



# Elektronik II

## Grosse Übung zu Foliensatz F2

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (E2-GrÜb-F2)  
4. Mai 2016

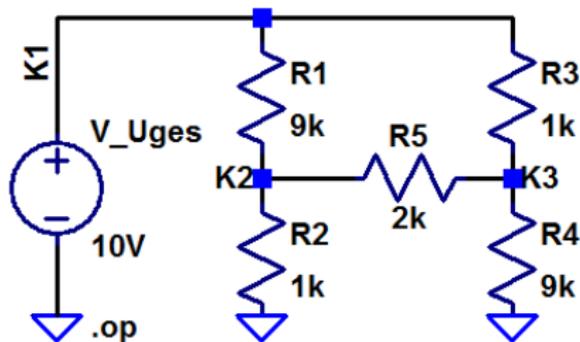


# Arbeitspunkt



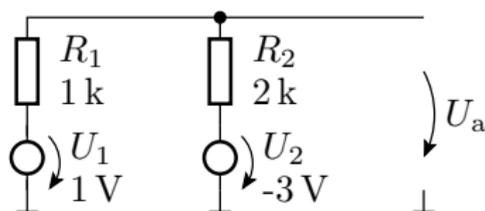
## Brückenschaltung

## Aufgabe 2.1: Untersuchung eines Widerstandsnetzwerks



- 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.

## Aufgabe 2.3: DMS-Messbrücke

Dehnmessstreifen (DMS) bestehen aus einer wenige  $\mu\text{m}$  dicken zwischen einer Träger und einer Abdeckfolie eingeschweißten Metallfolie z.B. aus Konstantan und ändern ihren Widerstand in Abhängigkeit von der relativen Dehnung  $\varepsilon$  nach der Beziehung<sup>1</sup>

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

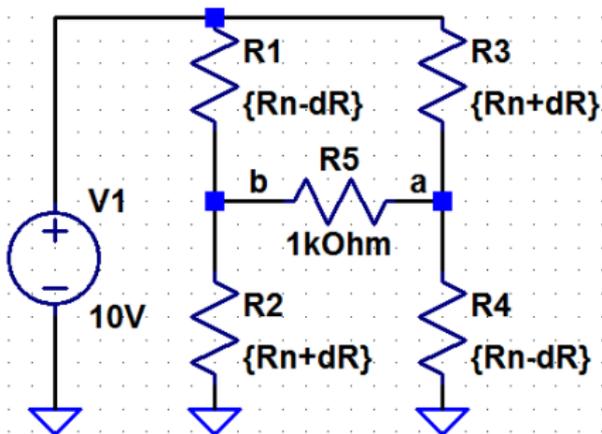
( $\varepsilon$  – Verhältnis Längenänderung zu Länge;  $R_N$  – Nennwiderstand;  
 $K$  – Dehnempfindlichkeit, für ein Konstantan-Metallfolie  $K \approx 2$ ).

---

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



Bestimmen Sie für die nachfolgende Brückenschaltung<sup>2</sup> aus vier Dehnmessstreifen den Zusammenhang zwischen der relativen Dehnung  $\varepsilon$  auf der Plattenoberseite und der zwischen a nach b messbaren Spannung für einen relativen Dehnungsbereich  $\varepsilon \in [-10^{-4}, +10^{-4}]$ .



```

.param Rn=120Ohm
.param K=2
.param dR=Rn*K*eps
.step param eps -1m 1m 10u
.op

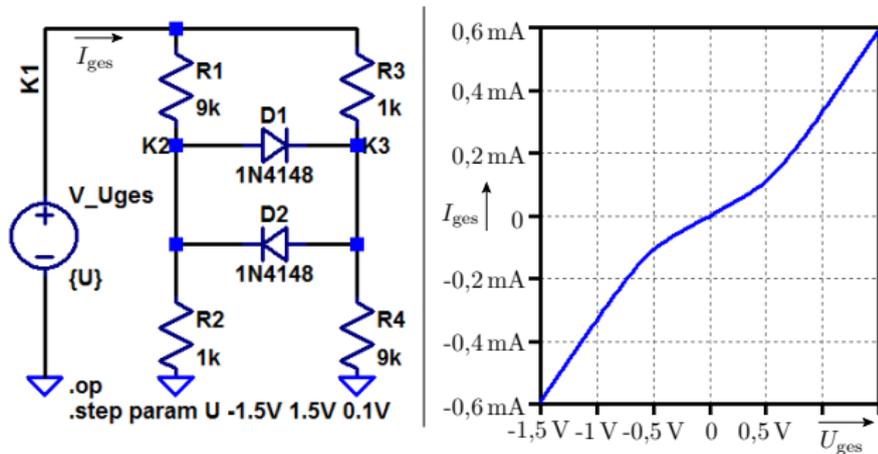
```

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



# RD-Schaltung

### Aufgabe 2.4: Widerstands-Dioden-Netzwerk



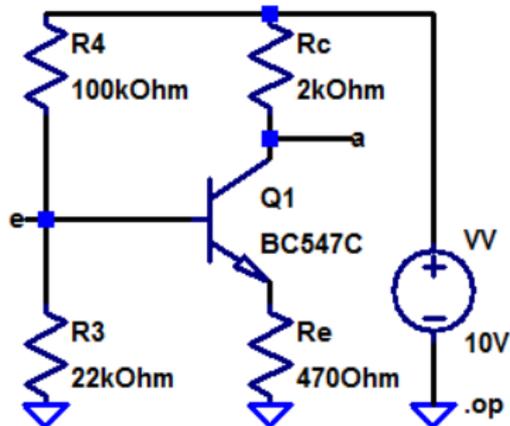
- 1 Erzeugen Sie mit `.op` und `.step` eine Graphik der rechts dargestellten Strom-Spannungs-Beziehung.
- 2 Bestimmen Sie aus der Graphik mit Hilfe des Cursors den Anstieg der drei Kennlinienäste.
- 3 Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem in der Vorlesung.



## 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 den geänderten Stromverstärkungen ändert sich im Wesentlichen nur  $U_a$ :

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

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



# Kennlinie



# Diode

## Aufgabe 2.6: Temperaturkoeffizienten von Dioden

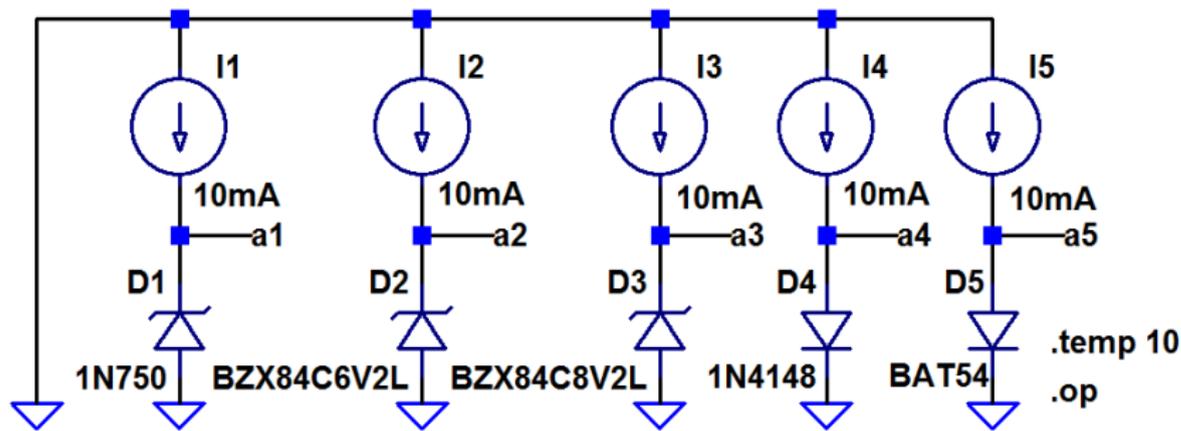
- 1 Bestimmen Sie mit der Testschaltung auf der nächsten Folie für einen Durchbruch- bzw. Durchlassstrom von 10mA
  - die Durchbruchspannung der Z-Dioden 1N750, BZX84C6V2L und BZX84C8V2L und
  - die Flussspannungen der Standarddiode 1N4148 und der Schottky-Diode BAT54

jeweils für eine Temperatur von 10°C und 50°C.

- 2 Errechnen Sie aus den Werten die Temperaturkoeffizienten  $\kappa$  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	$\kappa$
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	$-4,70 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$

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

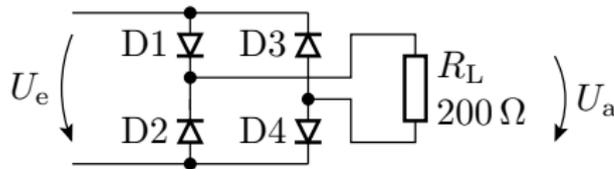
Die Temperaturkoeffizienten der Flussspannungen sind offenbar deutlich größer als der Durchbruchspannungen.

## Aufgabe 2.7: Brückengleichrichter

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des nachfolgenden Brückengleichrichters

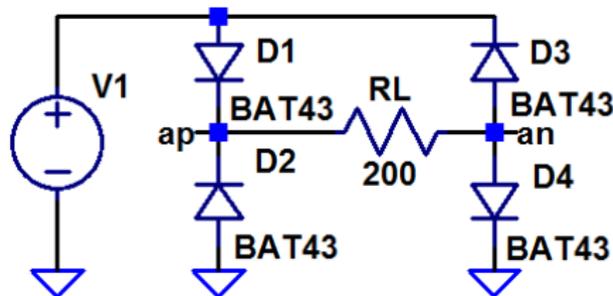
- 1 mit vier Schottky-Dioden vom Typ BAT43<sup>3</sup> und
- 2 mit vier Siliziumdioden vom Typ 1N4148.

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

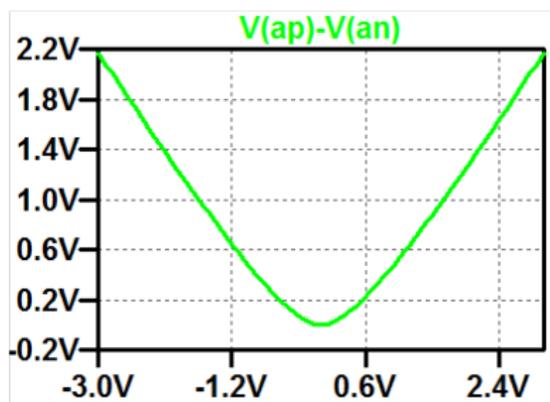


<sup>3</sup>Besorgen Sie sich das Modell der Schottky-Dioden Typ BAT43 aus dem Internet.

- Modell für die BAT43 findet man z.B. hier:  
[http://www.ee.siue.edu/~alozows/courses/Power-Electronics/spice/SoftOnMosfet/DIODE\\_ST\\_10.lib](http://www.ee.siue.edu/~alozows/courses/Power-Electronics/spice/SoftOnMosfet/DIODE_ST_10.lib)
- In einer Datei im selben Verzeichnis wie die Schaltung speichern.
- Schaltung eingeben.

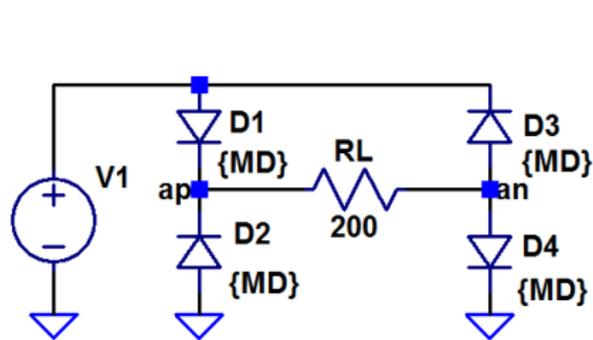


```
.include BAT43.inc
.dc V1 -3 3 0.1
```

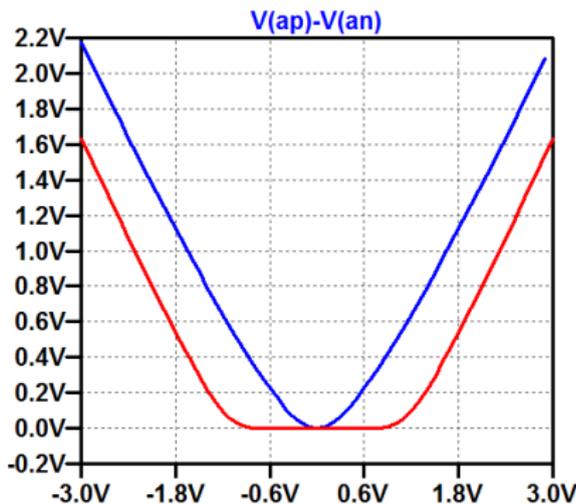


- Differenzspannung über dem Widerstand anzeigen.

Statt der anderen Diode bietet es sich an, mit der Step-Funktion die Schaltung mit beiden Dioden nacheinander zu simulieren.



```
.include BAT43.inc
.model 1 ako:BAT43
.model 2 ako:1N4148
.step param MD list 1 2
.dc V1 -3 3 0.1
```



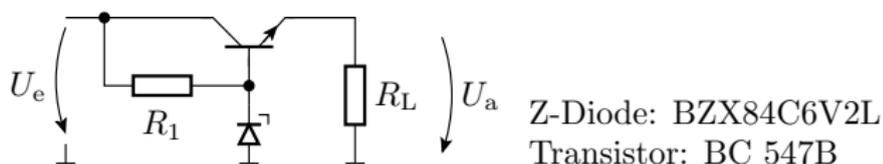
- Welchen offensichtlichen Vorteil hat eine Schottky-Diode in einem Brückengleichrichter?



# Bipolartransistor

## Aufgabe 2.8: Spannungsstabilisierung

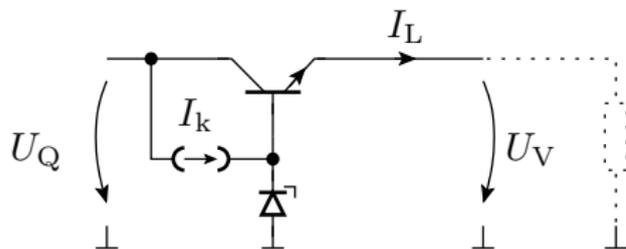
Gegeben sei der nachfolgenden Längsregler zur Stabilisierung der Spannung  $U_a$ .



- 1 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  $R_L = 100\ \Omega$ .
- 2 Legen Sie  $R_1$  so fest, dass bei einer Eingangsspannung von 8 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).

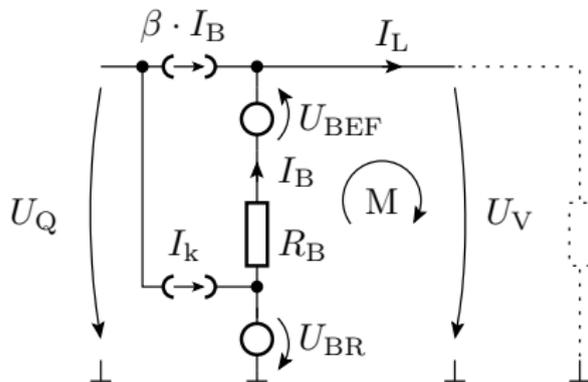
## Wiederholung aus Elektronik I



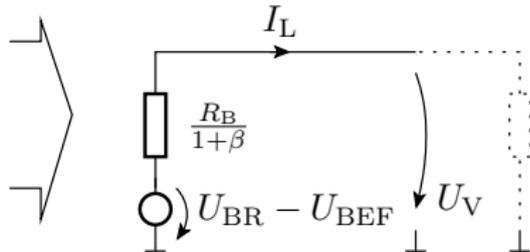
Prinzip:

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

### ■ Ersatzschaltung mit Z-Diode im Durchbruchbereich

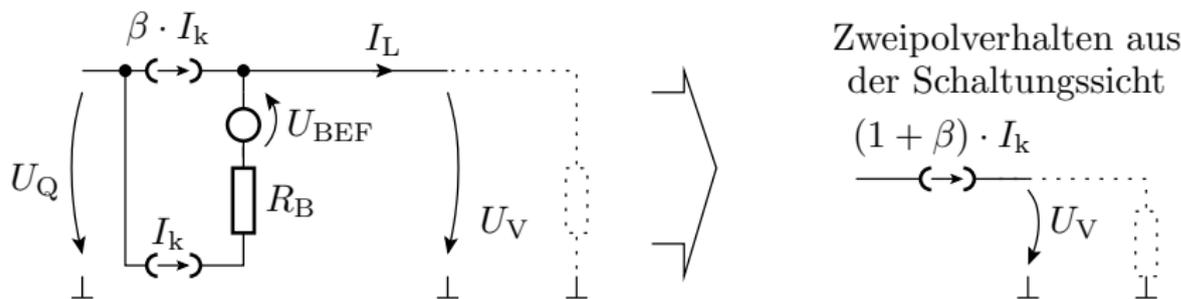


Zweipolverhalten aus der Schaltungssicht



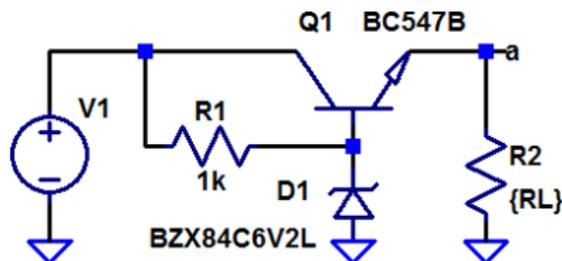
## Strombegrenzungsmodus

- Der gesamte Strom  $I_k$  fließt in die Basis

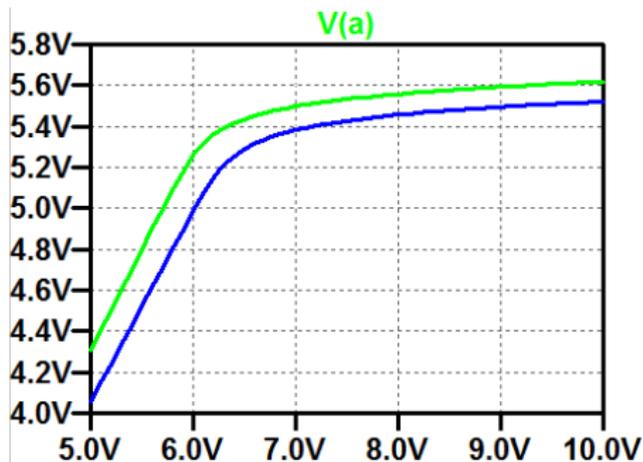


- Laut Ersatzschaltung ideale Stromquelle.
- Begrenzungsstrom streut, da proportional zu  $\beta$ .
- Stabilisierte Spannung übernimmt die Streuungen von  $U_{BEf}$  des Transistors und von  $U_{BR}$  der Z-Diode.

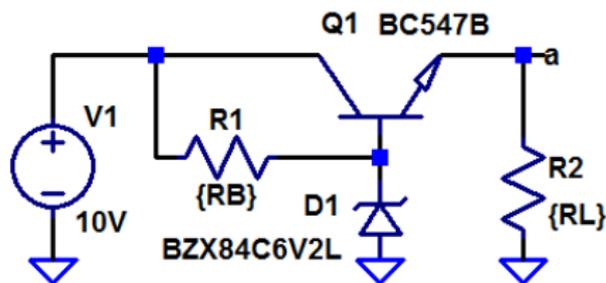
- 1 Bestimmen der Ausgangsspannung  $U_a$  in Abhängigkeit der Eingangsspannung  $U_e$  im Bereich von  $5\text{ V} \leq U_e \leq 10\text{ V}$  mit  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  und  $R_L = R_2 = 100\ \Omega$ .



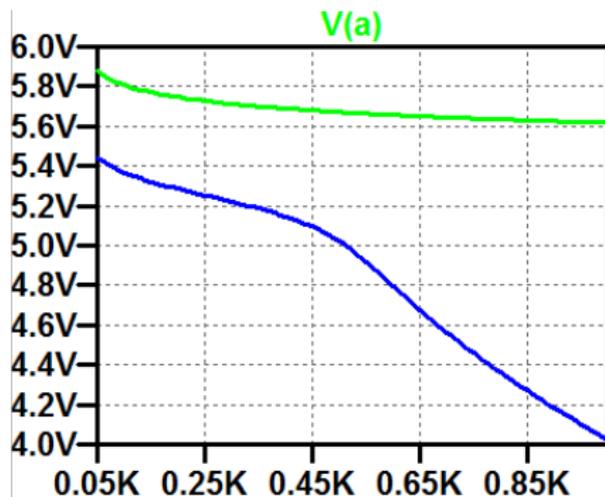
```
.step param RL list 1k 100
.dc V1 5V 10V 0.1V
```



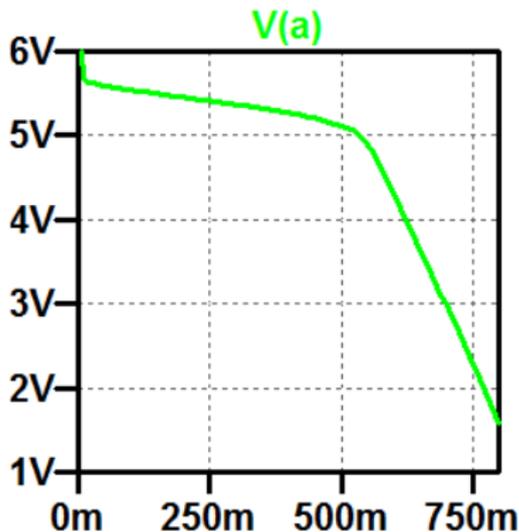
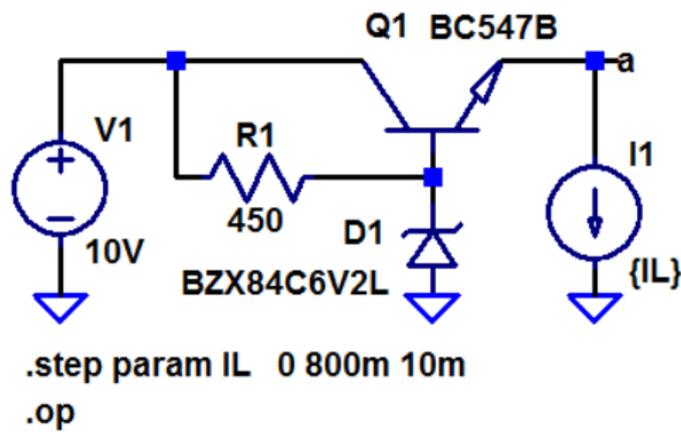
- 2 Legen Sie  $R_1$  so fest, dass bei einer Eingangsspannung von 8 V und einem von  $1\text{ k}\Omega$  bis  $10\ \Omega$  absinkenden Lastwiderstand  $R_L = R_2$  die Ausgangsspannung in guter Näherung konstant bleibt



```
.step param RB 50 1k 10
.step param RL list 1k 10
.op
```



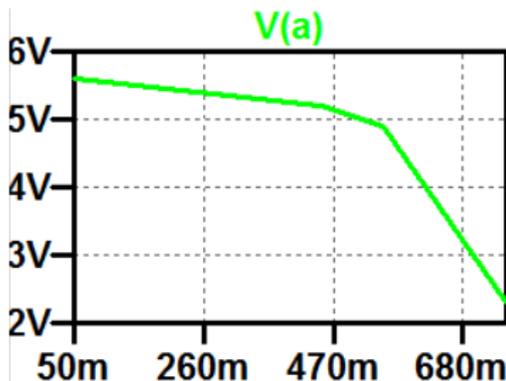
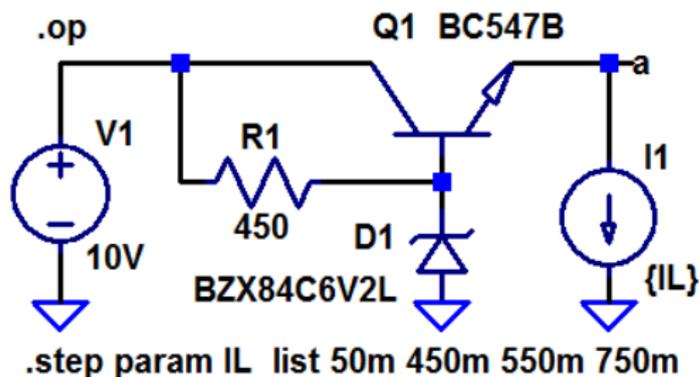
- Bei  $U_a \approx 5\text{ V}$  und  $R_L = R_2 = 10\ \Omega$  fließt etwa ein Strom von 0,5 A. Nächste Folie Zusatzkontrolle, dass die Ausgangsspannung bis zu einem Laststrom von 0,5 A etwa konstant bleibt und dann steil abfällt.



- Hat die beiden vorhergesagten Arbeitsbereiche.
- Wie groß sind die Anstiege (Widerstände) in den beiden Arbeitsbereichen?



- Stromwerte auf zwei pro Arbeitsbereich reduzieren.



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

i1 V(a)

5.000000000000000e-002 5.593485e+000

4.500000000000000e-001 5.208362e+000

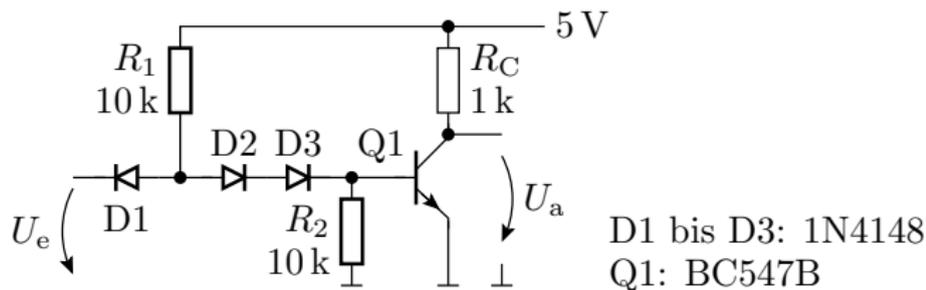
5.500000000000000e-001 4.894452e+000

7.500000000000000e-001 2.288484e+000

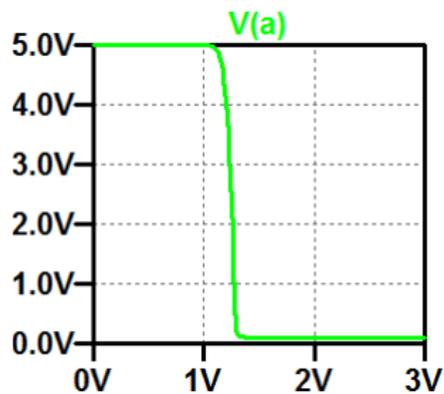
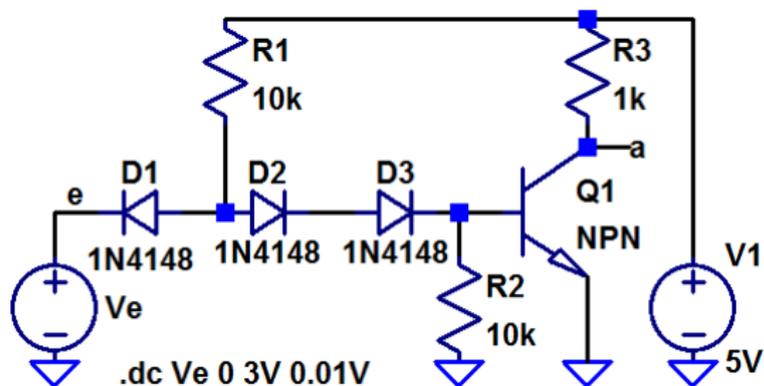
$$R_{\text{Ers}1} = \frac{5,52 \text{ V} - 5,21 \text{ V}}{450 \text{ mA} - 50 \text{ mA}} = 0,77 \Omega; \quad R_{\text{Ers}2} = \frac{4,89 \text{ V} - 2,29 \text{ V}}{750 \text{ mA} - 550 \text{ mA}} = 13 \Omega$$

## 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: Die Arbeitsbereiche, lineare Ersatzschaltungen und Berechnung siehe Elektronik I, F3, Elektronik I, Abschn. 1.5 (DT-Gatter).

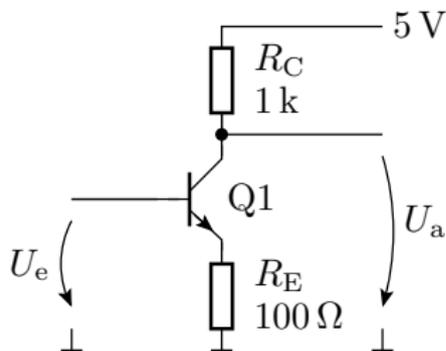




# Transistorverstärker

## 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  $0 \leq U_e \leq 5 \text{ V}$ .



Q1: BC547B



# Operationsverstärkerschaltungen



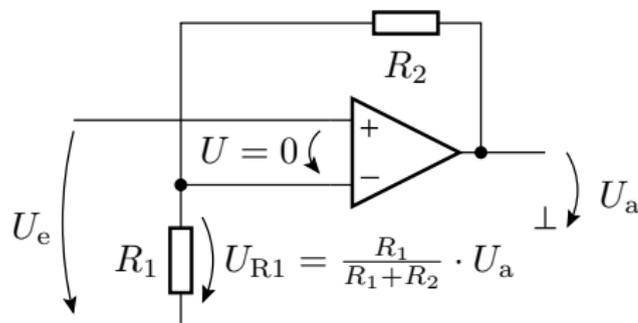
## Aufgabe 2.11: Nichtinvertierender Verstärker

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

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

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

## Wiederholung aus Elektronik I



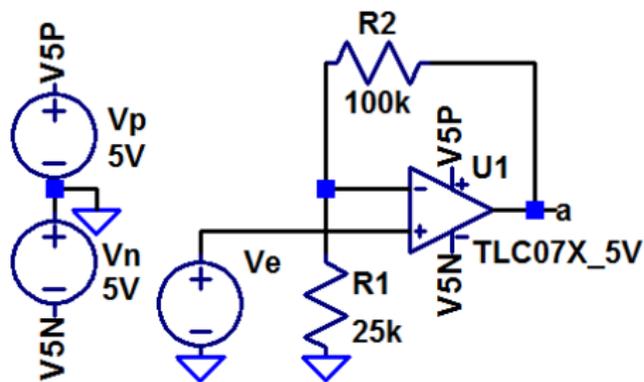
$$U_a = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_e$$

Mögliche Widerstandswerte für  $v_u = 5$ :

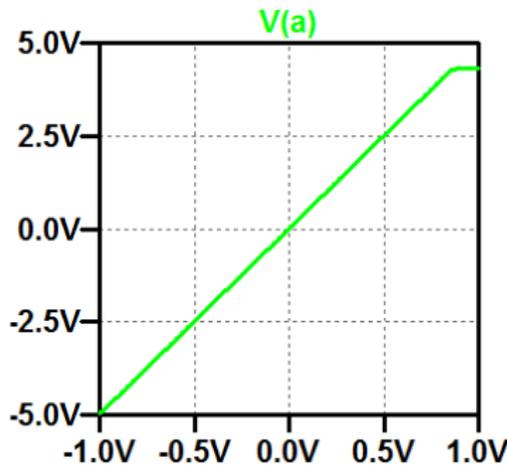
$$R_1 = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

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



```
.include TLC07x.mod
.dc Ve -1V 1V 0.01V
```





## Aufgabe 2.12: Brückenverstärker

Ergänzen Sie die Brückenschaltung aus Aufgabe 2.3 (Folie 6) 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 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.

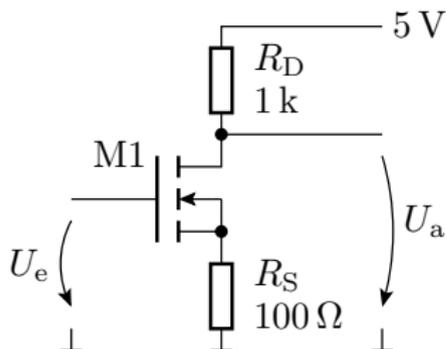


# Transferfunktion



### Aufgabe 2.14: MOS-Verstärker

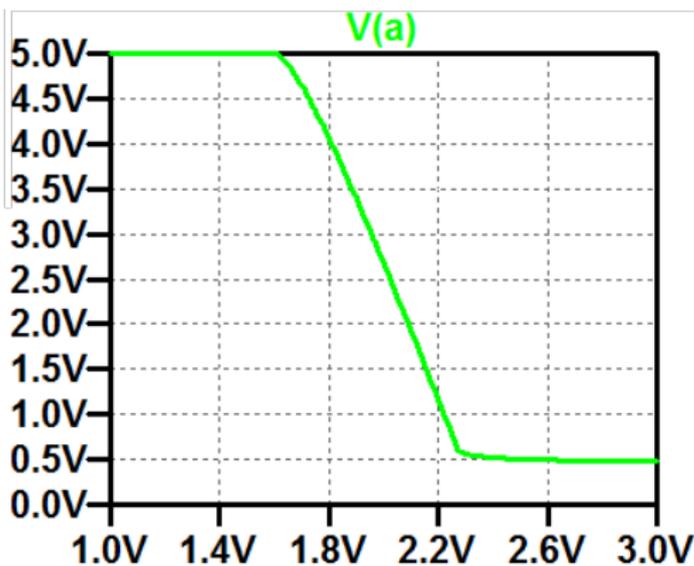
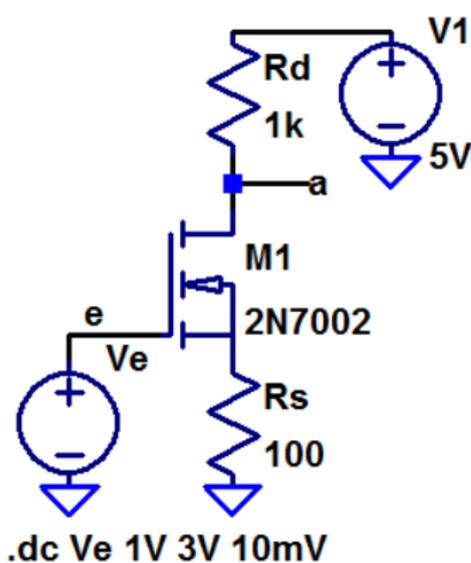
Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $U_a = f(U_e)$  für den nachfolgenden Verstärker mit einem MOS-Transistor 2N7002 im Bereich  $0 \leq U_e \leq 5 \text{ V}$ .



M1: 2N7002



## 4. Transferfunktion

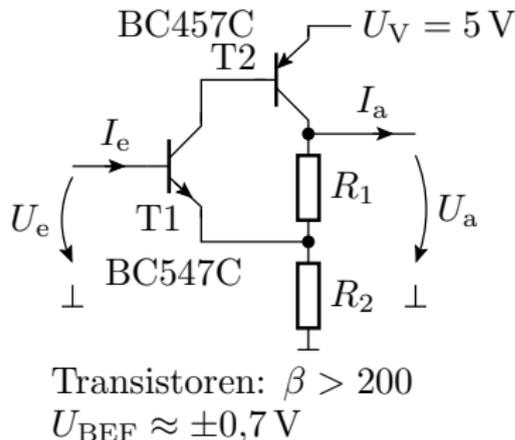


Bei Wahl des Arbeitspunkt  $U_e = 2\text{ V}$  ergibt ».tf V(a) V«:

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

## Aufgabe 2.15: BT-Verstärker

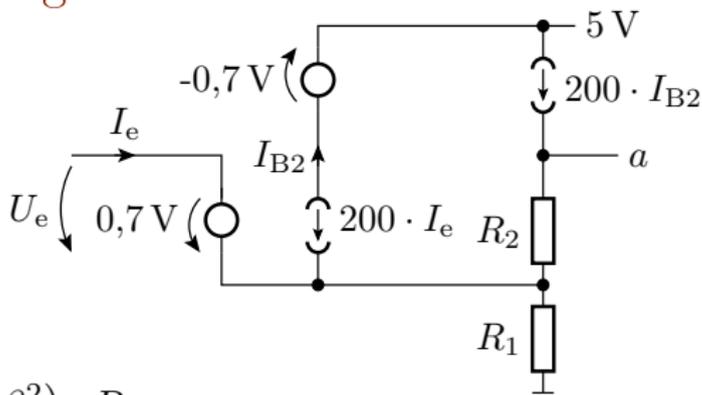
Legen Sie für den nachfolgenden Transistorverstärker  $R_1$  und  $R_2$  so fest, dass die Spannungsverstärkung  $v_u = \frac{du_a}{du_e} = 20$  und der Eingangswiderstand  $r_e = \frac{du_e}{di_e}$  mindestens  $100 \text{ k}\Omega$  beträgt.



- 1 Lineare Ersatzschaltung mit Transistoren im Nomalbereich.
- 2 Gleichungen für  $I_e = f(U_e)$  und  $U_a = f(U_e)$  abschätzen.
- 3 Daraus Gleichungen für  $v_u$  und  $r_e$  daraus ableiten.
- 4 Widerstandswerte festlegen.
- 5 Kontrolle durch Simulation: Kennlinie bestimmen, Arbeitspunkt festlegen,  $v_u$  und  $r_e$  im Arbeitspunkt bestimmen, nachbessern, ...



## Lineare Ersatzschaltung



$$U_e = U_{BEF} + I_e \cdot (1 + \beta + \beta^2) \cdot R_2$$

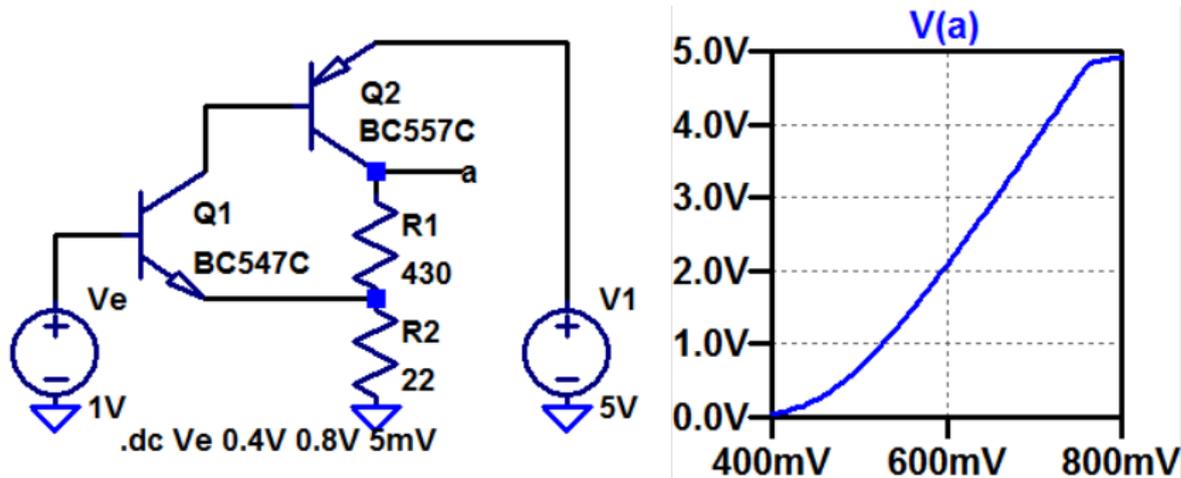
$$\text{Eingangswiderstand: } r_e \approx \beta^2 \cdot R_2$$

$$\text{Auswahl: } R_2 = 22\Omega$$

$$U_a \approx U_{R2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\text{Auswahl: } R_2 = 430\Omega$$

## Übertragungsfunktion und Arbeitspunkt

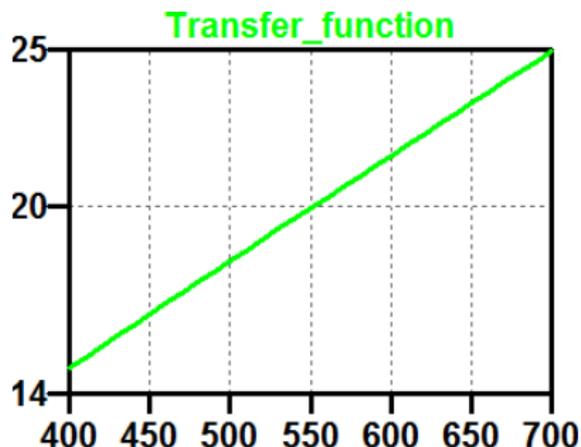
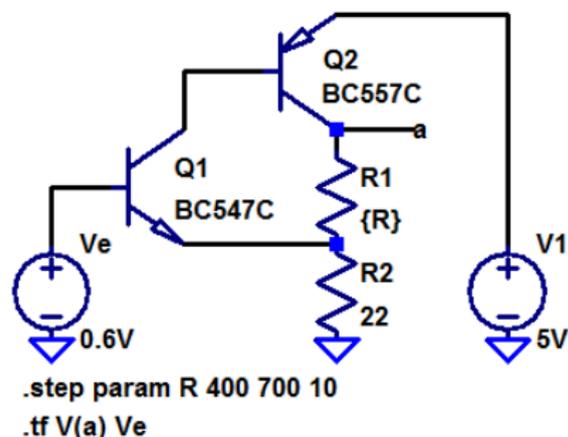


- Der Arbeitspunkt soll bei  $U_e = 0,6 \text{ V}$  liegen.
- Mit ».tf V(a) Ve« ergibt sich im Arbeitspunkt ein Eingangswiderstand von  $5 \text{ M}\Omega$  und eine Verstärkung von  $\approx 16$ .



## 4. Transferfunktion

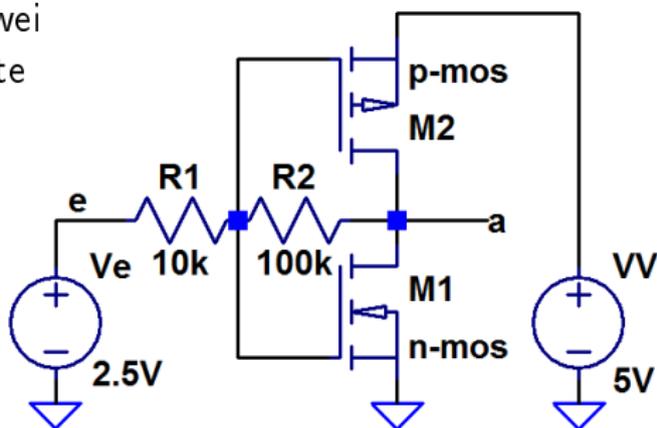
Variation von  $R_2$  zur Anpassung von  $v_u$



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.



```
.model n-mos NMOS(VT0=1V, Kp=2e-2, lambda=2e-2)
.model p-mos PMOS(VT0=-1V, Kp=2e-2, lambda=2e-2)
.tf V(a) Ve
```

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



### Lösung zum Vergleich

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

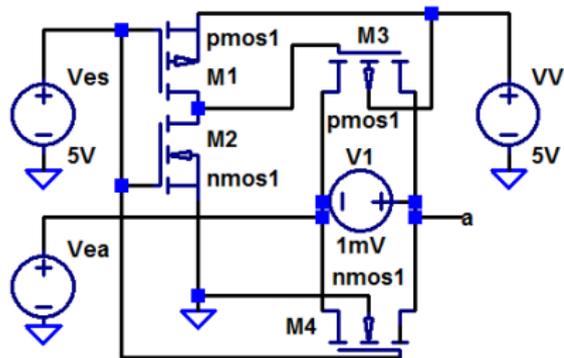
```
Transfer_function: -8.62877 transfer  
ve#Input_impedance: 11424.1 impedance  
output_impedance_at_V(a): 150.685 impedance
```

- 2 Ändern der Schaltung zur Einstellung von  $|v_u| = 20$ :  
 $R_2$  muss etwa bei

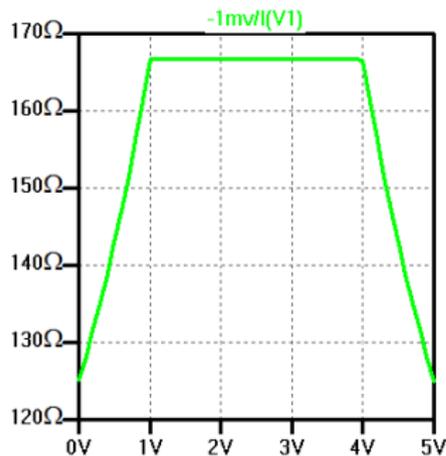
$$\frac{20}{8,629} \cdot 100 \text{ k}\Omega = 232 \text{ k}\Omega$$

liege. Kontrolle mit »durchsteppen« von  $R_2$ .

## Aufgabe 2.17: Transferrgatter



```
.model nmos1 NMOS(VT0=1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)
.model pmos1 PMOS(VT0=-1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)
.dc Vea 0 5V 0.1
```

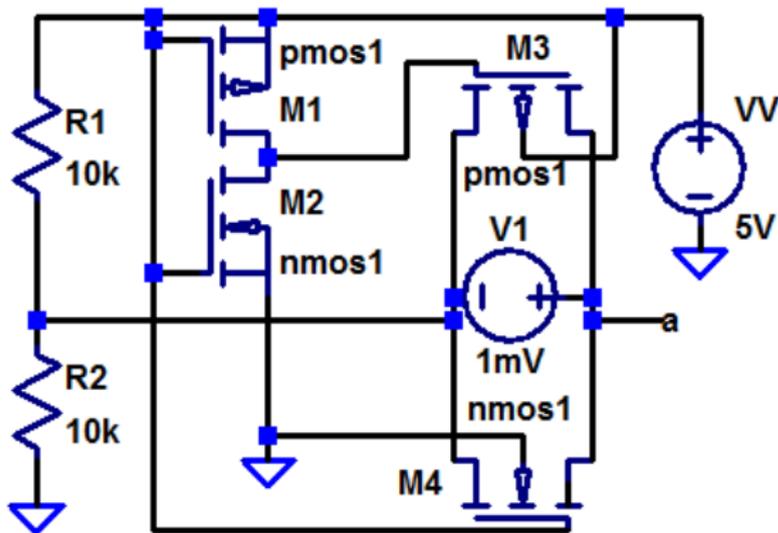


- 1 Untersuchen Sie für das Transferrgatter aus der Vorlesung, wie sich der maximale Transferwiderstand mit der Versorgungsspannung  $VV$  im Bereich von  $3\text{ V}$  bis  $5\text{ V}$  ändert.
- 2 Welche Steilheiten  $K_p$  müssen die Transistoren haben müssen, damit der Transferwiderstand bei einer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



## 4. Transferfunktion

Zu simulierende  
Schaltung  
Aufgabenteil a

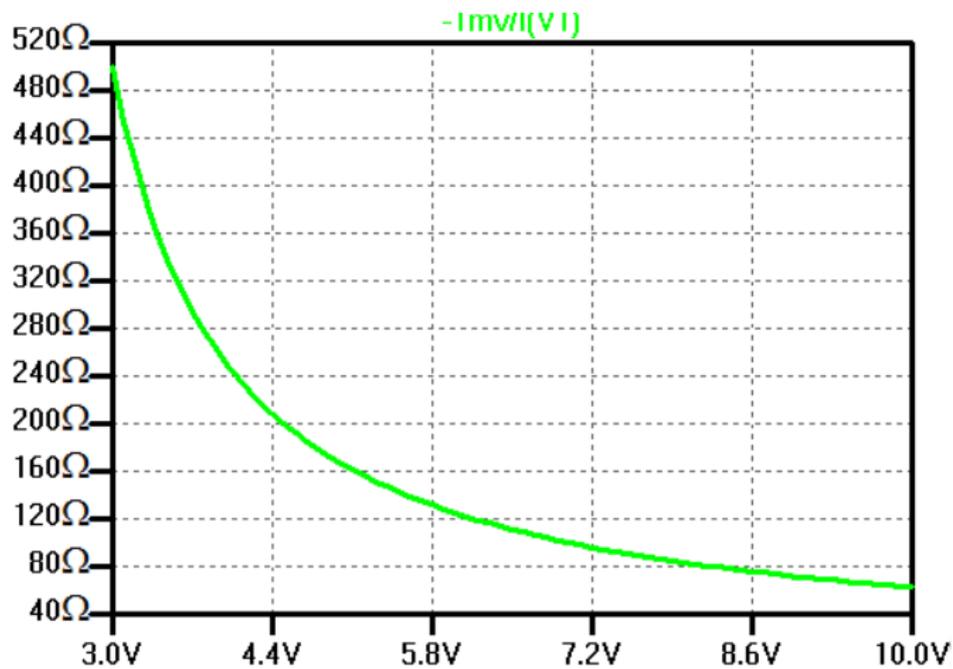


```
.model nmos1 NMOS(VTO=1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)  
.model pmos1 PMOS(VT0=-1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)  
.dc VV 3 10V 0.1
```

- 1 Anpassung:  $V_{es}=VV$  und  $V_{ea}=VV/2$  (Spannungsteiler).
- 2 Gesucht ist die »Kennlinie« mit VV als Eingabe.



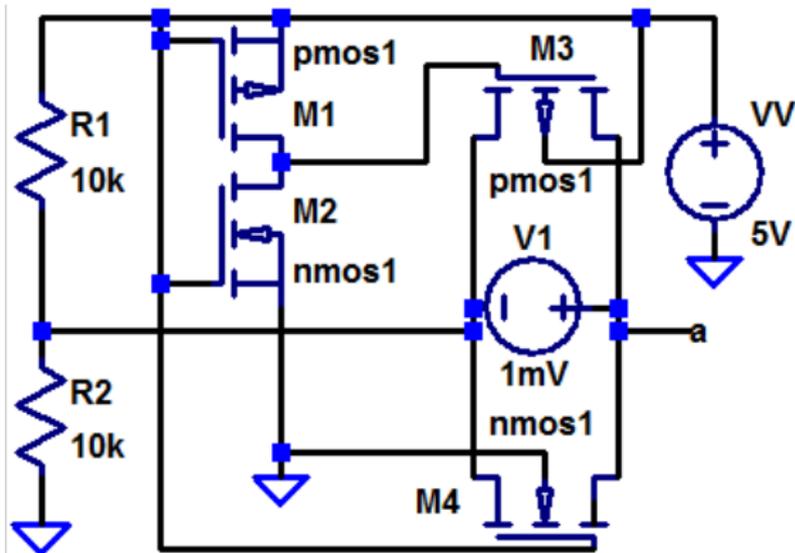
### Simulationsergebnis





## 4. Transferfunktion

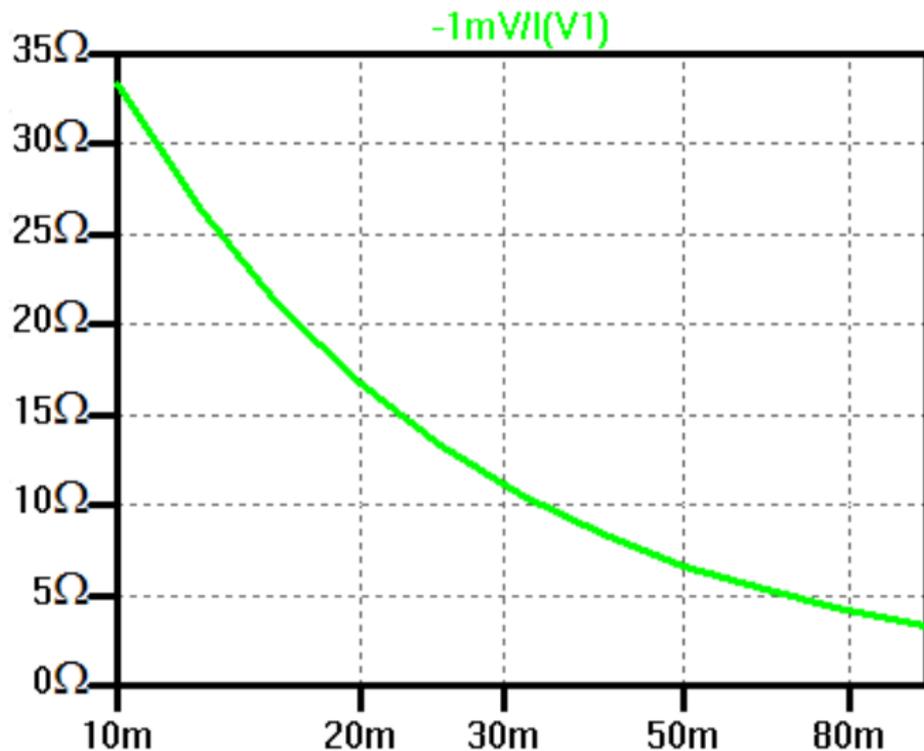
Zu simulierende  
Schaltung  
Aufgabenteil b



```
.model nmos1 NMOS(VT0=1V, Kp={k}, lambda=2e-2)  
.model pmos1 PMOS(VT0=-1V, Kp={k}, lambda=2e-2)  
.step dec param k 0.01 0.1 10  
.op
```



### Simulationsergebnis

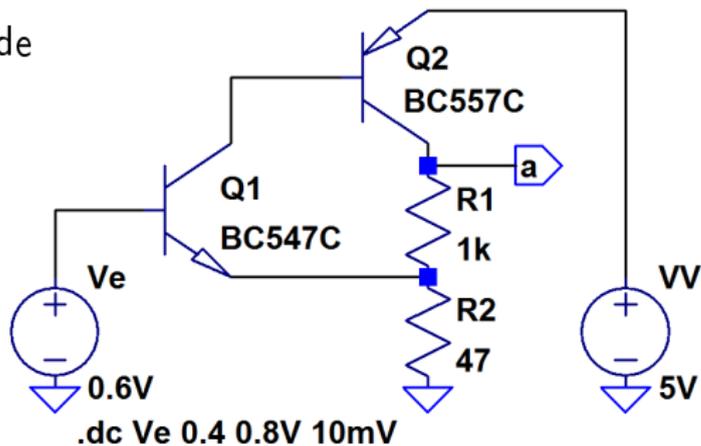




# Bauteiltoleranzen

## Aufgabe 2.18: BT-Verstärker mit Toleranzen

Gegeben ist der nachfolgende Transistorverstärker.

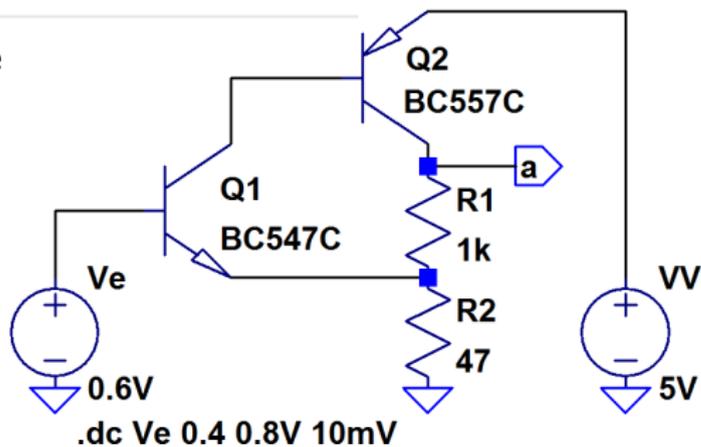


- 1 Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion und legen Sie über den Gleichanteil von  $U_e$  den Arbeitspunkt in die Mitte des Verstärkerbereichs.
- 2 Bestimmen Sie die Verstärkung, den Eingangswiderstand und den Ausgangswiderstand im gewählten Arbeitspunkt.



## 5. Bauteiltoleranzen

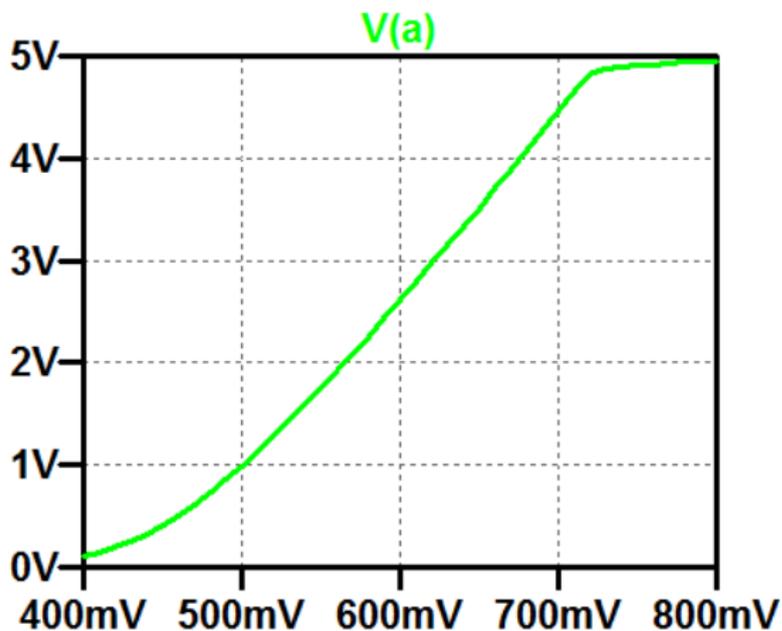
Die Widerstände sollen eine Toleranz von  $\pm 2\%$  und die Verstärkungen einen Toleranzbereich von  $450 \pm 50\%$  haben.



- Bestimmen Sie die Toleranzbereiche
  - des Gleichanteils der Ausgangsspannung und
  - der Spannungsverstärkungim Arbeitspunkt, einmal im Bezug auf jeden streuenden Parameter einzeln und einmal für alle streuenden Parameter zusammen.



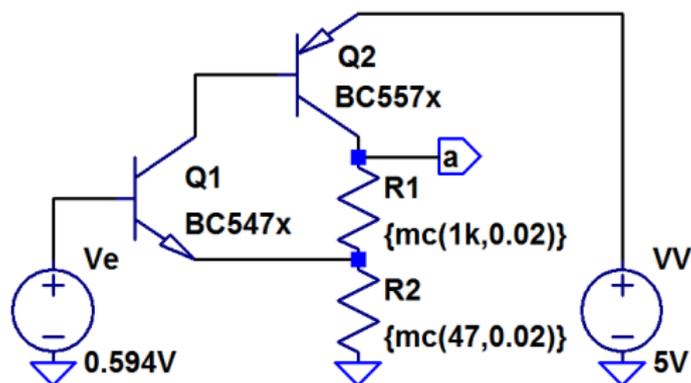
### Zur Kontrolle für Aufgabenteil 1 und 2



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

Transfer function: 17.7395 transfer

## Zur Kontrolle für Aufgabenteil 3



```
.step param run 1 100 1
.model BC547x ako:BC547C
+ NPN(Bf={mc(458.7, 0.5)})
.model BC557x ako:BC557C
+ PNP(Bf={mc(516.7, 0.5)})
.meas vamin min(V(a))
.meas vamax max(V(a))
.op
```

- nur Bf von Q1  $\pm 50\%$ :  $2,50288 \leq V(a) \leq 2,50289$
- nur Bf von Q2  $\pm 50\%$ :  $2,19623 \leq V(a) \leq 2,68476$
- nur R1  $\mp 2\%$ :  $2,45641 \leq V(a) \leq 2,54091$
- nur R2  $\mp 2\%$ :  $2,45608 \leq V(a) \leq 2,54933$
- zusammen:  $2.164 \leq V(a) \leq 2.714$

Bestimmung Verstärkungsbereich analog, nur mit .tf und min(Transfer\_function) ...