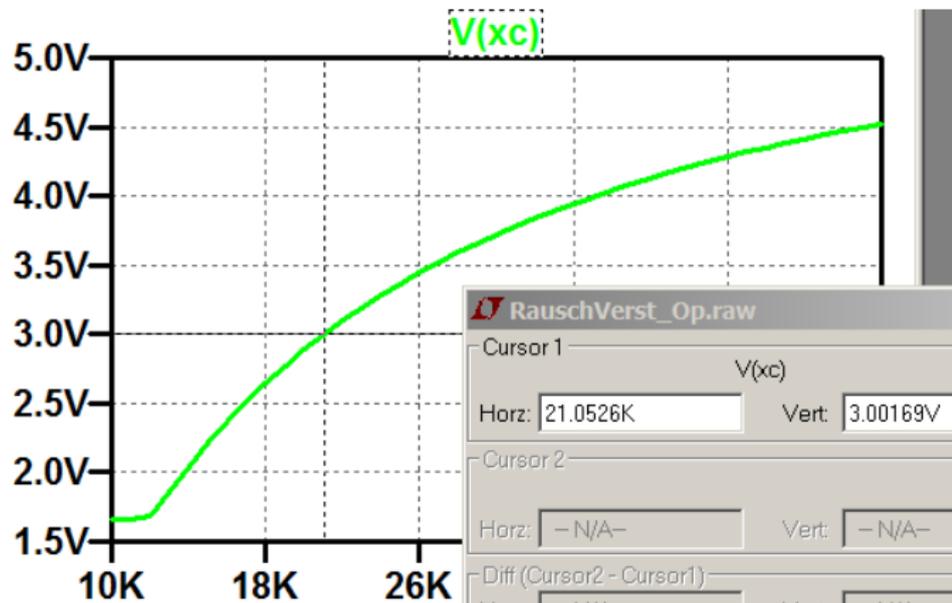
Arbeitspunkteinstellung über R_{B2}

- 1 Bestimmen Sie für R_{B2} einen Wert, bei dem U_{xc} im Bereich $3V \pm 5\%$ liegt.



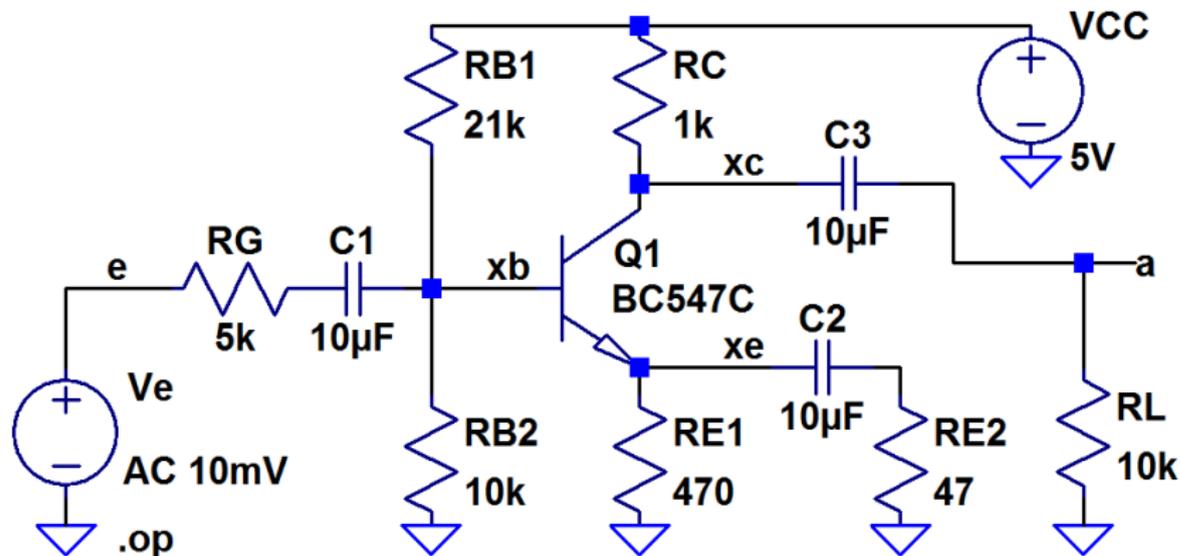


Zur Kontrolle



Stationäre Spannungen über C_1 und C_2

- 2 Bestimmen Sie dem gefundenen Wert für »Rb2« und »op« die Spannungsabfälle über C_1 und C_2 , um diese für die .tf-Simulation durch Gleichspannungsquellen zu ersetzen.





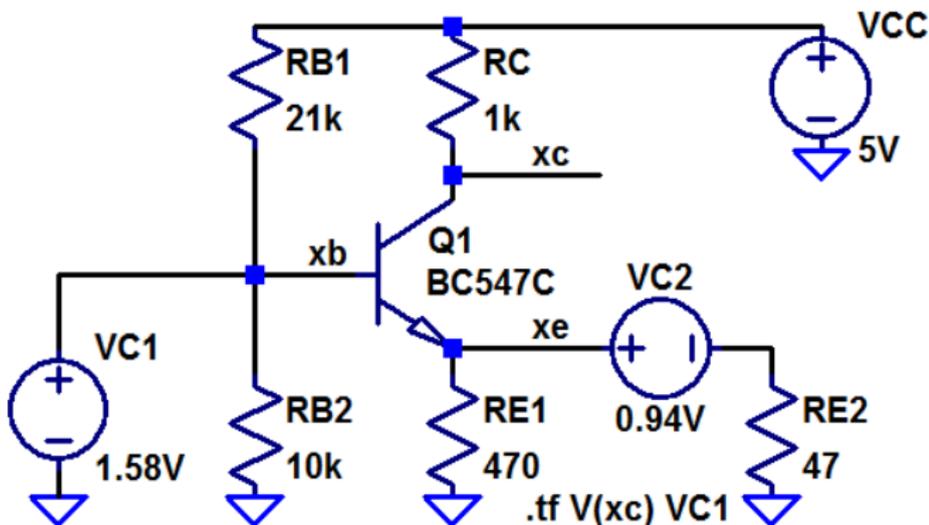
Zur Kontrolle

V(xc) :	2.99636	voltage
V(xb) :	1.58351	voltage
V(xe) :	0.943751	voltage



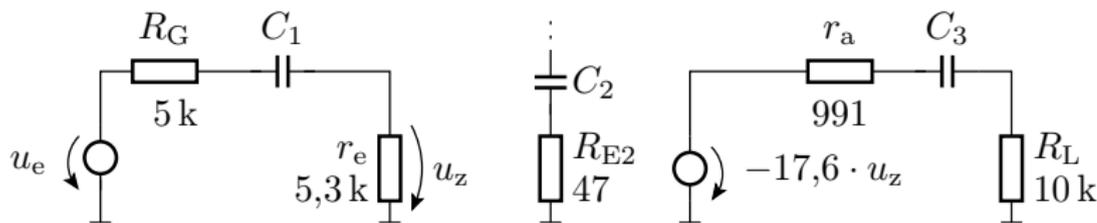
Kleinsignalersatzschaltung

- 3 Ersetzen Sie C_1 und C_2 durch Gleichspannungsquellen, lassen Sie Generator- und Lastwiderstand weg und bestimmen Sie mit ».tf« den Eingangswiderstand, die Verstärkung und den Ausgangswiderstand.



Zur Kontrolle

Transfer_function:	-17.593	transfer
vc1#Input_impedance:	5327.45	impedance
output_impedance at V(xc):	991.296	impedance



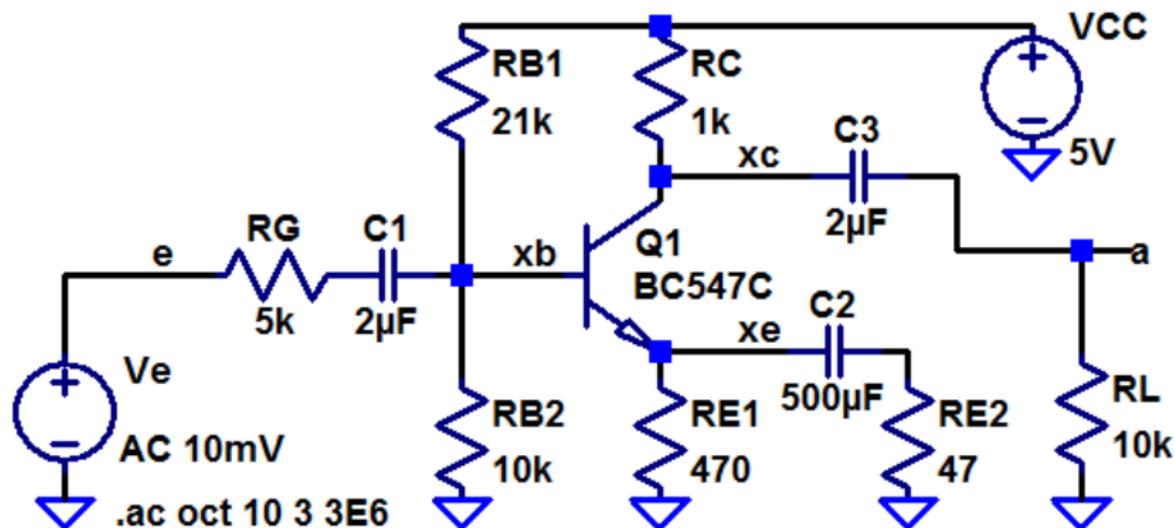
- 4 Legen Sie die Kapazitätswerte für C_1 bis C_3 so fest, gilt dass:

$$C_i \geq \frac{1}{2\pi \cdot 100\text{ Hz} \cdot R_i}$$

$$C_1 = C_3 = 2\ \mu\text{F}, C_2 = 500\ \mu\text{F}$$

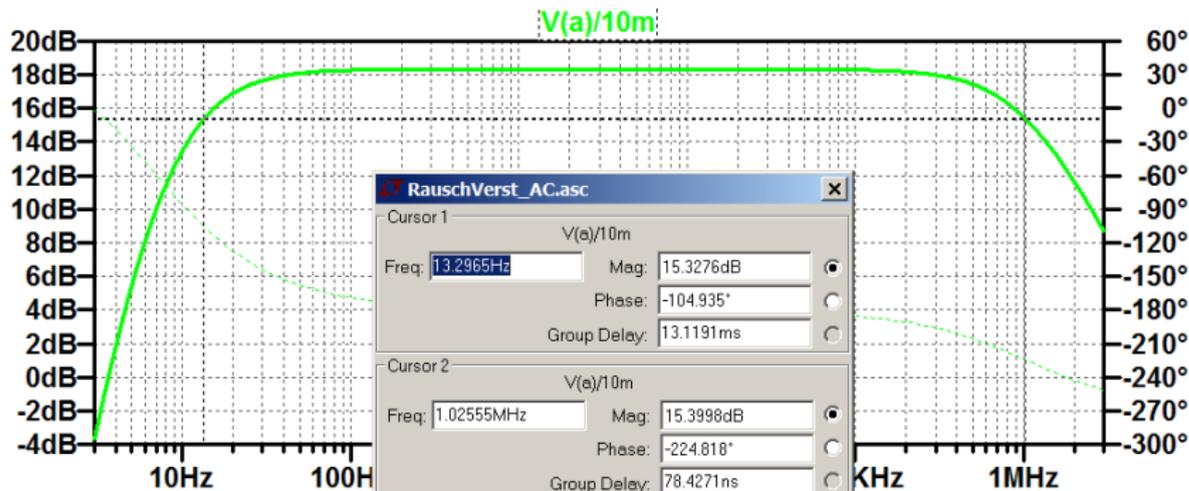
Untersuchung des Frequenzgangs

- Bestimmen Sie mit den auf der Folie zuvor abgeschätzten Kapazitätswerten den Frequenzgang im Bereich von 3 Hz bis 3 MHz.
- Lesen Sie die untere und obere Grenzfrequenz ab.





Zur Kontrolle

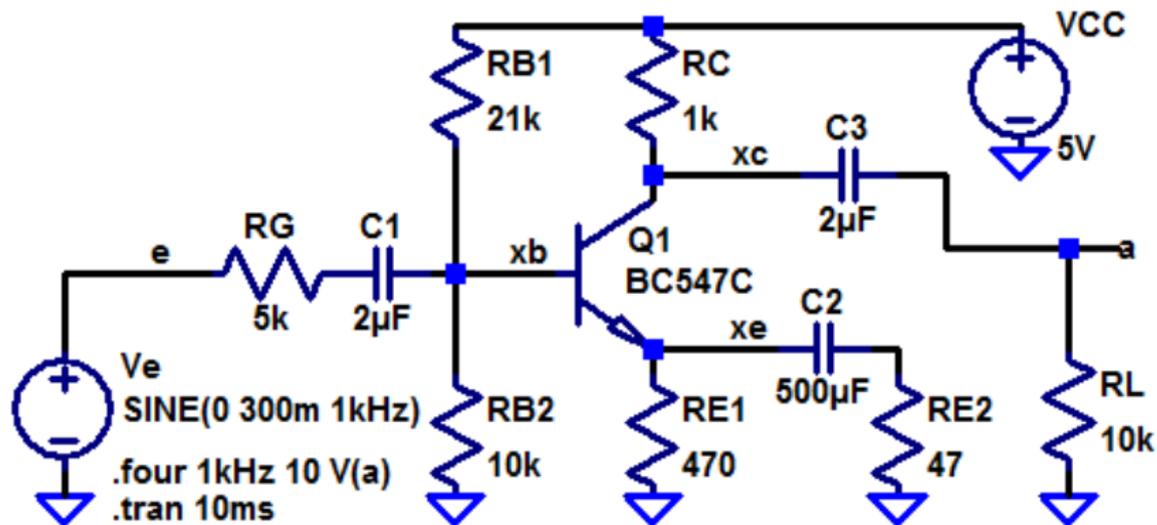


Untere Grenzfrequenz: ≈ 13 Hz,

Obere Grenzfrequenz: ≈ 1 MHz

Klirrfaktor

- 7 Bestimmen Sie den Klirrfaktor für eine Eingangsamplitude von 100 mV, 200 mV und 300 mV.
- 8 Ist für die obere oder die untere Halbwelle der maximale Aussteuerungsbereich kleiner?



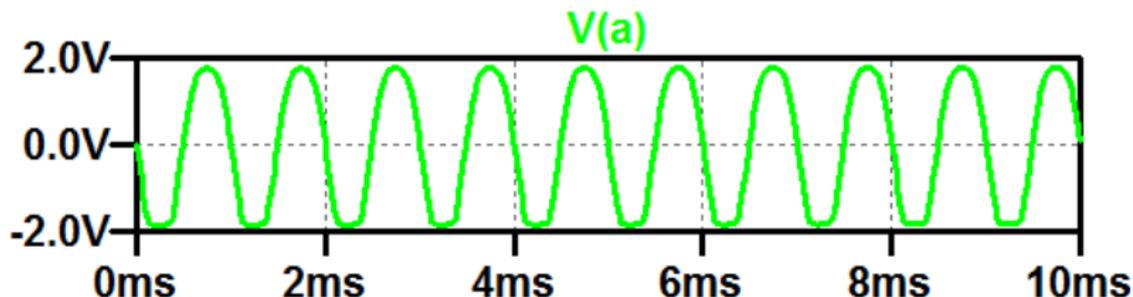


Zur Kontrolle

7 Klirrfaktoren:

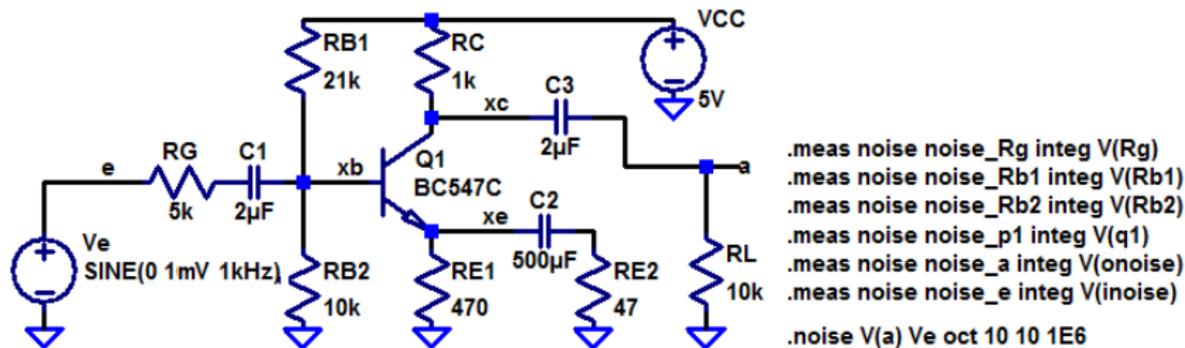
Eingabeamplitude	100 mV	200 mV	300 mV
Klirrfaktor	2,38%	5,83%	11,3%

8 Für die untere Halbwelle ist der maximale Aussteuerungsbereich kleiner:



Rauschen

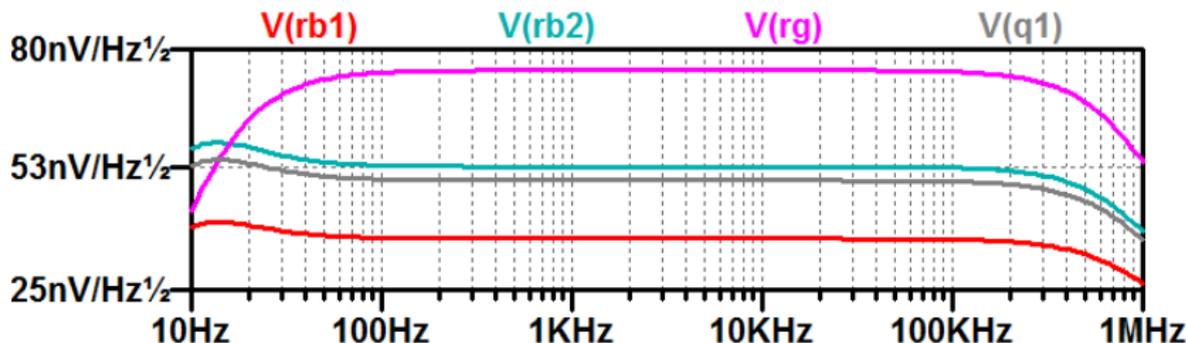
- 9 Bestimmen Sie das äquivalente Ausgangsrauschen insgesamt und einzeln für den Generatorwiderstand, die Widerstände des Basisspannungsteilers und den Transistor sowie das äquivalente Eingangsrauschen.
- 10 Bestimmen Sie den Signal-Rausch-Abstand für ein 1 mV Sinussignal am Eingang.
- 11 Bestimmen Sie die Rauschzahl des Verstärkers.



Zur Kontrolle

```

noise_rg: INTEG(v(rg))=6.7135e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise_rb1: INTEG(v(rb1))=3.27589e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise_rb2: INTEG(v(rb2))=4.74722e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise_p1: INTEG(v(q1))=4.4733e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise_a: INTEG(v(onoise))=9.98175e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise e: INTEG(v(inoise))=1.3537e-005 FROM 10 TO 1e+006
    
```



$$\text{10 } SNR = \left(\frac{1 \text{ mV}}{\sqrt{2} \cdot 13 \mu\text{V}} \right)^2 \approx 2960$$

$$\text{11 } F = (99,8 \mu\text{V} / 76 \mu\text{V})^2 = 2,18$$



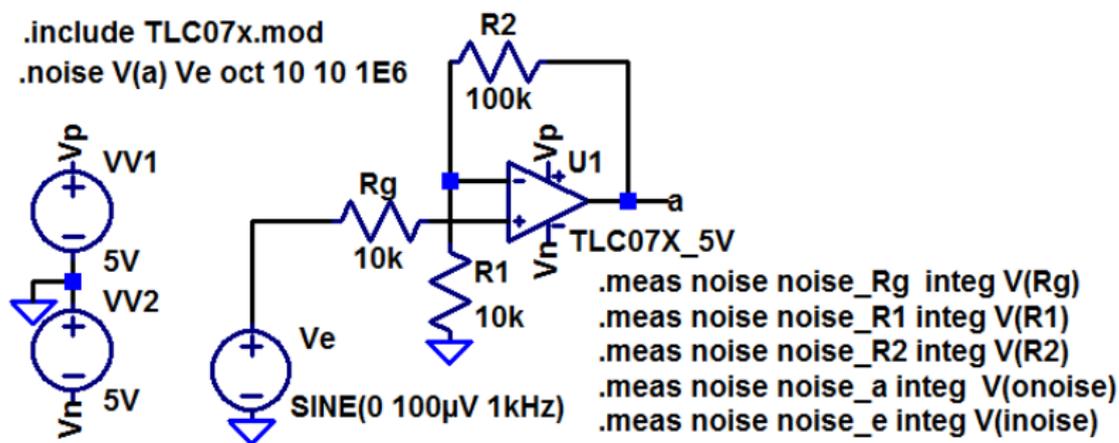
Rausch-Analyse

- 1 Wie groß ist die effektive Rauschspannung am Ausgang im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz?
- 2 Welche Ausgangsrauschspannungsanteile verursachen die Widerstände R_g , R_{B1} , R_{B2} und der Transistor?
- 3 Wie groß muss der Effektivwert der Eingangsspannung mindestens sein, damit der Signalrauschabstand ≥ 10 beträgt?
- 4 Bestimmen Sie die Rauschzahl des Verstärkers in Abhängigkeit von R_{E2} .

Erforderliche Simulationskommandos und Measure-Anweisungen:

```
.noise V(a) Ve oct 10 20Hz 20kHz  
.meas noise vmax max gain  
.step param R 10 200 10
```

Aufgabe 3.19: Rauschen eines OpAmp-Verstärkers

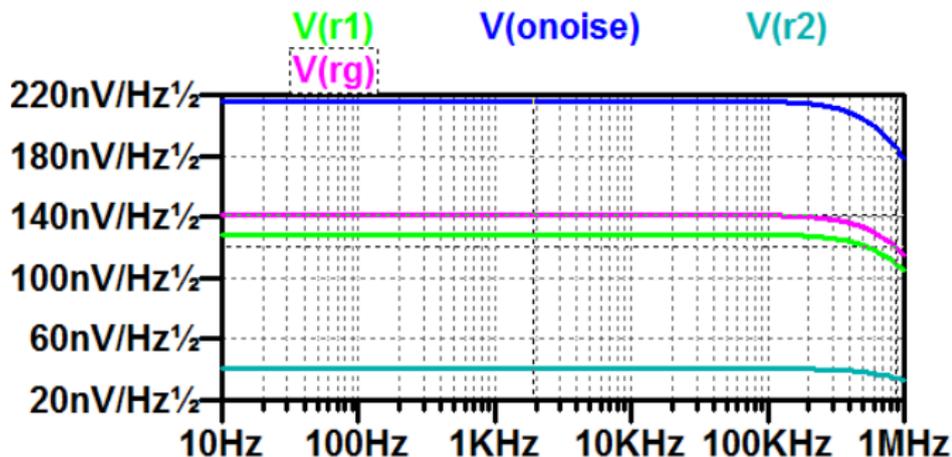


Bestimmen Sie die Rauschdichten und die effektive Rauschspannungen im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 MHz für

- 1 das Ausgangsrauschen insgesamt und deren Anteile für die drei Widerstände.
- 2 den Anteil für den Operationsverstärker.



Zur Kontrolle



```
noise_rg: INTEG(v(rg))=0.000131781 FROM 10 TO 1e+006
noise_r1: INTEG(v(r1))=0.00012001 FROM 10 TO 1e+006
noise_r2: INTEG(v(r2))=3.79503e-005 FROM 10 TO 1e+006
noise_a: INTEG(v(onoise))=0.000202219 FROM 10 TO 1e+006
noise_e: INTEG(v(inoise))=1.97657e-005 FROM 10 TO 1e+006
```



Anteil des Ausgangsrauschen durch den Operationsverstärker:

$$\begin{aligned} R_{\text{Reff.a.OV}} &= \sqrt{R_{\text{Reff.a}}^2 - R_{\text{Reff.a.Rg}}^2 - R_{\text{Reff.a.R1}}^2 - R_{\text{Reff.a.R2}}^2} \\ &= \sqrt{(202 \mu\text{V})^2 - (131 \mu\text{V})^2 - (120 \mu\text{V})^2 - (38 \mu\text{V})^2} = 88 \mu\text{V} \end{aligned}$$

Fortsetzung der Aufgabenstellung:

- 3 Wie groß ist das äquivalente Eingangsrauschen?
 - 4 Wie groß ist den Signal-Rausch-Abstand (Eingabe: Sinus mit 100 μV Amplitude).
-

Zur Kontrolle:

- 3 Äquivalente Eingangsrauschen: 19,8 μV
- 4 Signal-Rausch-Abstand:

$$SNR = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{100 \mu\text{V}}{19,8 \mu\text{V}} \right)^2 = 12,75$$