

Elektronik II Grosse Übung zu Foliensatz E2_F2

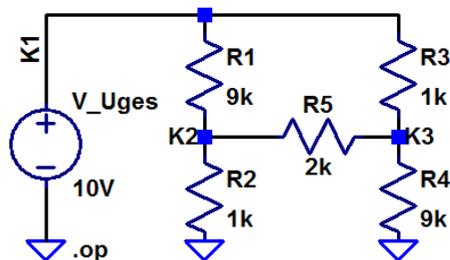
G. Kemnitz

27. April 2020

2 Arbeitspunkt

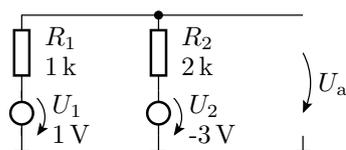
2.1 Brückenschaltung

Aufgabe 2.1: Untersuchung Widerstandsnetzwerk



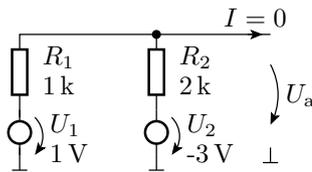
1. Geben Sie die Schaltung in LTspice ein.
2. Exportieren und kontrollieren Sie die Netzliste.
3. Bestimmen Sie mit der Simulationsart `.op` alle Ströme und Spannungen in der Brückenschaltung aus der Vorlesung.
4. Berechnen Sie daraus den Widerstand zwischen dem Knoten K1 und Masse.

Aufgabe 2.2: Ersatzzweipol



1. Bestimmen Sie für die Schaltung die Ersatzspannung und den Ersatzwiderstand des funktionsgleichen Zweipols aus nur einer Spannungsquelle und einem Widerstand.
2. Bestimmen Sie mit der Analyseart `.op` und `.step` für beide Schaltungen $I_a = f(U_a)$ im Bereich von 0 V bis 10 V und prüfen Sie, dass sich beide Schaltungen gleich verhalten.

Ersatzspannung und Ersatzwiderstand



$$U_a(U_2 = 0, I = 0) = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2}{3} \text{ V}$$

$$U_a(U_1 = 0, I = 0) = U_2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -1 \text{ V}$$

Ersatzspannung:

$$U_{\text{Ers}} = U_a(U_1 = 0, I = 0) + U_a(U_1 = 1, I = 0) = -\frac{1}{3} \text{ V}$$

Ersatzwiderstand:

$$R_{\text{Ers}} = \frac{U_a(U_1=0, U_2=0)}{I} = R_1 \parallel R_2 = \frac{2}{3} \Omega$$

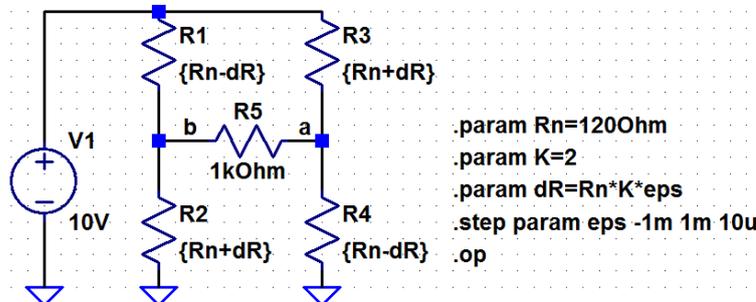
Aufgabe 2.3: DMS-Messbrücke

Dehnmessstreifen (DMS) bestehen aus einer wenige μm dicken zwischen einer Träger und einer Abdeckfolie eingeschweißten Metallfolie z.B. aus Konstantan und ändern ihren Widerstand in Abhängigkeit von der relativen Dehnung ε nach der Beziehung¹

$$R(\varepsilon) = R_N \cdot (1 + K \cdot \varepsilon)$$

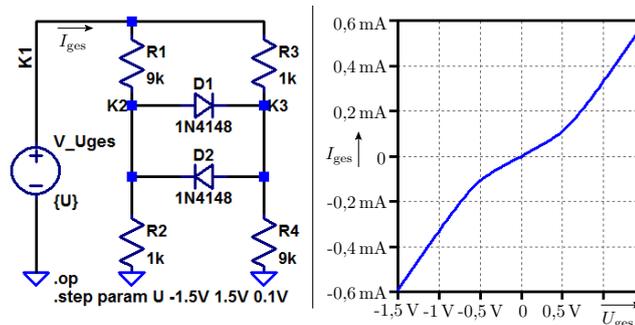
(ε – Verhältnis Längenänderung zu Länge; R_N – Nennwiderstand; K – Dehnempfindlichkeit, für eine Konstantan-Metallfolie $K \approx 2$).

Bestimmen Sie für die nachfolgende Brückenschaltung² aus vier Dehnmessstreifen den Zusammenhang zwischen der relativen Dehnung ε auf der Plattenoberseite und der zwischen a nach b messbaren Spannung für einen relativen Dehnungsbereich $\varepsilon \in [-10^{-3}, +10^{-3}]$.



2.2 RD-Schaltung

Aufgabe 2.4: Widerstands-Dioden-Netzwerk

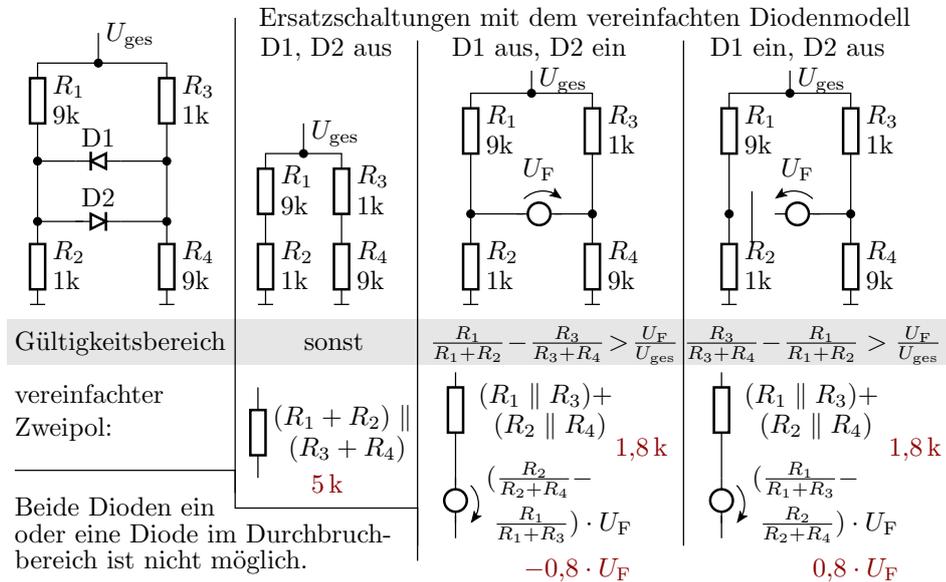


¹Quelle: Peter Baum: Sensorschaltungen. Simulation mit PSpice. 2. Auflage. Vieweg+Teubner, 2010, ISBN 978-3-8348-0289-7.

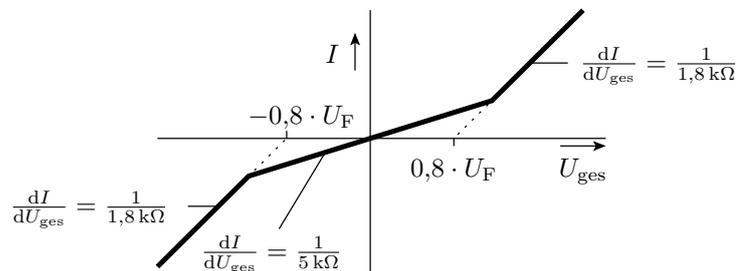
²Die Messstreifen seien paarweise oben und unten auf einer Biegeplatte angebracht, so dass sich bei einer Biegung für ein Sensorpaar der Widerstand erhöht und für das andere verringert.

1. Erzeugen Sie mit .op und .step eine Graphik der rechts dargestellten Strom-Spannungs-Beziehung.
2. Bestimmen Sie aus der Graphik mit Hilfe des Cursors den Anstieg der drei Kennlinienäste.
3. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem in der Vorlesung.

Aus der Vorlesung



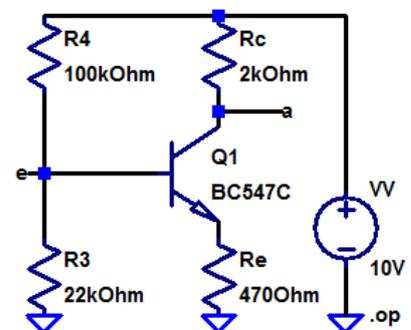
Zu erwartende Strom-Spannungs-Beziehung



2.3 Transistorschaltung

Aufgabe 2.5: Arbeitspunkt Transistorschaltung

1. Bestimmen Sie für die nachfolgende Transistorschaltung die Potentiale der Knoten e und a im Arbeitspunkt.
2. Bestimmen Sie für die Stromverstärkungen 200 und 500 das Potential am Ausgang a.



Hinweis: Das lässt sich z.B. wie in dem Beispiel in der Vorlesung mit einer Step-Anweisung und Ablesen aus der Graphik lösen.

Ergebnisse zur Kontrolle

Mit der Transistorverstärkung des Simualtionsmodells:

V(a): 5.43309 voltage
V(e): 1.71767 voltage

Mit der Stromverstärkungen ändert sich im Wesentlichen nur U_a :

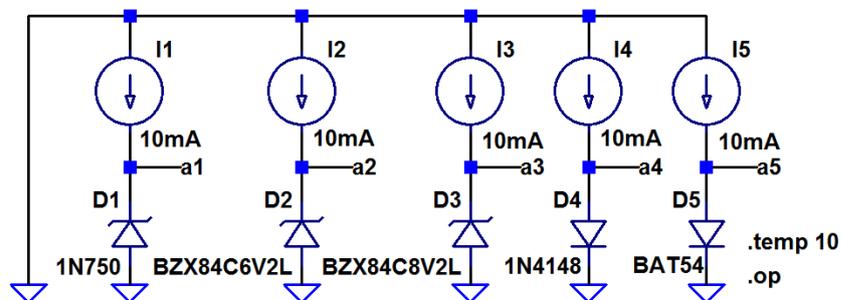
beta=200: $U_a=5,86V$
beta=500: $U_a=5,4V$

Aufgabe 2.6: Temperaturkoeffizienten von Dioden

- Bestimmen Sie mit der Testschaltung auf der nächsten Folie für einen Durchbruch- bzw. Durchlassstrom von 10mA
 - die Durchbruchspannung der Z-Dioden 1N750, BZX84C6V2L und BZX84C8V2L und
 - die Flussspannungen der Standarddiode 1N4148 und der Schottky-Diode BAT54
 jeweils für eine Temperatur von 10°C und 50°C.
- Errechnen Sie aus den Werten die Temperaturkoeffizienten κ der Durchbruch- bzw. Flussspannungen als relative Spannungsänderung je Grad nach der Formel:

$$\kappa = \frac{2 \cdot (U_a(50^\circ\text{C}) - U_a(10^\circ\text{C}))}{40 \text{ K} \cdot (U_a(50^\circ\text{C}) + U_a(10^\circ\text{C}))}$$

Hinweis: Die Simulation muss einmal mit »temp 10« für 10°C und einmal mit »temp 50« für 50°C durchgeführt werden.



Die Ergebnisse werden im »ErrorLog« gespeichert.

Simulationsergebnisse zu Kontrolle

	10°C	50°C	κ
V(a1)	4.66687 V	4.65759 V	$-4,98 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$
V(a2)	6.37355 V	6.39736 V	$9,32 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$
V(a3)	8.37355	8.39736	$7,10 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$
V(a4)	0.722335 V	0.655729 V	$-2,41 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$
V(a5)	0.344841	0.285616	$-4,70 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$

$$\kappa = \frac{2 \cdot (U_a(50^\circ\text{C}) - U_a(10^\circ\text{C}))}{40 \text{ K} \cdot (U_a(50^\circ\text{C}) + U_a(10^\circ\text{C}))}$$

Die Temperaturkoeffizienten der Flussspannungen sind offenbar deutlich größer als die der Durchbruchspannungen.

3 Kennlinie

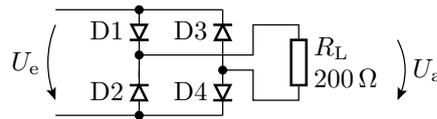
3.1 Diode

Aufgabe 2.7: Brückengleichrichter

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des nachfolgenden Brückengleichrichters

1. mit vier Schottky-Dioden vom Typ BAT43³ und
2. mit vier Siliziumdioden vom Typ 1N4148.

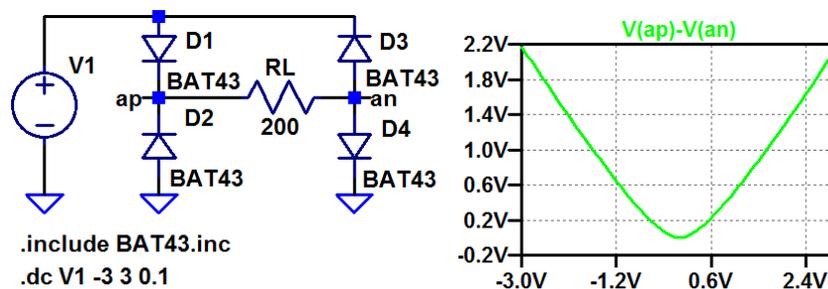
im Bereich $-3\text{V} \leq U_e \leq 3\text{V}$.



- Modell für die BAT43 findet man z.B. hier:

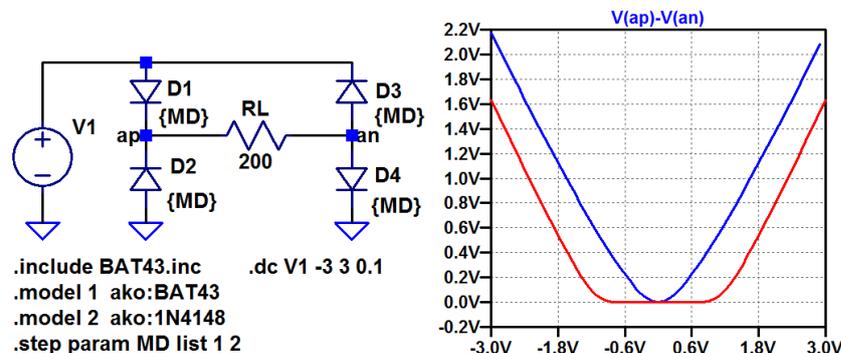
http://www.ee.siue.edu/~alozows/courses/Power-Electronics/spice/SoftOnMofset/DIODE_ST_10.lib

- In einer Datei im selben Verzeichnis wie die Schaltung speichern.
- Schaltung eingeben.



- Differenzspannung über dem Widerstand anzeigen.

Statt der Simulation mit geändertem Diodentyp bietet es sich an, mit der Step-Funktion die Schaltung mit beiden Diodentypen nacheinander zu simulieren.



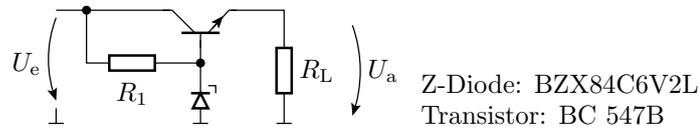
- Welchen offensichtlichen Vorteil hat eine Schottky-Diode in einem Brückengleichrichter?

³Besorgen Sie sich das Modell der Schottky-Dioden Typ BAT43 aus dem Internet.

3.2 Bipolartransistor

Aufgabe 2.8: Spannungsstabilisierung

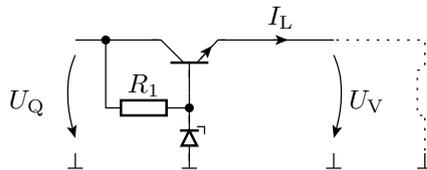
Gegeben sei der folgende Längsregler zur Stabilisierung der Spannung U_a .



- Bestimmen Sie die Ausgangsspannung U_a in Abhängigkeit der Eingangsspannung U_e im Bereich von $5\text{ V} \leq U_e \leq 10\text{ V}$ mit $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R_L = 100\ \Omega$.
- Legen Sie R_1 so fest, dass bei einer Eingangsspannung von 10 V und einem von $1\text{ k}\Omega$ bis $10\ \Omega$ absinkenden Lastwiderstand R_L die Ausgangsspannung in guter Näherung konstant bleibt und bei weiterer Verringerung des Lastwiderstands R_L der Laststrom I_L nicht weiter absinkt (Lösen durch Probieren.).

Hinweis: Die Berechnung einer ähnlichen Schaltung finden Sie in Elektronik I, F3, Abschn. 1.6 (Spannungsstabilisierung).

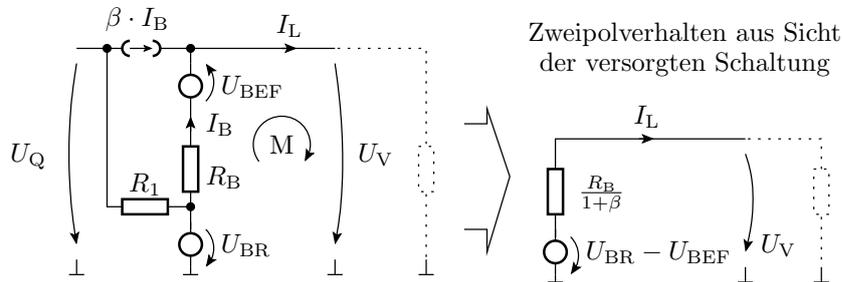
Überschläge mit vereinfachten Ersatzschaltungen



Prinzip:

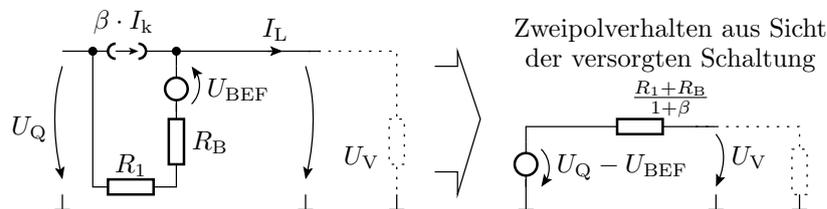
Bipolartransistor mit konstantem Basispotential, z.B. erzeugt mit einer Z-Diode im Durchbruchbereich.

- Ersatzschaltung mit Z-Diode im Durchbruchbereich:



Strombegrenzungsmodus

Der gesamte Strom durch R_1 fließt in die Basis:

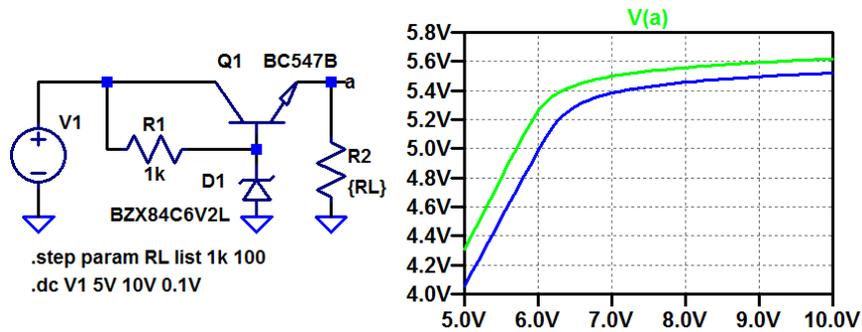


Ersatzschaltung ist eine Spannungsquelle mit hohem Innenwiderstand. Offensichtliche Schwachstellen der Schaltung:

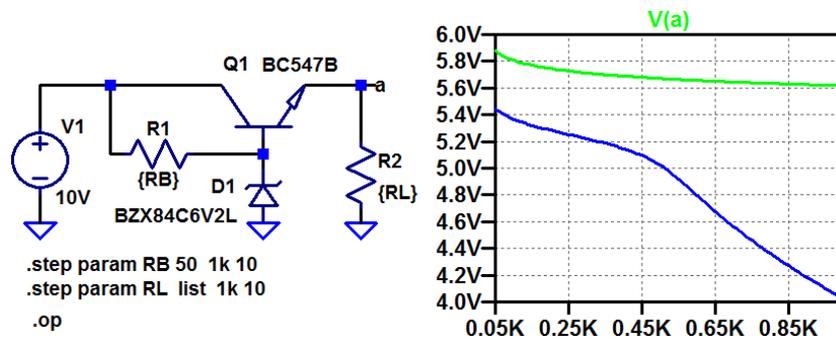
- Die stabilisierte Spannung übernimmt die Streuungen von U_{BR} und U_{BEF} .
- Der Begrenzungsstrom hängt erheblich von U_Q und β ab.

Erhebliche Verbesserungsmöglichkeiten z.B. durch Ersatz von R_1 durch eine Konstantstromquelle.

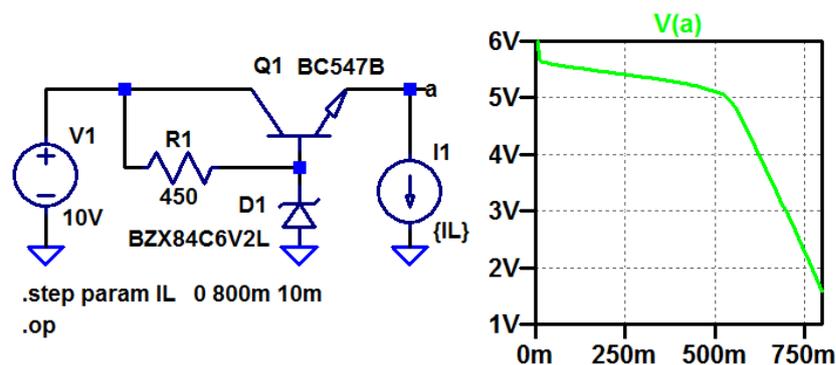
- Bestimmen der Ausgangsspannung U_a in Abhängigkeit der Eingangsspannung U_e im Bereich von $5\text{ V} \leq U_e \leq 10\text{ V}$ mit $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R_L = R_2 = 100\ \Omega$.



- Festlegung von R_1 so, dass U_a bei $U_Q = 10\text{ V}$ und $10\ \Omega \leq R_L \leq 1\text{ k}\Omega$ etwa konstant bleibt:



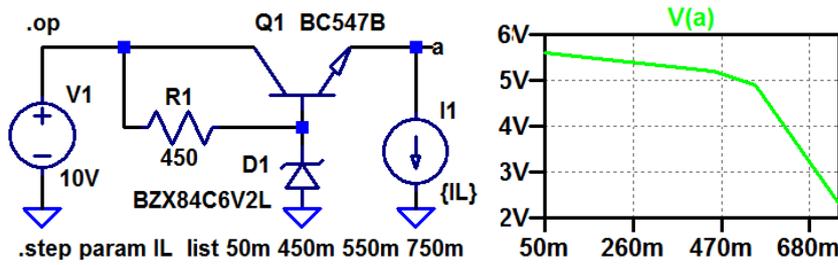
Für $R_L = 1\text{ k}\Omega$ bleibt U_{RL} im gesamten simulierten Bereich von R_1 etwa gleich. Für $R_L = 10\ \Omega$ fällt U_a für $R_1 > 450\ \Omega$ steiler ab. Bei $U_a \approx 5\text{ V}$ und $R_L = 10\ \Omega$ fließt etwa $I_L \approx 0,5\text{ A}$. Nächste Folie Zusatzkontrolle, dass die Ausgangsspannung bis zu einem Laststrom von $0,5\text{ A}$ etwa konstant bleibt und dann steil abfällt.



- Die Schaltung hat beide vorhergesagten Arbeitsbereiche.
- Übergang von der »Spannungsstabilisierung« in die Strombegrenzung bei etwa 500 mA .

Zusatzfrage: Wie groß sind die Anstiege (Ersatzwiderstände) in den beiden Arbeitsbereichen?

Berechnung von zwei Stromwerten je Arbeitsbereich:



Im »Waveform Viewer« »File => Export => V(a)«.

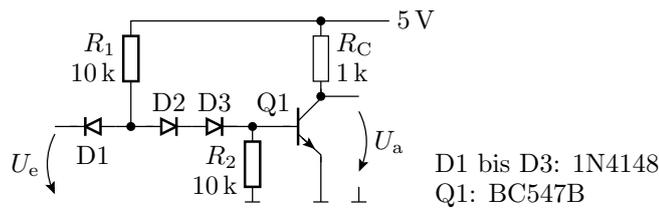
```

i1 V(a)
5.000000000000000e-002 5.593485e+000
4.500000000000000e-001 5.208362e+000
5.500000000000000e-001 4.894452e+000
7.500000000000000e-001 2.288484e+000
    
```

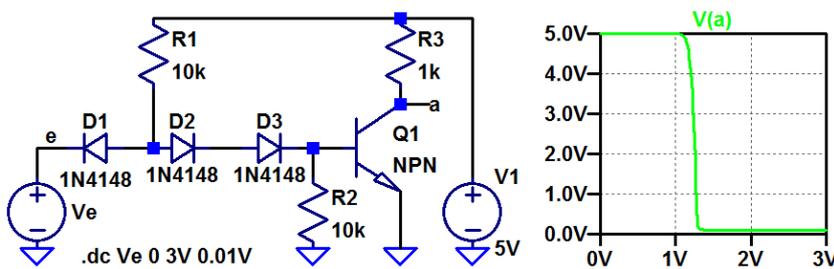
$$R_{Ers1} = \frac{5,52\text{ V} - 5,21\text{ V}}{450\text{ mA} - 50\text{ mA}} = 0,77\ \Omega; \quad R_{Ers2} = \frac{4,89\text{ V} - 2,29\text{ V}}{750\text{ mA} - 750\text{ mA}} = 13\ \Omega$$

Aufgabe 2.9: Transistorinverter

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $U_a = f(U_e)$ für den nachfolgenden Transistorinverter im Bereich $0 \leq U_e \leq 5\text{ V}$.



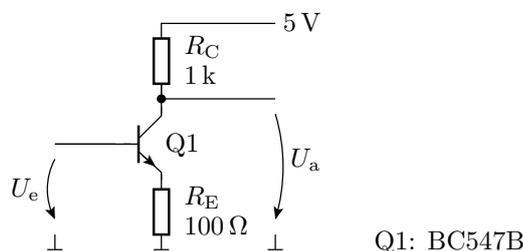
Hinweis: Arbeitsbereiche, lineare Ersatzschaltungen und Berechnung siehe Elektronik I, E1F3, Abschn. 1.5 (DT-Gatter).



3.4 Transistorverstärker

Aufgabe 2.10: 1-Transistor-Verstärker

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $U_a = f(U_e)$ für den nachfolgenden Verstärker mit einem Bipolartransistor BC547B im Bereich $0 \leq U_e \leq 5\text{ V}$.



3.5 Operationsverstärkerschaltungen

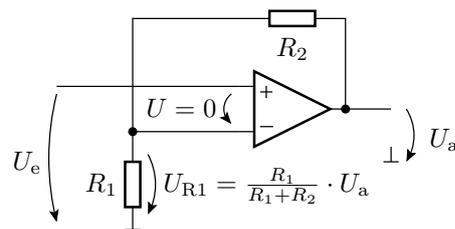
Aufgabe 2.11: Nichtinvertierender Verstärker

Entwerfen Sie mit einem Operationsverstärker vom Typ TLC07X, Versorgungsspannungen $\pm 5\text{ V}$, einen nichtinvertierenden Verstärker mit der Verstärkung:

$$v_u = \frac{U_a}{U_e} = 5$$

- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion.
- Lesen Sie aus der Übertragungsfunktion ab, für welchen Eingangsspannungsbereich die Schaltung als Verstärker nutzbar ist.

Wiederholung aus Elektronik I

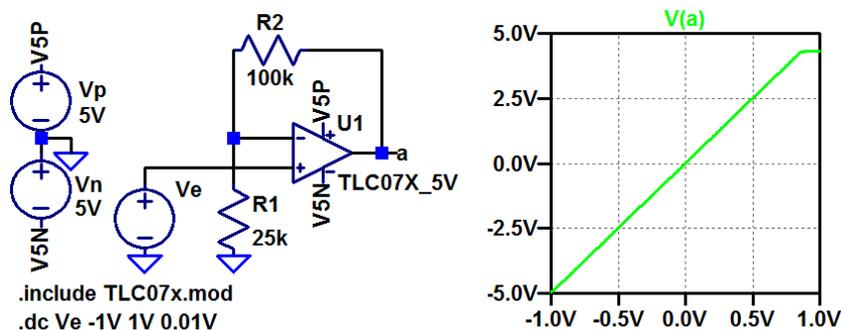


$$U_a = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_e$$

Mögliche Widerstandswerte für $v_u = 5$:

$$\begin{aligned} R_1 &= 25\text{ k}\Omega \\ R_2 &= 100\text{ k}\Omega \end{aligned}$$

- Datei TLC07x.mod von der Webseite zur Vorlesung in das Arbeitsverzeichnis laden.
- In LTspice »[Opamps] > Opamp2« verwenden.



Aufgabe 2.12: Brückenverstärker

Erweitern Sie die Brückenschaltung aus Aufgabe 2.3 (Folie 2) um eine Operationsverstärkerschaltung mit einem TLC07X so, dass der relative Dehnbereich $\varepsilon \in [-10^{-4}, +10^{-4}]$ auf einen Spannungsbereich von $U_a \in [-1\text{ V}, +1\text{ V}]$ abgebildet wird.

Hinweise: Die Brückenspannung von 10 V soll in eine $+5\text{ V}$ und eine -5 V Versorgung für den Operationsverstärker aufgeteilt werden. Die Messung der Brückenspannung erfordert einen Differenzverstärker. Der Brückenwiderstand R_5 ist überflüssig.

Aufgabe 2.13: Summationsverstärker

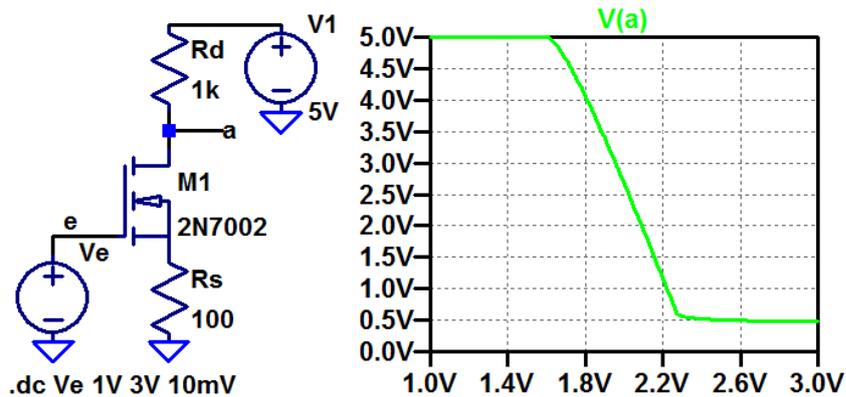
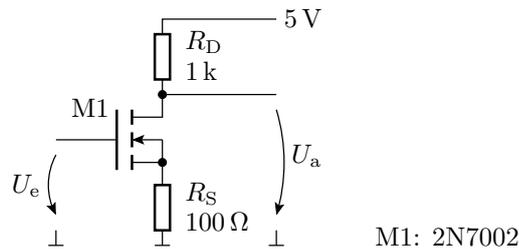
Erweitern Sie die Schaltung der Folie zuvor um einen zweiten Operationsverstärker, so dass der Dehnbereich $\varepsilon \in [-10^{-4}, 10^{-4}]$ auf den für einen Mikrocontroller messbaren Spannungsbereich von $U_m \in [0\text{ V}, 3,3\text{ V}]$ abgebildet wird.

Hinweise: Das erfordert einen zusätzlichen Summationsverstärker. Da ein Summationsverstärker immer negiert, sind die Eingänge des Differenzverstärkers gegenüber der Aufgabe zuvor zu tauschen.

4 Transferfunktion

Aufgabe 2.14: MOS-Verstärker

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $U_a = f(U_e)$ für den nachfolgenden Verstärker mit einem MOS-Transistor 2N7002 im Bereich $0 \leq U_e \leq 5\text{ V}$.

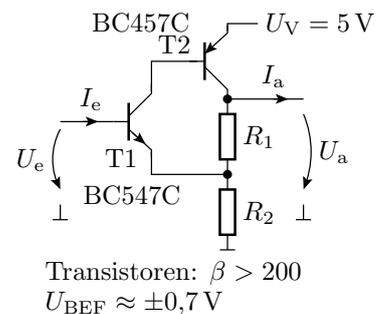


Bei Wahl des Arbeitspunkt $U_e = 2\text{ V}$ ergibt ».tf V(a) V«:

```
Transfer_function: -7.33695 transfer
ve#Input_impedance: 1e+020 impedance
output_impedance_at_V(a): 1000 impedance
```

Aufgabe 2.15: BT-Verstärker

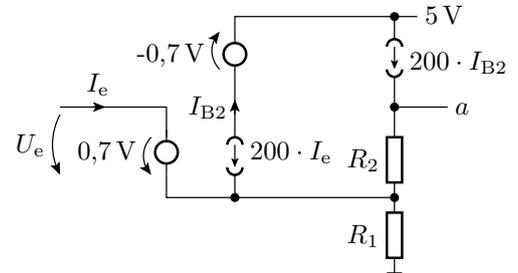
Legen Sie für den nachfolgenden Transistorverstärker R_1 und R_2 so fest, dass die Spannungsverstärkung $v_u = \frac{d u_a}{d u_e} = 20$ und der Eingangswiderstand $r_e = \frac{d u_e}{d i_e}$ mindestens $100\text{ k}\Omega$ beträgt.



1. Lineare Ersatzschaltung mit Transistoren im Normalbereich.
2. Gleichungen für $I_e = f(U_e)$ und $U_a = f(U_e)$ abschätzen.

3. Daraus Gleichungen für v_u und r_e ableiten.
4. Widerstandswerte festlegen.
5. Kontrolle durch Simulation: Kennlinie bestimmen, Arbeitspunkt festlegen, v_u und r_e im Arbeitspunkt bestimmen.
6. Nachbessern.

Lineare Ersatzschaltung



$$U_e = U_{BEF} + I_e \cdot (1 + \beta + \beta^2) \cdot R_1$$

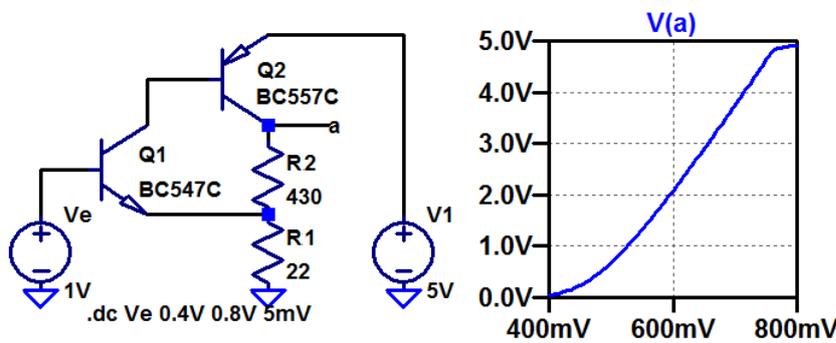
Eingangswiderstand: $r_e \approx \beta^2 \cdot R_1$

Auswahl: $R_1 = 22\Omega$

$$U_a \approx U_{R1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

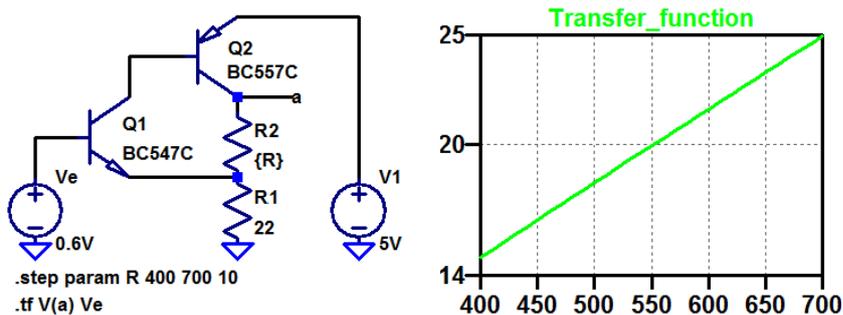
Auswahl: $R_2 = 430\Omega$

Übertragungsfunktion und Arbeitspunkt



- Der Arbeitspunkt soll bei $U_e = 0,6\text{ V}$ liegen.
- Mit »tf V(a) Ve« ergibt sich im Arbeitspunkt ein Eingangswiderstand von $5\text{ M}\Omega$ und eine Verstärkung von ≈ 16 .

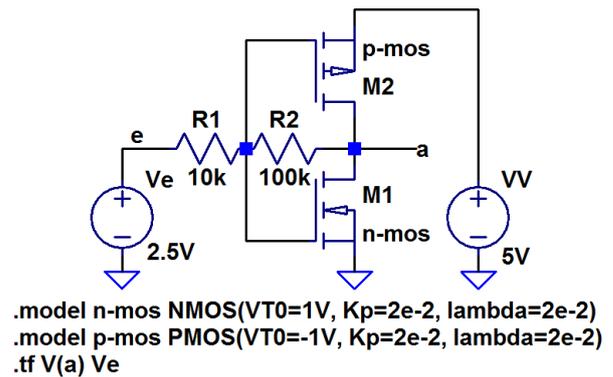
Variation von R_2 zur Anpassung von v_u



Bei $R_2 = 550\Omega$ ist die Verstärkung genau 20. Achtung, die Simulation berücksichtigt keine Streuungen der Bauteilparameter.

Aufgabe 2.16: CMOS-Inverter als Verstärker

Der nachfolgende mit zwei Widerständen beschaltete CMOS-Inverter ist ein Verstärker.



1. Bestimmen Sie für den Arbeitspunkt $U_e = U_V/2$ die Verstärkung und den Ausgangswiderstand.
2. Ändern der Schaltung zur Einstellung von $|v_u| = 20$.

Zur Kontrolle

1. Verstärkung und Ausgangswiderstand für $U_e = U_V/2$

```

Transfer_function: -8.62877 transfer
ve#Input_impedance: 11424.1 impedance
output_impedance_at_V(a): 150.685 impedance
    
```

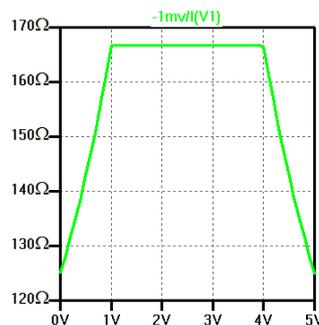
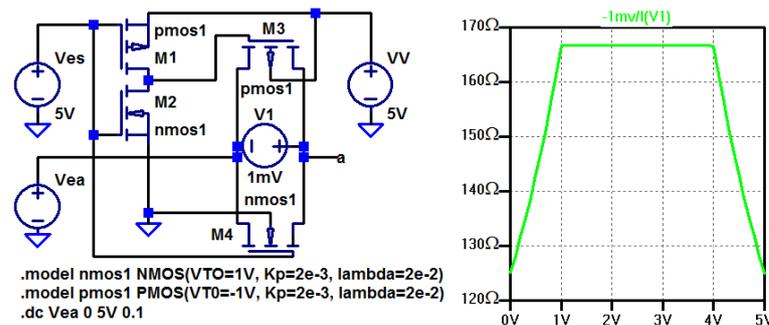
2. Ändern der Schaltung zur Einstellung von $|v_u| = 20$:

R_2 muss etwa bei

$$\frac{20}{8,629} \cdot 100 \text{ k}\Omega = 232 \text{ k}\Omega$$

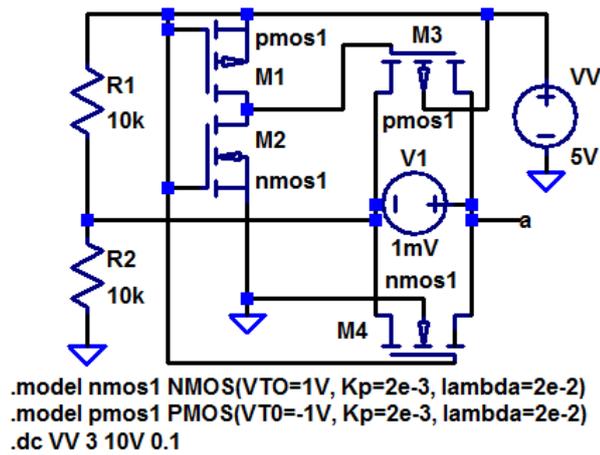
liege. Kontrolle mit »durchsteppen« von R_2 .

Aufgabe 2.17: Transferringatter



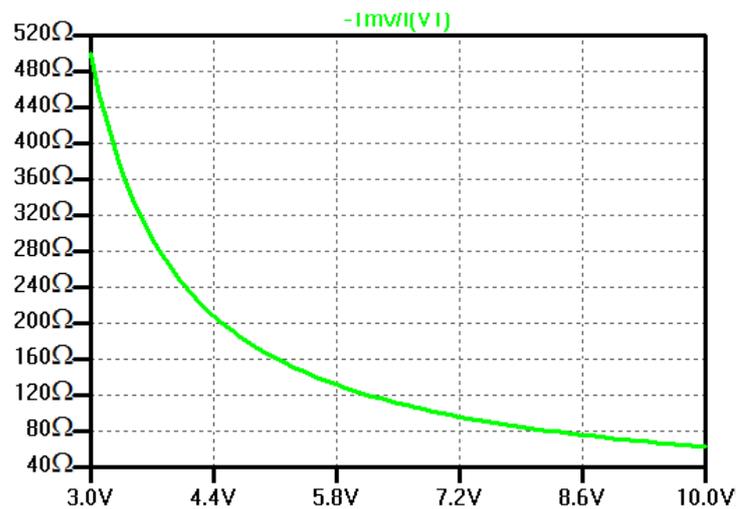
1. Untersuchen Sie für das Transferringatter aus der Vorlesung, wie sich der maximale Transferwiderstand mit der Versorgungsspannung im Bereich $3 \text{ V} < VV < 5 \text{ V}$ ändert.
2. Welche Steilheiten K_p müssendie Transistoren haben müssen, damit der Transferwiderstand bei einer Versorgungsspannung von 5 V nicht größer als 10Ω ist.

Zu simulierende Schaltung Aufgabenteil 1



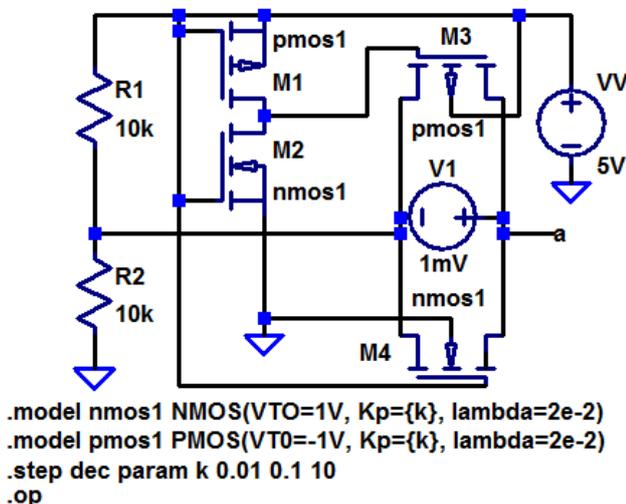
- Kennlinienberechnung für $VV = 3\text{ V}$ bis 10 V in $0,1\text{ V}$ -Schritten und $V_{ea} = VV/2$, erzeugt durch Spannungsteiler aus R_1 und R_2 .
- Zu untersuchen: $R_{TG} = -\frac{1\text{mV}}{I_{V1}}$.

Simulationsergebnis



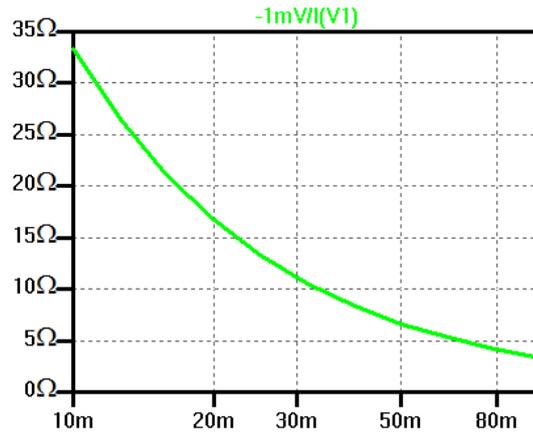
Aufgabenteil 2

Erforderliche Steilheiten K_p , damit der Transferwiderstand bei $VV = 5\text{ V}$ nicht größer als 10 Ω ist.



- Steilheit von 10 mA/V^2 bis 100 mA/V^2 durchsteppen.

Simulationsergebnis

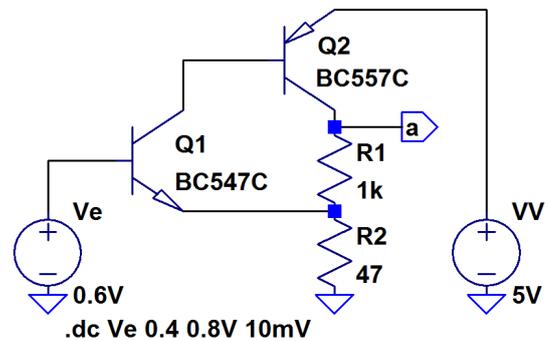


Max. Transferwiderstand $10\ \Omega$ verlangt etwa eine Steilheit von $K_p > 35\ \text{mA}/\text{V}^2$.

5 Bauteiltoleranzen

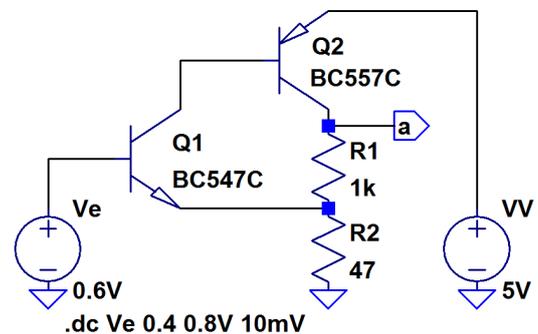
Aufgabe 2.18: BT-Verstärker mit Toleranzen

Gegeben ist der nachfolgende Transistorverstärker.



- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion und legen Sie über den Gleichanteil von U_e den Arbeitspunkt in die Mitte des Verstärkerbereichs.
- Bestimmen Sie die Verstärkung, den Eingangswiderstand und den Ausgangswiderstand im gewählten Arbeitspunkt.

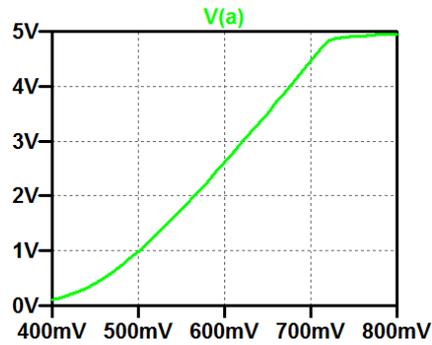
Die Widerstände sollen eine Toleranz von $\pm 2\%$ und die Stromverstärkungen einen Toleranzbereich von $450 \pm 50\%$ haben.



- Bestimmen Sie die Toleranzbereiche
 - des Gleichanteils der Ausgangsspannung und
 - der Spannungsverstärkung

im Arbeitspunkt, einmal im Bezug auf jeden streuenden Parameter einzeln und einmal für alle streuenden Parameter zusammen.

Zur Kontrolle für Aufgabenteil 1 und 2



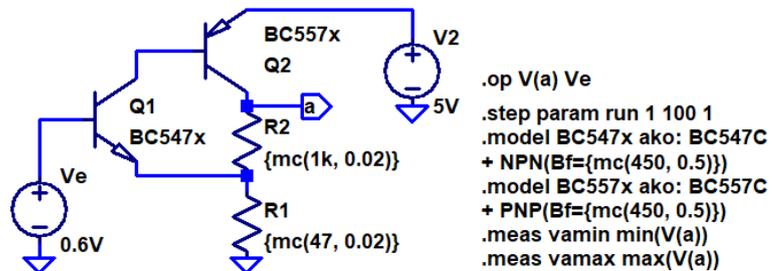
Arbeitspunkt: $V_e=600\text{mV}$

Transfer_function: 17.7395 transfer

ve#Input_impedance: 1.17664e+007 impedance

output_impedance_at_V(a): 192.961 impedance

Zur Kontrolle für Aufgabenteil 3



- nur Bf von Q1 $\pm 50\%$: $2,54631 \leq V(a) \leq 2,54633$
- nur Bf von Q2 $\pm 50\%$: $2,23723 \leq V(a) \leq 2,7293$
- nur R1 $\mp 2\%$: $2,509 \leq V(a) \leq 2,584$
- nur R2 $\mp 2\%$: $2,4987 \leq V(a) \leq 2,5937$
- zusammen: $2,20 \leq V(a) \leq 2,76$

Bestimmung Verstärkungsbereich analog, nur mit .tf und min(Transfer_function) ...