



# Elektronik II, Foliensatz 1

## Schaltungssimulation im stationären Betrieb

G. Kemnitz

Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal  
14. Mai 2014



## Organisation

Die Lehrveranstaltung Elektronik 2 setzt die Lehrveranstaltung Elektronik 1 fort und setzt die dort vermittelten Kenntnisse voraus. Studierende mit erheblichen Wissenslücken müssen sich den Stoff der Elektronik 1 selbstständig erarbeiten.

- Informationen, Foliensätze, Übungsaufgaben:

[techwww.in.tu-clausthal.de](http://techwww.in.tu-clausthal.de)

- Jede Woche eine Doppelstunde Vorlesung.
- Jede Woche Hausübungen, die in der Folgevorlesung abzugeben sind, korrigiert werden und Bonuspunkte für die Prüfung erbringen.
- 14-tägig eine Doppelstunde Übung, teils im Hörsaal und teils im Übungsraum.
- Prüfung: Laboraufgabe + mündlich



# Einleitung



## Einleitung

- Die Elektronik entwickelt sich sehr schnell.
- Welches Wissen ist auch noch in 10 bis 20 Jahren nützlich?
  - Ein physikalisches Grundverständnis.
  - Techniken der Modellierung, Simulation und für den Entwurf.
  - Erarbeiten von Wissen aus Büchern.
  - Gesundes Einschätzungsvermögen, was machbar ist.
- Säulen der Wissensvermittlung:
  - Physik: Hauptsächlich die ortsunabhängigen Zusammenhänge<sup>1</sup>, Dreckeffekte, Halbleiter, elektrisch lange Leitungen.
  - Systemtheorie: Linearisierung, Ersatzschaltungen, Handwerkszeug<sup>2</sup>, Frequenzraum, ...
  - Schaltungstechnik: Musterlösungen zur Anpassung an die eigenen Anforderungen.

---

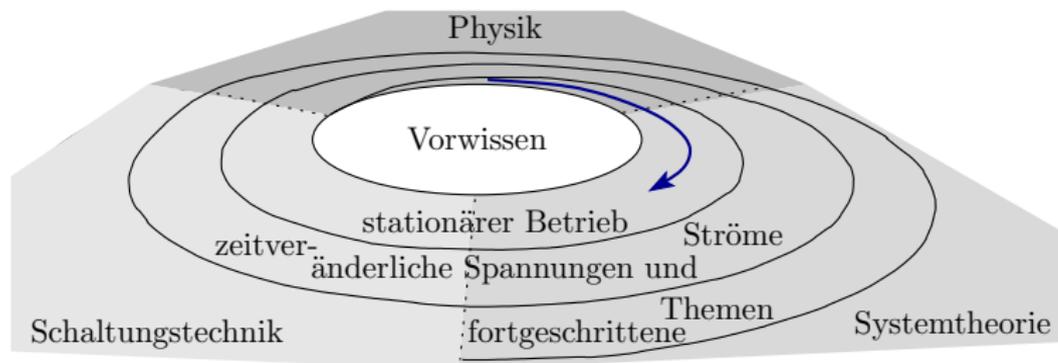
<sup>1</sup>Das wichtigste Modell in der Elektronik, der Schaltplan, vernachlässigt die Geometrie und Anordnung der Bauteile als unwesentliche Details.

<sup>2</sup>Spannungsteiler, Überlagerungsprinzip, Zweipolvereinfachung, ...

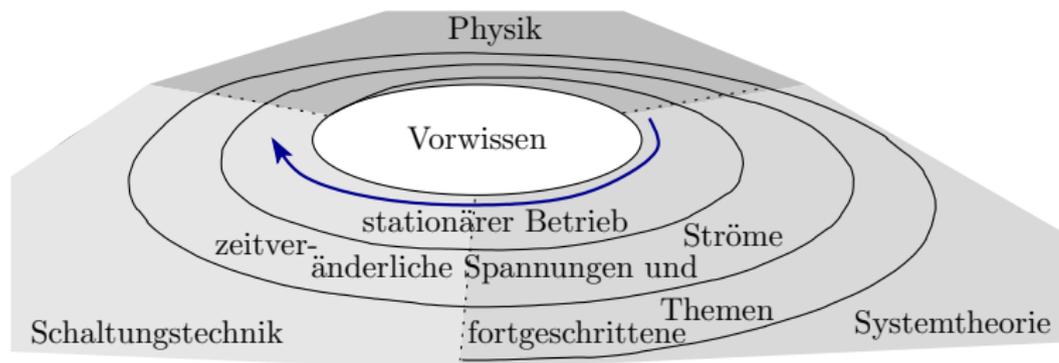


# Lernziel und Inhalt

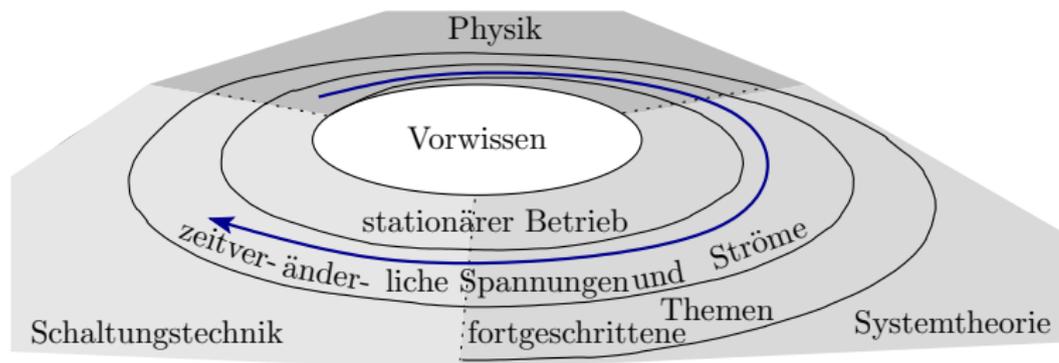
## Zusammenfassung der Lehrinhalte Elektronik I



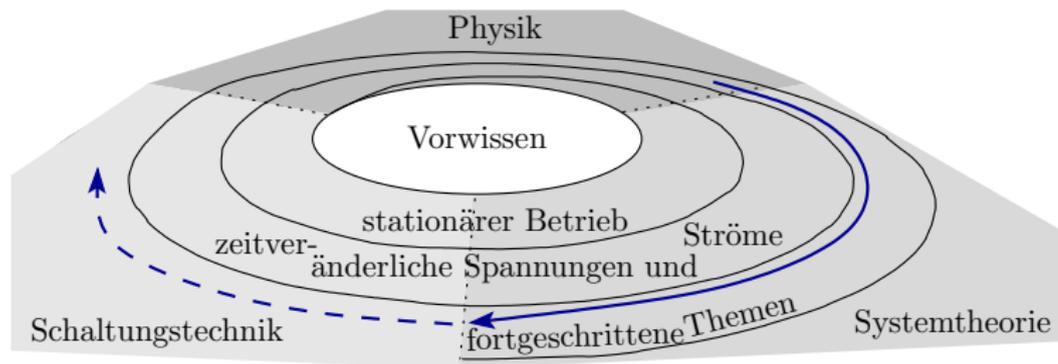
Im stationären Betrieb sind alle Ströme und Spannungen konstant. Analyse erfolgt über Maschen- und Knotengleichungen. Lösbarkeit setzt Linearität voraus. Das erfordert eine Annäherung durch lineare Ersatzschaltungen. Wir haben uns auf eine minimale Zweipolmenge beschränkt: Widerstände, konstante und gesteuerte Quellen und bei der Linearisierung auf eine bereichsweise Annäherung durch lineare Zweipole.



Das darauf aufbauende Handwerkszeug: Spannungs- und Stromteiler, Zusammenfassung von Widerständen, Zweipolvereinfachung und die Zerlegung in Überlagerungen von Schaltungen mit nur einer Quelle werden wir ständig weiter brauchen. Die behandelten Schaltungen mit Dioden, Transistoren und Operationsverstärkern werden in Elektronik II nochmal vergleichend mit den bisherigen Überschlügen und im Simulator mit genaueren Modellen untersucht.



Beim Übergang zu zeitveränderlichen Strömen und Spannungen sind zusätzlich die Kapazitäten und Induktivitäten als parasitäre Effekte und Bauteile zu berücksichtigen. Das geschaltete RC-/RL-Glied dient weiterhin zur Abschätzung der Dauer von Ausgleichsvorgängen. Die zeitdiskrete Simulation und die Analyse im Frequenzraum erfolgt im Weiteren mit dem Simulator statt mit Matlab. Die Beispielschaltungen werden etwas komplexer.



Von den fortgeschrittenen Themen werden die Leitungsvorgänge in Halbleitern und an pn-Übergängen nicht mehr nur qualitativ, sondern auch quantitativ untersucht, um die in Spice verwendeten Modell physikalisch zu untermauern. Danach folgt nur noch Schaltungstechnik.



## Foliensätze

### Vorlesung

- F1: Schaltungssimulation im stationären Betrieb
- F2: Simulation mit zeitveränderlichen Größen
- F3: Halbleiter, Dioden
- F4: Transistoren
- F5: Schaltungstechnik

### Übung

- A1: Simulation stationär
- A2: Simulation mit zeitveränderlichen Größen
- A3:
- A4:
- A5:



## Inhalt F1: Schaltungssimulation im stationären Betrieb

### Einleitung

- 1.1 Lernziel und Inhalt
- 1.2 Simulation mit LTspice

### Arbeitspunkt

- 2.1 Brückenschaltung
- 2.2 RD-Schaltung
- 2.3 Transistorschaltung
- 2.4 Aufgaben

### Kennlinie

- 3.1 Diode
- 3.2 Bipolartransistor
- 3.3 MOS-Transistor
- 3.4 Transistorverstärker

- 3.5 Operationsverstärkerschaltung
- 3.6 Aufgaben

### Transferfunktion

- 4.1 Kleinsignalverhalten
- 4.2 Vierpole
- 4.3 Simulationionsart .tf
- 4.4 Transfegatter
- 4.5 Aufgaben

### Bauteiltoleranzen

- 5.1 Sensitivitätsanalyse
- 5.2 Monte-Carlo-Simulation
- 5.3 Worst-Case-Analyse
- 5.4 E-Reihe
- 5.5 Aufgaben



# Simulation mit LTspice



## Schaltungssimulation

Simulation ist ein wichtiges Hilfsmittel für den Entwurf und vor allem für die Kontrolle des Entwurfsergebnisses. Bei richtiger Anwendung nimmt sie dem Entwerfer viel Arbeit ab.

Im Vergleich zum Bleistift-und-Papier-Entwurf:

- lassen sich mit weniger Aufwand viel mehr Lösungsvarianten
- mit genaueren Modellen untersuchen.
- Es ist aber schwerer zu erkennen, warum was wie funktioniert.

Im Vergleich zu Versuchsaufbauten

- können mit weniger Aufwand mehr Varianten untersucht und
- z.B. auch Toleranzen berücksichtigt werden.
- Es sind jedoch keine Aussagen über in den Modellen unberücksichtigte Eigenschaften, z.B. die Wirkung unberücksichtigter parasitärer Kapazitäten, möglich.



## Simulation mit LTspice

Spice wurde ursprünglich am Electrical Engineering and Computer Sciences (EECS) Fachbereich der University of California in Berkeley entwickelt und steht heute im Quellcode in Version 3f5 zur allgemeinen Verfügung.

LTspice ist eine kostenlose Software des Halbleiterherstellers Linear Technology zur Schaltungssimulation. Es basiert auf Spice, ist dazu kompatibel und besonders zur Simulation von Schaltnetzteilen geeignet<sup>3</sup>.

- Download: <http://www.linear.com/designtools/software/>
- Bedienung, Kommandos und Modelle: [scad3.pdf](#)
- zum Nachschlagen:  
<http://www.ecircuitcenter.com/SPICEsummary.htm>

<sup>3</sup>Quelle Wikipedia



## Schaltungsberechnung im stationären Zustand

- OP (Operational Point) Berechnung der Spannungen und Ströme im stationären Zustand (Arbeitspunkt).
- DC-Sweep (Direct Current Sweep) Berechnung stationärer Übertragungsfunktionen.
- TR (TRansfer function) Parameterberechnung der linearisierten Kleinsignalersatzschaltung.

Bei diesen Simulationsarten können

- mit der Step-Funktion Varianten von Parameterwerten und Modellen simuliert,
- Worst-Case und Monte-Carlo-Simulation mit vorgegebenen Verteilungen für toleranzbehaftete Parameter durchgeführt,
- die berechneten Werte graphisch dargestellt werden,
- ...



## Zeitveränderliche Spannungen und Ströme

Einbeziehung kapazitiver Ströme und Induktionsspannungen.

- AC (Alternate Current): Simulation im Frequenzraum. Setzt Linearität voraus und berechnet Amplituden und Phasenfrequenzgänge.
- noise (Rauschen) Berechnung der Rauschspannungen und Rauschströme als Funktion der Frequenz oder als Mittelwert für einen Frequenzbereich.
- trans (TRANSition) Zeitdiskrete Berechnung der Signalverläufe für beliebige Eingangssignalverläufe und auch für nichtlineare Schaltungen.
- four (FOURier transformation) Berechnung der Spektren von Signalverläufen bei der zeitdiskreten Simulation.

Auch diese Simulationen können mit Parameter- und Modellvarianten, streuenden Parameter, ... durchgeführt werden.



## Spice-Basismodell

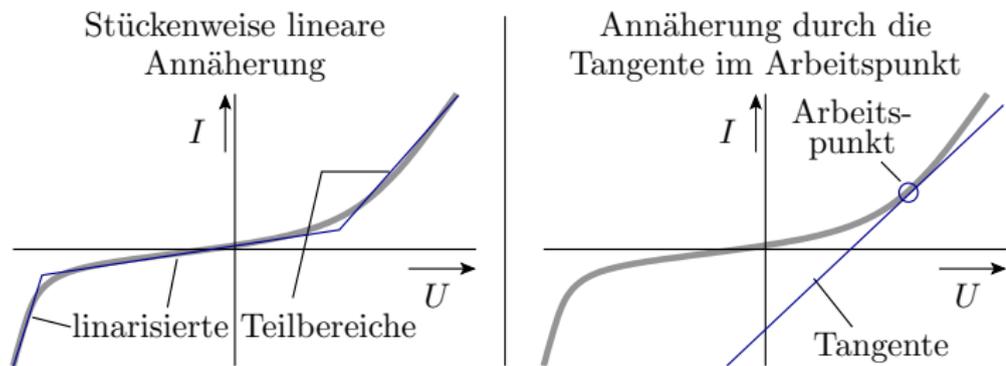
Führender Buchstabe von Bauteilbezeichnern beschreibt den Typ:

|   |                             |   |                         |
|---|-----------------------------|---|-------------------------|
| A | spezielle Funktionen        | L | Induktivität            |
| B | programmierbare Quelle      | M | MOSFET                  |
| C | Kapazität                   | O | gedämpfte Leitung       |
| D | Diode                       | Q | Bipolartransistor       |
| E | spg.-gesteuerte Spg.-quelle | S | spannungsgest. Schalter |
| F | stromgest. Stromquelle      | T | ungedämpfte Leitung     |
| G | spg.-gest. Stromquelle      | U | homogene RC-Leitung     |
| H | stromgest. Spg.-quelle      | V | Spannungsquelle         |
| I | Stromquelle                 | W | stromgest. Schalter     |
| J | Sperrschicht-FET            | X | Teilschaltung           |
| K | Gegeninduktivität           | Z | MESFET Transistor       |



# Arbeitspunkt

### Linearisierung im Arbeitspunkt



Die Schaltungsanalyse basiert physikalisch auf den kirchhoffschen Sätzen und mathematisch auf der Lösung von linearen Gleichungssystemen. In Elektronik I wurden nichtlineare Zweipolkennlinien stückweise linear angenähert. Spice nähert nichtlineare Kennlinien durch die Tangente im Arbeitspunkt an, sucht dazu mit einem Iterationsverfahren den Arbeitspunkt und führt so die Analyse auf die eines linearen Systems zurück.



## 2. Arbeitspunkt

Die folgenden Unterabschnitte zeigen an drei Beispielen

- Ersatzwiderstandsbestimmung einer Brückenschaltung aus Widerständen,
- bereichsabhängige Bestimmung der Ersatzschaltung einer Schaltung aus Widerständen und Dioden und
- einem Transistorverstärker

wie bisher (d.h. in Elektronik 1) die Spannungen und Ströme im stationären Zustand (d.h. der Arbeitspunkt) abgeschätzt wurden und wie sich dieselben Aufgaben mit dem Simulator lösen lassen.

Die Beispiele dienen gleichzeitig zur Wiederholung einiger Grundtechniken der Schaltungsanalyse aus dem Werkzeugkasten von Elektronik I, die weiterhin für die Überschlüsse benötigt werden:

- Widerstände zusammenfassen, Zweipolvereinfachung,
- Spannungsteiler, Überlagerungsprinzip und
- das Dioden- und Bipolartransistormodell.

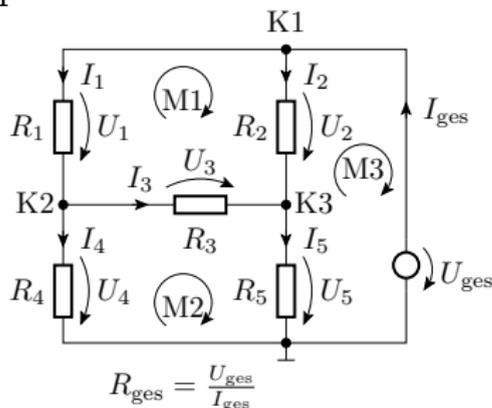
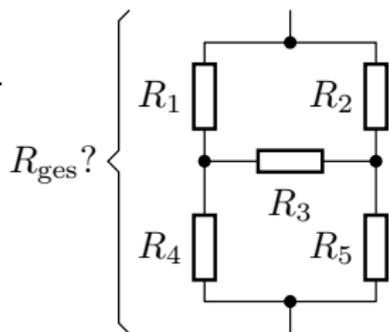


# Brückenschaltung

## Matlab vs. Analyse mit Spice

In Elektronik I gab es im Abschnitt »Handwerkszeug, Widerstandsnetzwerke« das Beispiel »Gesamtwiderstand Brückenschaltung«. In dieser Schaltung gibt es keine Widerstände, durch die derselbe Strom fließt oder über den dieselbe Spannung abfällt. Einfache Zusammenfassung nicht möglich!

Die einzige Lösung im Werkzeugkasten war die Erweiterung um eine Quelle zur Einspeisung einer Spannung, Aufstellen von 6 Gleichungen und die Berechnung des Gesamtstroms mit Matlab.





$$K1 : -I_1 - I_2 + I_{ges} = 0$$

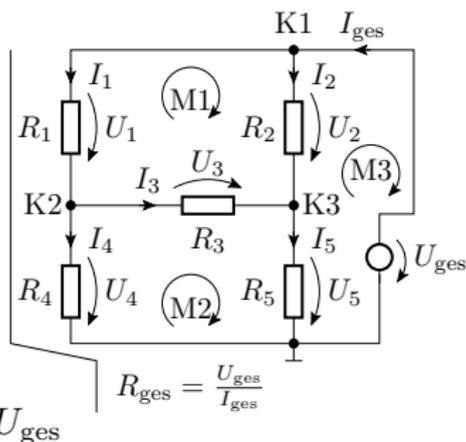
$$K2 : I_1 - I_3 - I_4 = 0$$

$$K3 : I_2 + I_3 - I_5 = 0$$

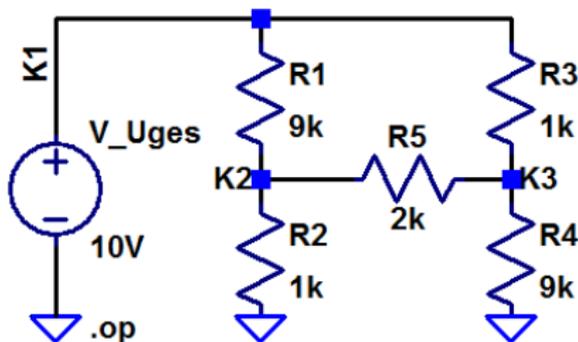
$$M1 : -R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 - R_3 \cdot I_3 = 0$$

$$M2 : -R_4 \cdot I_4 + R_3 \cdot I_3 + R_5 \cdot I_5 = 0$$

$$M3 : -R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 = -U_{ges}$$



In LTspice wird die Schaltung graphisch wie in der Abbildung mit Bauteilwerten eingegeben, als Simulationsart .op ausgewählt und die Simulation gestartet.

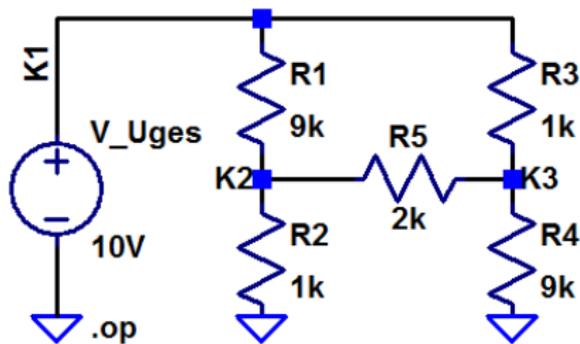




Alle Knoten müssen eine Gleichspannungsverbindung zu Masse haben.  
Die graphische Eingabe wird in eine Netzliste umgerechnet.

Netzliste:

```
R1 K1 K2 9k0hm
R2 K2 0 1k0hm
R3 K1 K3 1k0hm
R4 K3 0 9k0hm
R5 K3 K2 2k0hm
V_Uges K1 0 10V
.op
```



Spalte 1: Bauteilname; Spalte 2-3: Knoten; Spalte 4: Parameterwert.

.op (Operational Point) – Simulationskommando für Arbeitspunktberechnung. Der erste Buchstabe des Bauteilnamens beschreibt den Typ:

- R<name> Widerstand
- V<name> Spannungsquelle

Die Angabe der Maßeinheiten Ohm, V, ... hinter den Parametern ist nicht zwingend. Verbindungen, die im Schaltplan keinen Namen haben, erhalten die Netzlistenamen: N000, N001, ...

## Simulationsergebnis

Potentiale aller Knoten in Volt

$$V(k1): 10$$

$$V(k2): 2.89474$$

$$V(k3): 7.10526$$

Ströme durch alle Bauteile in A:

$$I(R5): 0.00210526$$

$$I(R4): 0.000789474$$

$$I(R3): 0.00289474$$

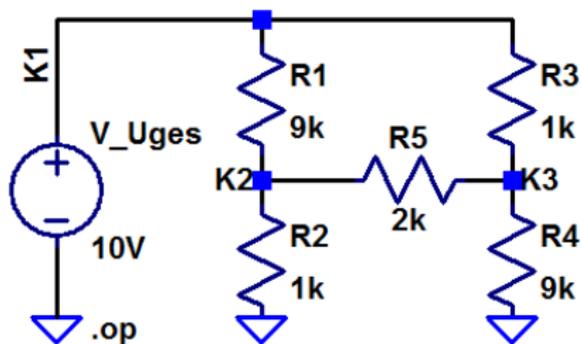
$$I(R2): 0.00289474$$

$$I(R1): 0.000789474$$

$$I(V\_uges): -0.00368421$$

Gesuchter Gesamtwiderstand:

$$R_{ges} = \frac{U_{ges}}{-I(V\_uges)} = \frac{10\text{ V}}{3,684\text{ mA}} = 3,45\text{ k}\Omega$$

Probe:  $V(k2)/I(R2)$ muss z.B.  $1\text{ k}\Omega$  sein:

$$\begin{aligned} \frac{V(k2)}{I(R2)} &= \frac{2.89474\text{ V}}{0.00289474\text{ A}} \\ &= 1\text{ k}\Omega \checkmark \end{aligned}$$



## RD-Schaltung

## Funktioniert auch mit nichtlinearen Bauteilen

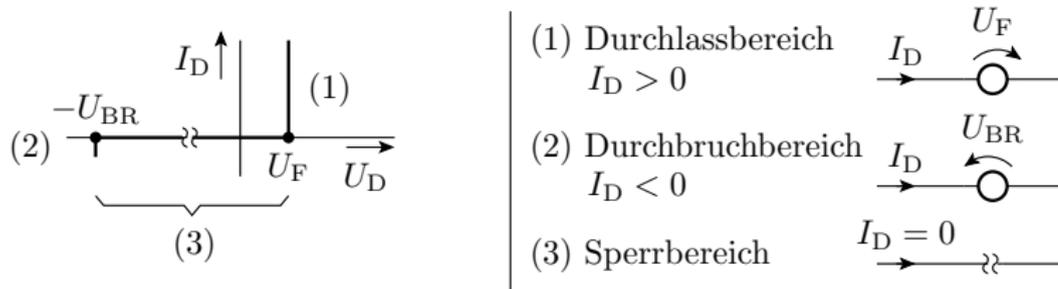
- Beispiel zur Wiederholung der Überschlüge aus Elektronik

|  | Ersatzschaltungen mit dem vereinfachten Diodenmodell |  |  |
|--|--|--|--|
|  | D1, D2 aus   | D1 aus, D2 ein   | D1 ein, D2 aus   |
|  |  |  |  |
| Gültigkeitsbereich   | sonst  | $\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4} > U_F$                    | $\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_1}{R_1+R_2} > U_F$                    |
| vereinfachter<br>Zweipol:  |  |  |  |
| Beide Dioden ein<br>oder eine Diode im Durchbruch-<br>bereich ist nicht möglich. |  | $\left( \frac{R_2}{R_2+R_4} - \frac{R_1}{R_1+R_3} \right) \cdot U_F$ | $\left( \frac{R_1}{R_1+R_3} - \frac{R_2}{R_2+R_4} \right) \cdot U_F$ |



Wie kann man das alles so schnell im Kopf überschlagen? Mit stark vereinfachten Bauteilmodellen und einem gut aufeinander abgestimmten Werkzeugkasten.

Diodenmodell:



Warum sind die anderen Arbeitsbereichskombinationen

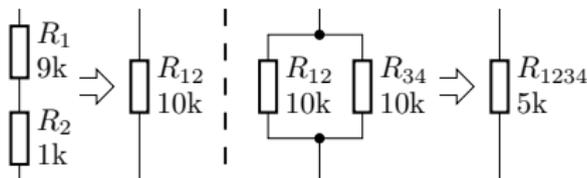
- beide Dioden ein
- eine oder beide Dioden im Durchbruchbereich

ausgeschlossen<sup>4</sup>?

<sup>4</sup>Ersatzschaltung aus nur den beiden Dioden für diese Fälle zeichnen. Bedingungen mit einzeichnen und Widerspruch erkennen, z.B. dass die Spannung über den Dioden nicht gleichzeitig  $U_F$  und  $-U_F$  sein kann.

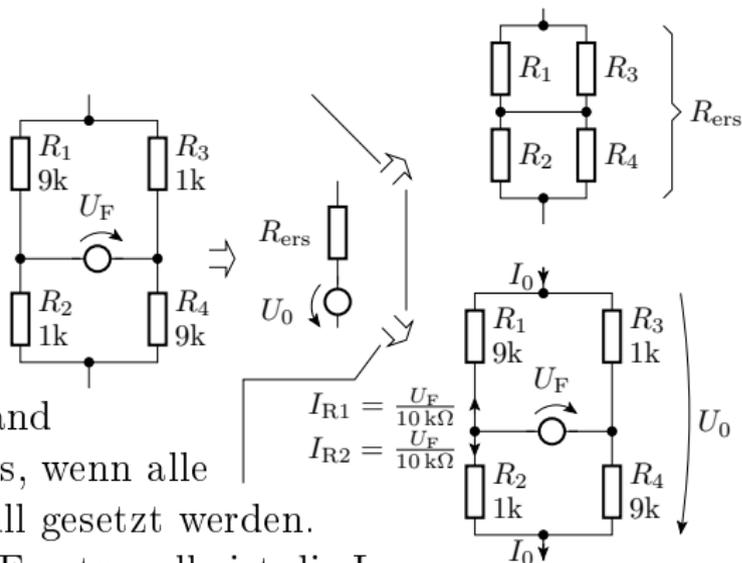
## Vereinfachung Widerstandsnetzwerke:

- Reihenschaltung:  
Widerstände addieren
- Parallelschaltung:  
Kehrwerte addieren



## Zweipolvereinfachung:

- Jeder lineare Zweipol ist mit einer Quelle und einem Widerstand nachbildbar.
- Der Ersatzwiderstand ist der des Zweipols, wenn alle Quellenwert auf null gesetzt werden.
- Die Spannung der Ersatzquelle ist die Leerlaufspannung des Zweipols.

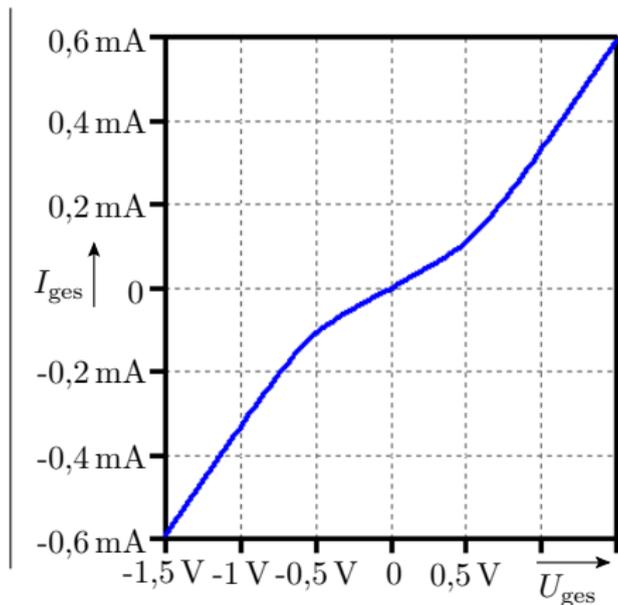
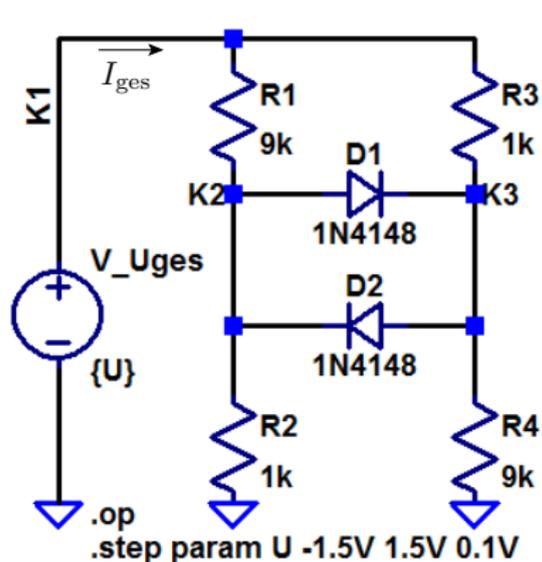


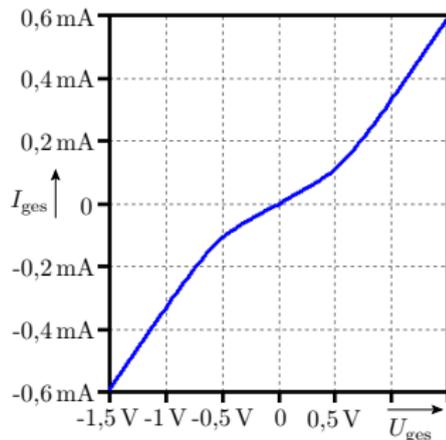
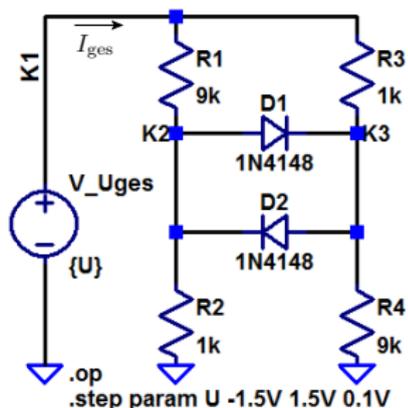
$$I_{R1} = \frac{U_F}{10 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{R2} = \frac{U_F}{10 \text{ k}\Omega}$$

## Bestimmung des Verhaltens durch Simulation

Schaltung mit einer zusätzlichen Spannungsquelle in den Simulator eingegeben und mit .op Arbeitspunkt bestimmen.





Im Beispiel ist die Quellenspannung der Parameter »U«, der in der `.step`-Anweisung die Werte -1,5V bis 1,5V in 0,1V-Schritten durchläuft. Rechts ist der Gesamtstrom in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt. Die drei vorhergesagten Bereiche sind erkennbar. Kontrollfrage für das Selbststudium:

- Schätzen Sie aus der Abbildung rechts  $U_{ges} = U_0 + R_{ers} \cdot I_{ges}$  (linearisierte Näherung) für alle drei Bereich ab und Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen auf Folie 4.



# Transistorschaltung

## Arbeitspunkt einer Transistorschaltung

In der nachfolgenden Schaltung vergrößert  $U_a$  die Spannung über  $R_B$ , darüber  $I_B$ , darüber  $I_{RC}$ , was wiederum  $U_a$  verringert (Spannungsgegenkopplung). Wie stark beeinflusst eine Schwankung von  $\beta = 100 \dots 300$  die Ausgangsspannung im Arbeitspunkt?

$U_V = 5V$

$R_B$   
100 k

$R_C$   
1 k

$U_a$

Transistorersatzschaltung im Normalbetrieb

C B C

B E E

Ersatzschaltung für den Überschlag

$I_B$

$U_{BEFF} \approx 0,7V$

$\beta \cdot I_B$

$R_B$

$U_V$

$R_C$

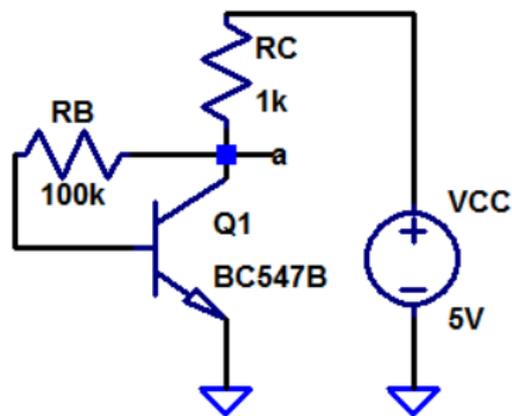
$U_a$

$$I_B = \frac{U_a - U_{BEFF}}{R_B}; \quad U_a = U_V - \beta \cdot R_C \cdot \frac{U_a - U_{BEFF}}{R_B}$$

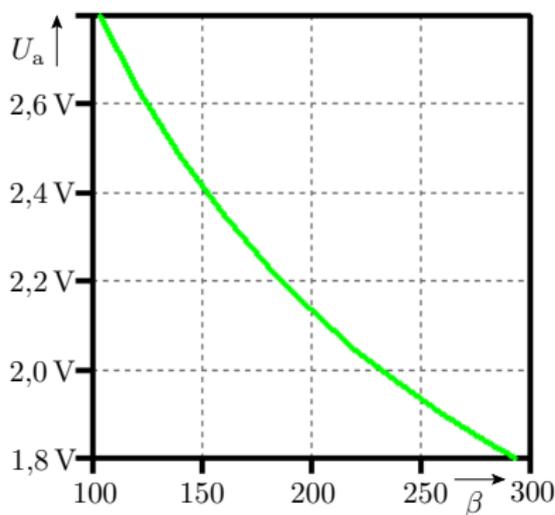
$$U_a \cdot \left(1 + \frac{\beta \cdot R_C}{R_B}\right) = U_V + \frac{\beta \cdot R_C}{R_B} \cdot U_{BEFF} = U_V - U_{BEFF} + \left(1 + \frac{\beta \cdot R_C}{R_B}\right) \cdot U_{BEFF}$$

$$U_a = \frac{U_V - U_{BEFF}}{1 + \frac{\beta}{100}} + U_{BEFF} = \frac{4,3V}{2 \dots 4} + 0,7V \approx 1,8 \dots 2,9V$$

## Dieselbe Abschätzung per Simulation



```
.op
.step NPN BC547B(Bf) 100 300 20
```

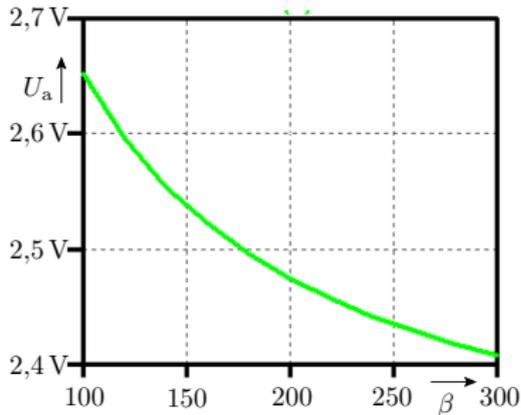
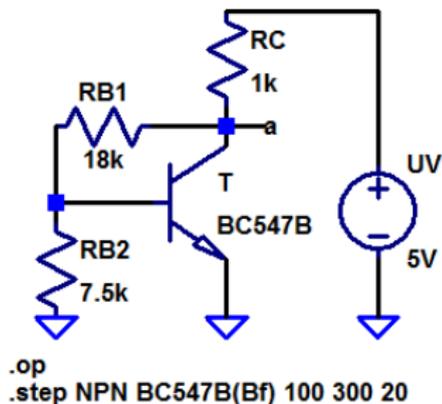


Mit  $\frac{\beta \cdot R_C}{R_B} \gg 1$  strebt  $U_a$  gegen  $U_{BEF}$  (siehe Folie zuvor). Mit  $R_B \leq 10 \cdot R_C$  hätte  $\beta$  kaum noch Einfluss auf den Arbeitspunkt, aber  $U_{BEF}$  ist zu klein. Wie könnte man den Wert, gegen den  $U_a$  mit zunehmenden  $\beta$  strebt, auf  $\approx 3 \cdot U_{BEF}$  vergrößern?

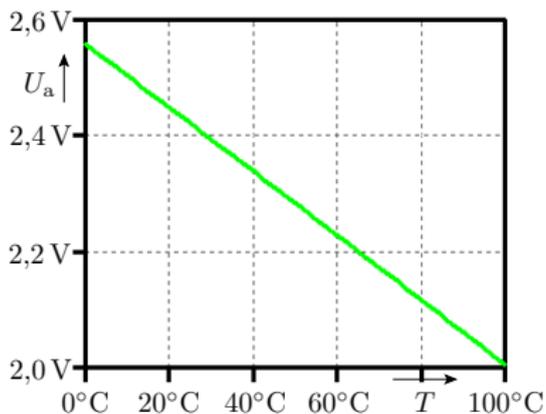
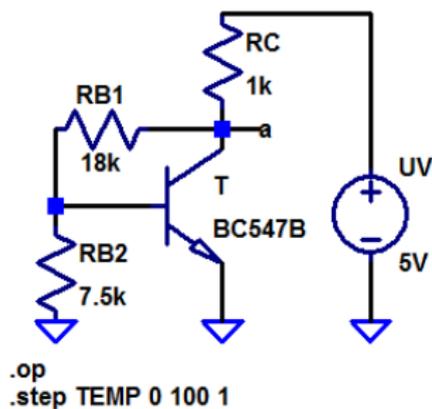


Ein Widerstand von der Basis zur Masse reduziert bei gleicher Ausgangsspannung  $U_a$  den Basisstrom, so dass sich eine höhere Ausgangsspannung  $U_a$  einstellen wird.

Aufgabe: Suche eines geeigneten Basisspannungsteilers, der für  $\beta = 100 \dots 300$   $U_a = 2,5 \text{ V} \pm 5\%$  einstellt.



Wenn etwa bekannt ist, wie sich die  $R_{B1}$  und  $R_{B2}$  auf die Streuung von  $U_a$  auswirken, mit ca. 10 Simulationsversuchen lösbar.



Mit Simulation lassen sich viele Schaltungsvarianten ausprobieren. Man kann ohne großen Zusatzaufwand die Fragestellung erweitern, bleibt der Arbeitspunkt

- innerhalb des vorgesehenen Bereichs für die Betriebstemperatur und
- wenn auch die Toleranzen der anderen Bauteile und Transistorparameter berücksichtigt werden

im vorgegeben Toleranzbereich?



# Aufgaben



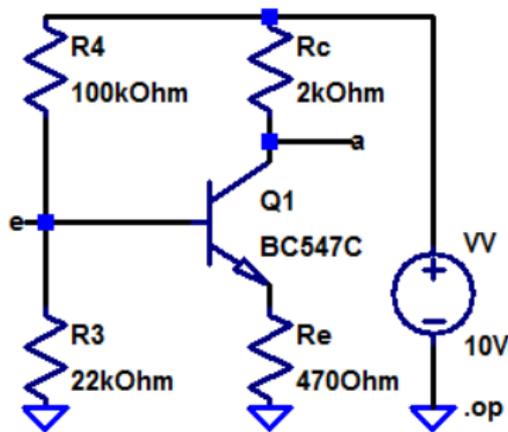
### Aufgabe 2.1: Netzliste und Schaltung

Zeichnen Sie die Schaltung, die die nachfolgende Netzliste beschreibt:

```
V1 N001 0 10  
R1 N001 N002 1k  
R2 0 N002 2k  
R3 N002 N003 1k  
R4 0 N003 1k
```

## Aufgabe 2.2: 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.



## Aufgabe 2.3: Temperaturabhängigkeit

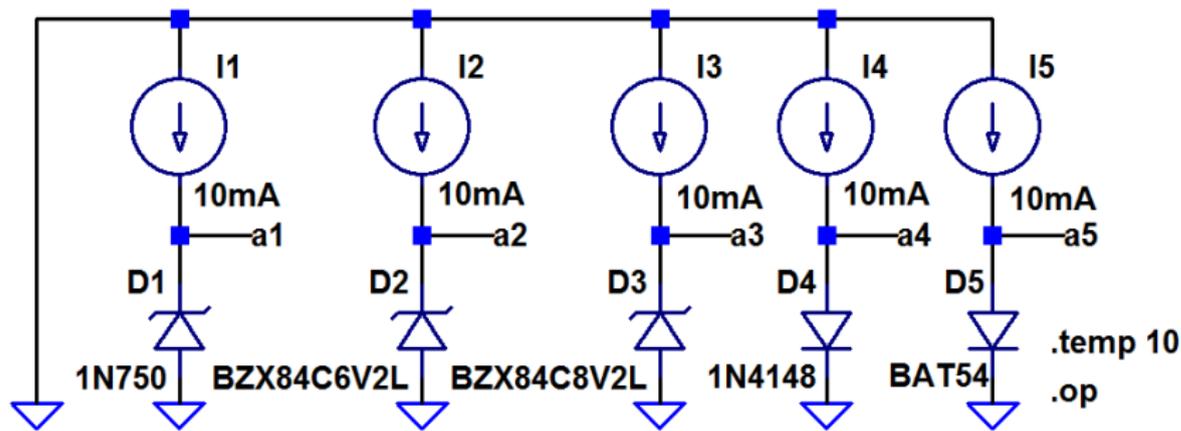
- 1 Bestimmen Sie mit der Testschaltung auf der nächsten Folie für einen Durchbruch- bzw. Durchlassstrom von 10mA
  - die Durchbruchspannung der Z-Dioden 1N750, BZX84C6V2L und BZX84C8V2L und
  - die Flussspannungen der Standarddiode 1N4148 und der Schottky-Diode BAT54

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

- 2 Errechnen Sie aus den Werten die Temperaturkoeffizienten  $\kappa$  der Durchbruch- bzw. Flussspannungen als Spannungsänderung je Grad nach der Formel:

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

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



Die Ergebnisse werden in das »ErrorLog« gespeichert.

## Aufgabe 2.4: Messbrücke mit Dehnmessstreifen

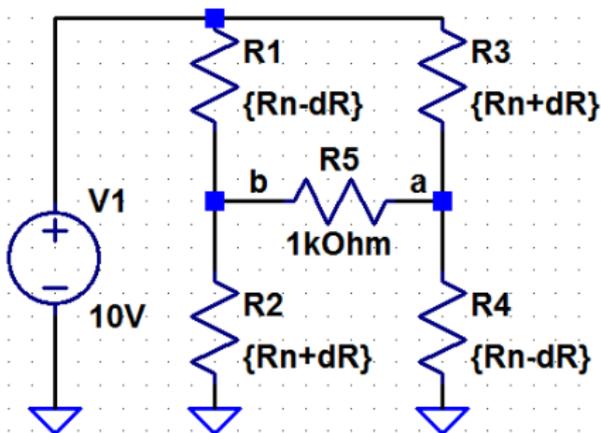
Dehnmessstreifen bestehen aus einer wenige  $\mu\text{m}$  dicken zwischen einer Träger und einer Abdeckfolie eingeschweißten Metallfolie z.B. aus Konstantan und ändern ihren Widerstand in Abhängigkeit von der relativen Dehnung  $\varepsilon$  nach der Beziehung

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

( $\varepsilon$  – Verhältnis Längenänderung zu Länge;  $R_N$  – Nennwiderstand;  $K$  – Dehnempfindlichkeit, für ein Konstantan-Metallfolie  $K \approx 2$  [PB10]). Bestimmen Sie für die nachfolgende Brückenschaltung<sup>5</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  $\varepsilon \in [-10^{-4}, 10^{-4}]$ .

---

<sup>5</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.



```

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



# Kennlinie



### Kennlinienberechnung (DC Sweep)

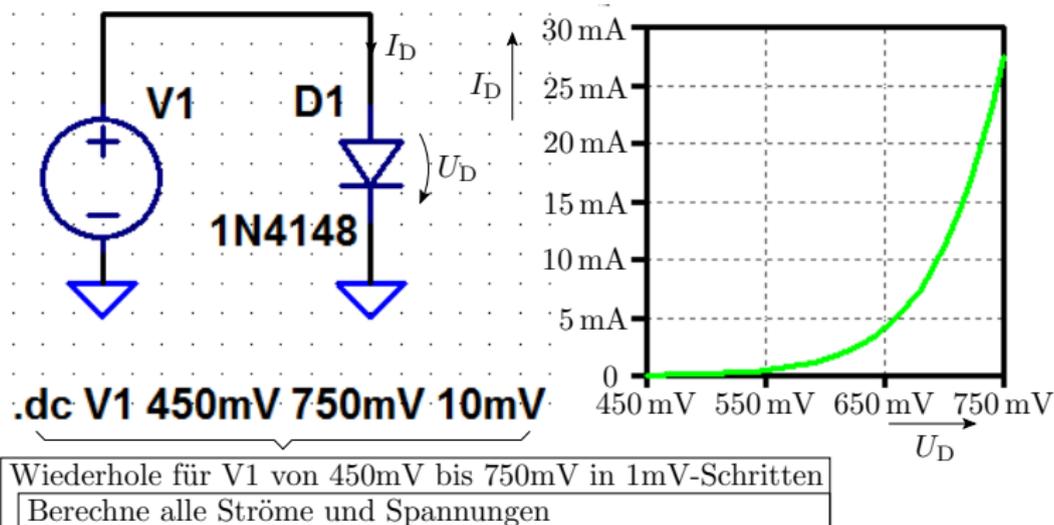
Kennlinien beschreibt den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabegrößen von Bauteilen und Schaltungen. Ein DC Sweep berechnet die Kennlinie für quasi-stationäre Eingaben, d.h. für so langsame Eingabeänderungen, dass alle kapazitiven Ströme und alle Spannungsabfälle über Induktivitäten vernachlässigt werden können.

Es werden die Kennlinien der Modelle für echte Bauteile (Diode, Bipolar- und MOS-Transistor) und eine Transistorschaltung simuliert und mit den bisherigen Modellrechnungen verglichen.



# Diode

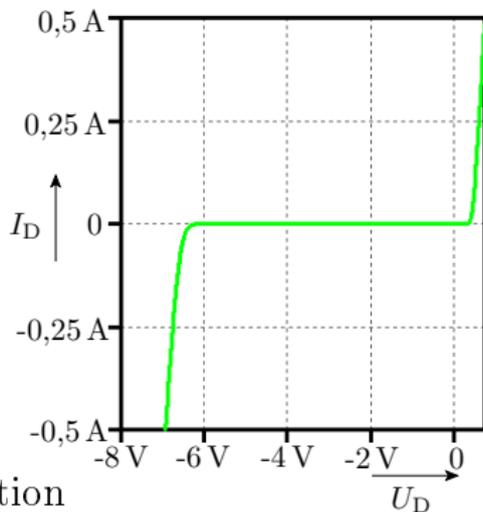
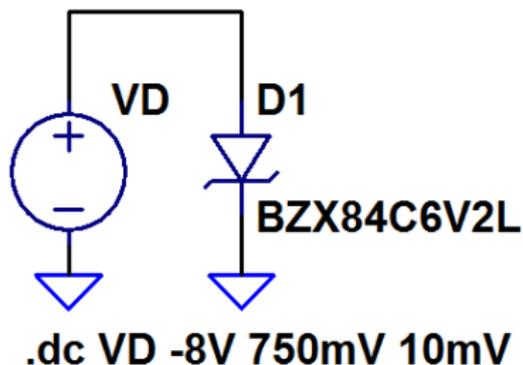
## Diodenkennlinie (Kleinsignaldiode 1N4148)



Eine reale Diode verhält sich offenbar anders als unser bisheriges vereinfachtes Modell mit den drei linearen Kennlinienästen für Durchlass-, Sperr- und Durchbruchbereich. Sieht eher wie eine Exponentialfunktion aus (siehe später Foliensatz F3).

## Simulation des Durchbruchverhaltens

Das Simulationsmodell der Diode 1N4148 hat keinen Durchbruchbereich. Der Diodenstrom steigt bei Überschreitung der zulässigen Sperrspannungen nicht nennenswert an (Ausprobieren!). Einen Durchbruchbereich haben nur die mitgelieferten Z-Dioden-Modelle:



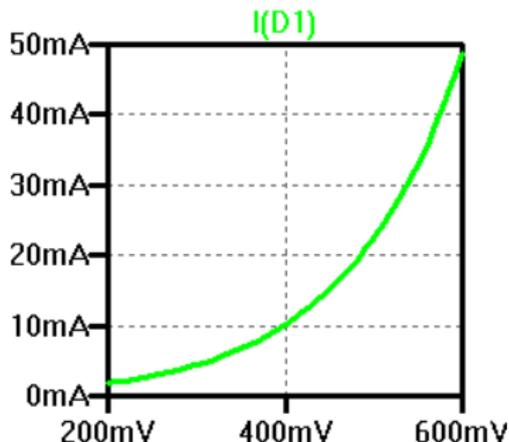
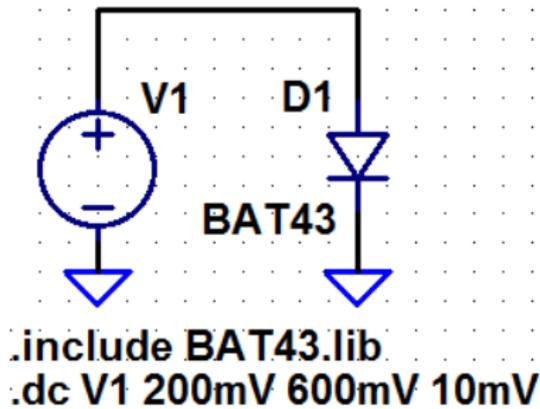
Bauteilmodelle vor/bei der Simulation auf Plausibilität prüfen!

## Woher bekommt Bauteilmodelle?

Die im Praktikum verwendete Schottky-Diode BAT43 fehlt z.B. in der LTspice-Bibliothek. Unter dem Suchbegriff »spice model BAT43« findet man im Internet unter »[http://www.ee.siue.edu/...DIODE\\_ST\\_10.lib](http://www.ee.siue.edu/...DIODE_ST_10.lib)« folgende Beschreibung:

```
*****
* Model name       : BAT43
* Description      : Small Signal Schottky Diode
* Package type    : D035
*****
.MODEL BAT43 D IS=480.77E-6 N=4.9950 RS=40.150E-3
+ IKF=20.507 EG=.69 XTI=2 CJO=13.698E-12 M=.50005
+ VJ=.38464 ISR=10.010E-21 FC=0.5 NR=4.9950 TT=0
```

- Speichern als BAT43.lib im Arbeitsverzeichnis von LTspice.
- Einbinden mit einer include-Anweisung.
- Die Bedeutung der Parameter siehe später Foliensatz F3.

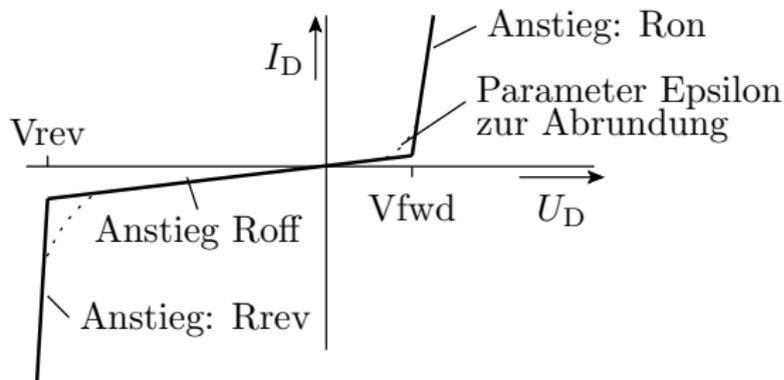


In einem Include-File können viele Modelle, aber auch die Spice-Anweisungen, die sonst in das Bild geschrieben werden, stehen.

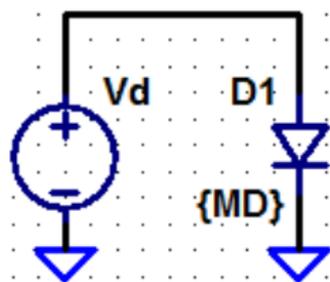
Wenn kein Bauteil im Internet zu finden ist, Modell selbst entwickeln:

- aus Angaben in Datenblättern oder
- durch Messen der Kennlinie und Parameteranpassung.

Für Dioden unterstützt der Simulator außer dem physikalischen Modell (siehe später Foliensatz F3) ein empirisches Modell, das dem bisher verwendeten ähnelt.

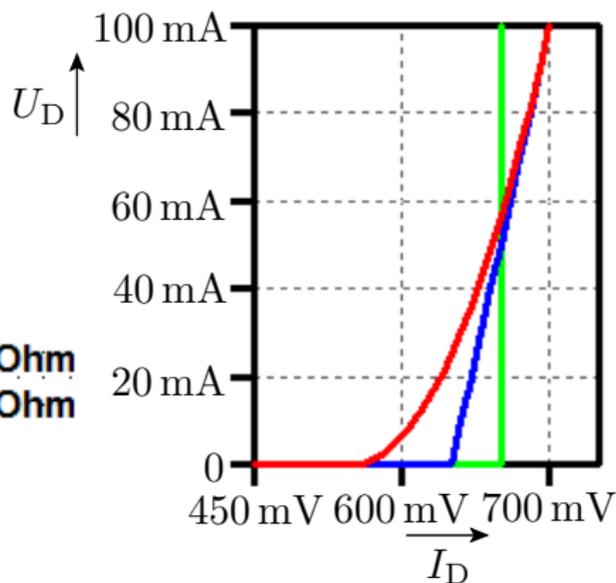


Kennlinienparameter:  $V_{fwd}$  – Flussspannung,  $V_{rev}$  – Durchbruchspannung;  $R_{...}$  – Ersatzwiderstände für alle drei Kennlinienäste; Epsilon – Parameter zur empirischen Abrundung der Übergänge zwischen den Bereichen.



```

.model 1 D(Vfwd=0.7V)
.model 2 D(Vfwd=0.65V Ron=10ohm
+ Epsilon=0.2V )
.step param MD list 1 2 3
.dc Vd 450mV 800mV 10mV
    
```



Für die Diode sind drei Modelle mit den Namen 1 bis 3 vereinbart, die mit der Step-Funktion nacheinander simuliert werden:

- 1 Flussspannung 0,7V, alle anderen Parameter Standardwerte.
- 2 Flussspannung 0,65 V und 1  $\Omega$  Durchlasswiderstand.
- 3 Flussspannung niedriger plus Abrundung.



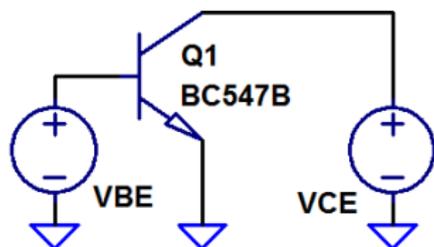
## Einige Schlussfolgerungen

- Das bisherige Diodenmodell aus Elektronik I nähert die Strom-Spannungs-Beziehung einer Diode nur sehr grob an. Genauere Schaltungsberechnungen verlangen genauere Modelle mit mehr Parametern.
- Simulationsmodelle berücksichtigen u.U. nur die für die Zielanwendung wesentlichen Eigenschaften (im Beispiel keinen Durchbruchbereich). Deshalb ist es wichtig, die Ergebnisse einer Schaltungssimulation auf Plausibilität zu prüfen, d.h. zusätzlich Überschlüsse durchzuführen.
- Ein Bauteilmodell hat ein parametrisiertes Grundmodell, dessen Parameter so eingestellt werden, dass das simulierte Verhalten gut mit dem an einem echten Bauteil messbaren Verhalten übereinstimmt.



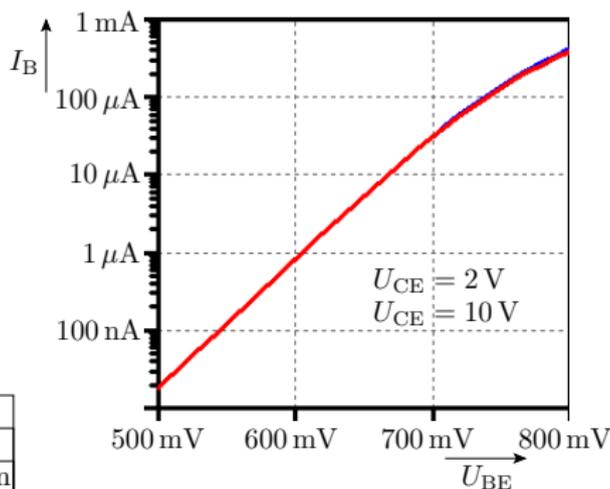
# Bipolartransistor

## Transistorkennlinie

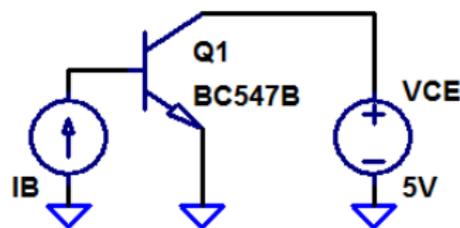


.dc VBE 500mV 800mV 10mV  
+ VCE list 2V 10V

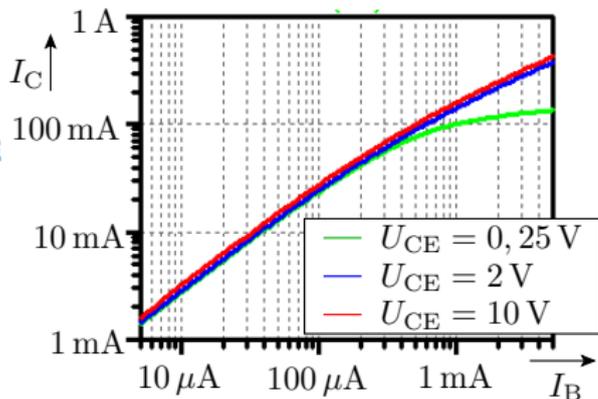
|  |
|--|
| Wiederhole für $U_{CE} \in \{2V, 10V\}$                    |
| Wiederhole für $U_{BE} = 500\text{ mV bis } 800\text{ mV}$ |
| Berechnung aller Ströme und Spannungen                     |



- Der Basisstrom verhält sich gegenüber der Basis-Emitter-Spannung wie im physikalischen Diodenmodell. Für geringe Basisströme e-Funktion.
- Die Kennlinien für unterschiedliche  $U_{CE}$  liegen fast übereinander, d.h. kaum Abhängigkeit von  $U_{CE}$ .



```
.dc oct IB 5uA 5mA 10 VCE
+ list 0.25V 2V 10V
```



- Bis  $I_B \approx 100 \mu\text{A}$  verhält sich der Kollektorstrom näherungsweise proportional zum Basisstrom.
- Ab  $I_B \approx 100 \mu\text{A}$  nimmt die Verstärkung deutlich ab.
- Für  $U_{CE} \approx 250 \text{ mV}$  geht der Transistor ab  $I_B \approx 300 \mu\text{A}$  in die Übersteuerung (kaum Zunahme von  $I_C$  mit  $I_B$ ).
- Die Verstärkung nimmt mit  $U_{CE}$  zu.



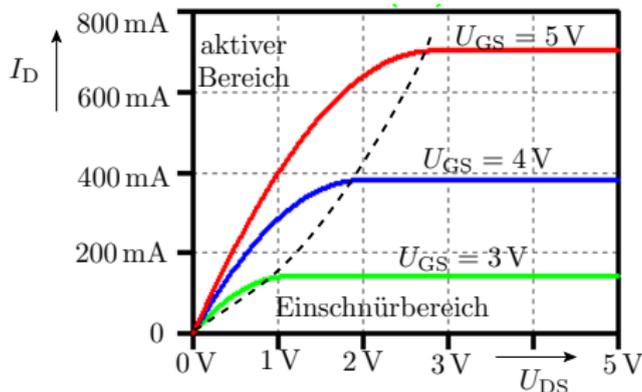
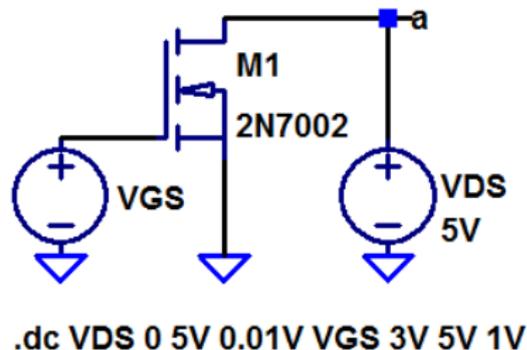
## Schlussfolgerungen

- Das bisherige verwendete Bipolartransistormodell unterstellt, damit die Schaltungsberechnung einfach bleibt, im Normalbetrieb eine Basis-Emitter-Flussspannung von  $\approx 0,7\text{ V} \pm 20\%$  und eine Stromverstärkung von  $\approx 200 \pm 50\%$ .
- Die Simulation veranschaulicht, dass die großen Toleranzen von  $\beta$  und  $U_{\text{BEF}}$  des bisherigen Modells aus Elektronik I kein zufälligen Streuungen sind, sondern überwiegend Abhängigkeiten vom Basisstrom und von der Kollektor-Emitter-Spannung.
- Mit mehr Parametern und mehr Rechenaufwand lässt sich ein Bipolartransistor viel genauer modellieren.



# MOS-Transistor

## Kennlinie einen MOS-Transistors



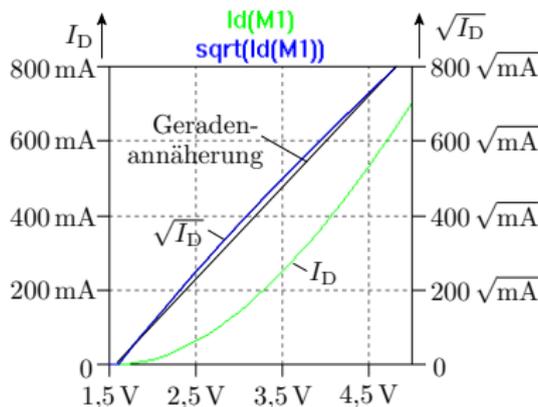
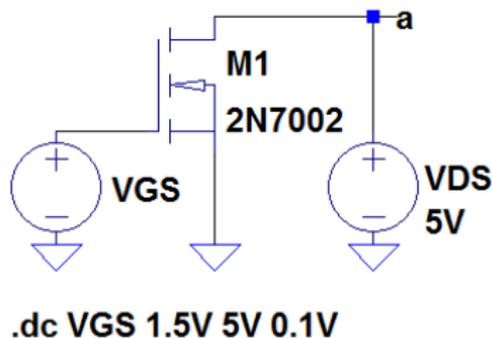
Bisher verwendete Kennliniengleichung:

$$I_D = K \cdot \begin{cases} 0 & \text{Sperrbereich} \\ (U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} & \text{aktiver Bereich} \\ \frac{(U_{GS} - U_{th})^2}{2} & \text{Einschnürrbereich} \end{cases}$$

Nach der Kennliniengleichung lassen sich die beiden Modellparameter ( $K$  – Steilheit,  $U_{th}$  – Einschaltspannung) am besten im Einschnürbereich aus dem Zusammenhang

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{K}{2}} \cdot (U_{GS} - U_{th})$$

abschätzen, weil da  $I_D \neq f(U_{DS})$ . Die nachfolgend Simulation zeigt, dass das auch ungefähr so gilt.



Für  $U_{DS} = 3\text{ V}$  und  $4\text{ V}$  ergibt die Simulation denselben Verlauf.



Die Wurzel aus dem Drainstrom

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{K}{2}} \cdot (U_{GS} - U_{th})$$

hat die Geradengleichung:

$$\sqrt{I_D} = 0,3 \frac{\sqrt{\text{mA}}}{\text{V}} \cdot (U_{GS} - 1,6 \text{ V})$$

Daraus ergibt sich für die Steilheit

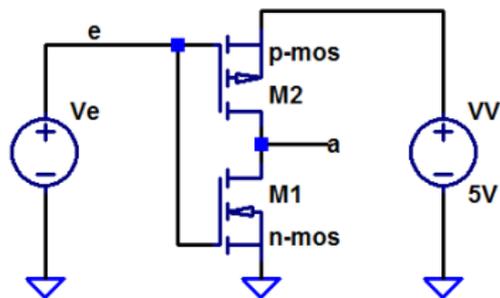
$$K \approx 114 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

und die Einschaltspannung:

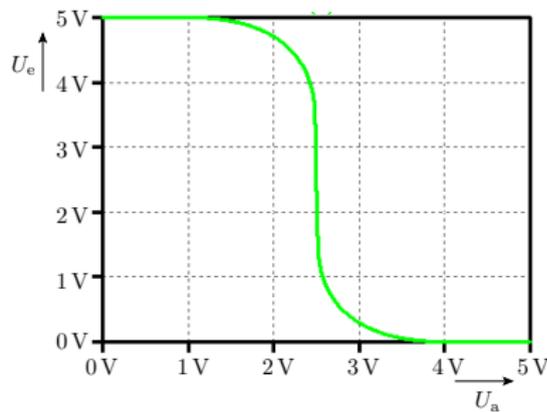
$$U_{th} = 1,6 \text{ V}$$

Das in Elektronik I verwendete Modell ähnelt dem implementierten Spice-Modell zumindest für den Beispieltransistor und im Vergleich zum Dioden- und Bipolartransistormodell sehr.

## Simulation eines CMOS-Inverters



```
.model n-mos NMOS(VTO=1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)
.model p-mos PMOS(VTO=-1V, Kp=2e-3, lambda=2e-2)
.dc Ve 0 5V
```



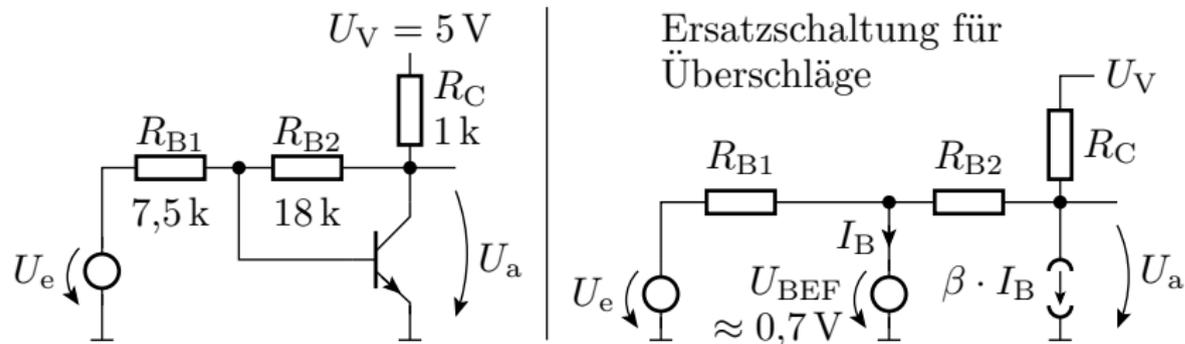
Man kann die Modellparameter vorgeben und damit beliebige Schaltungen simulieren. Der Parameter VTO ist die Einschaltspannung  $U_{th}$ , Kp die Steilheit  $K$  und Lambda ein weiterer Parameter, dessen Bedeutung erst mit dem physikalischen Modell auf Foliensatz F4 behandelt wird.



# Transistorverstärker

## Kennlinie eines Transistorverstärkers

Beispiel sei die Transistorschaltung von Folie 34 erweitert um einen Eingang zu einem Verstärker:

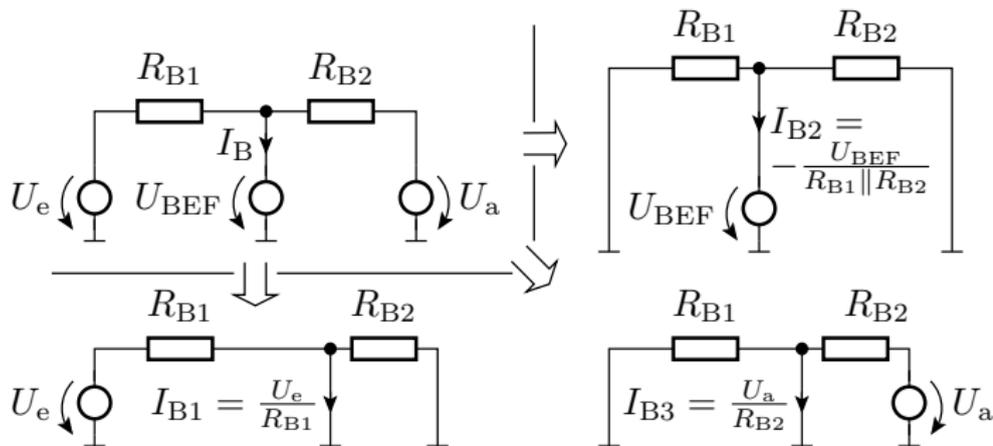


$$I_B = \frac{U_e}{R_{B1}} + \frac{U_a}{R_{B2}} - \frac{U_{BEF}}{R_{B1} \parallel R_{B2}} \quad (1)$$

$$U_a = U_V - \beta \cdot R_C \cdot I_B \quad (2)$$

## Wiederholung Helmholtzsches Überlagerungsprinzip

- Das Gleichungssystem ist nach  $U_a = f(U_e)$  auflösbar...  
Übernächste Folie Bestimmung von  $U_a = f(U_e, \beta)$  per Simulation.
- Wie kann man die erste Gl.  $I_B = \dots$  im Kopf aufstellen?  
Nach dem Helmholtzschen Überlagerungsprinzip.





Die beiden Gleichungen 1 und 2 in einander eingesetzt liefern:

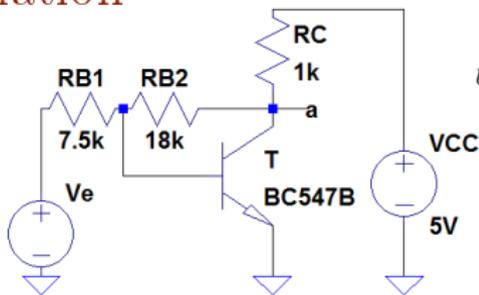
$$\begin{aligned}
 U_a &= U_V - \beta \cdot R_C \cdot \left( \frac{U_e}{R_{B1}} + \frac{U_a}{R_{B2}} - \frac{U_{BEF}}{R_{B1} \parallel R_{B2}} \right) \\
 \frac{U_a}{\beta \cdot R_C} + \frac{U_a}{R_{B2}} &= \frac{U_V}{\beta \cdot R_C} - \frac{U_e}{R_{B1}} + \frac{U_{BEF}}{R_{B1} \parallel R_{B2}} \\
 \frac{U_a}{(\beta \cdot R_C) \parallel R_{B2}} &= \frac{U_V}{\beta \cdot R_C} + \frac{U_{BEF}}{R_{B1} \parallel R_{B2}} - \frac{U_e}{R_{B1}} \\
 U_a &= \frac{(\beta \cdot R_C) \parallel R_{B2}}{\beta \cdot R_C} \cdot U_V + \frac{(\beta \cdot R_C) \parallel R_{B2}}{R_{B1} \parallel R_{B2}} \cdot U_{BEF} \\
 &\quad - \frac{(\beta \cdot R_C) \parallel R_{B2}}{R_{B1}} \cdot U_e
 \end{aligned}$$

Mit  $\beta \cdot R_C \parallel R_{B2} \approx 200 \text{ k}\Omega \parallel 18 \text{ k}\Omega = 16,5 \text{ k}\Omega$  und  
 $R_{B1} \parallel R_{B2} = 7,5 \text{ k}\Omega \parallel 18 \text{ k}\Omega = 5,3 \text{ k}\Omega$

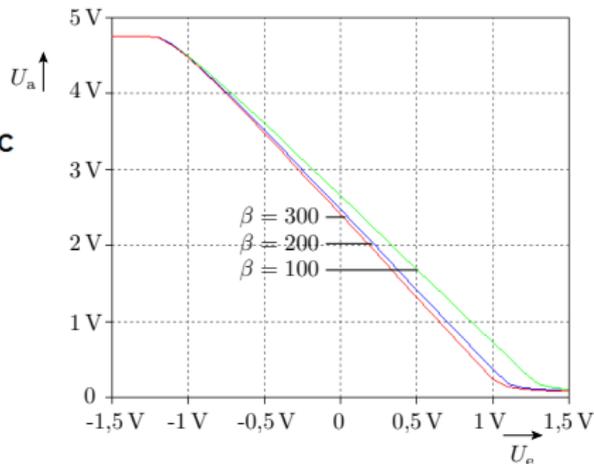
$$\begin{aligned}
 U_a &= \frac{16,5 \text{ k}\Omega}{200 \cdot 1 \text{ k}\Omega} \cdot 5 \text{ V} + \frac{16,5 \text{ k}\Omega}{5,3 \text{ k}\Omega} \cdot 0,7 \text{ V} - \frac{16,5 \text{ k}\Omega}{7,5 \text{ k}\Omega} \cdot U_e \\
 &= 2,6 \text{ V} - 2,2 \cdot U_e
 \end{aligned}$$

Im Prinzip rechenbar, aber Simulation ist angenehmer.

## Simulation



```
.dc Ve -1.5V 1.5V 0.1V
.step NPN BC547B(Bf) 100 300 100
```



Aus der Simulation ist ablesbar:

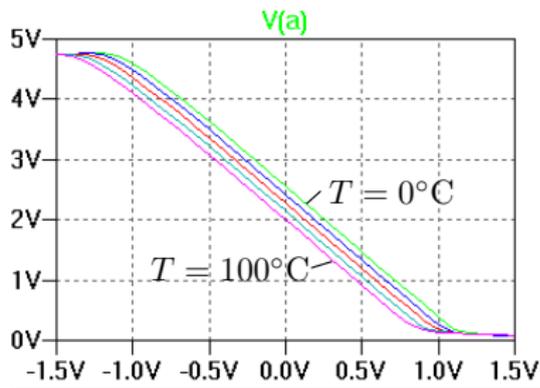
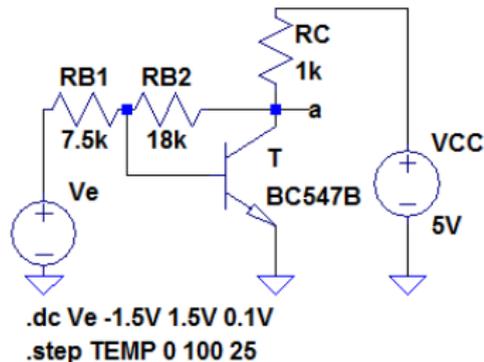
- Eingangsspannungsbereich:  $-1\text{ V} \leq U_e \leq 1\text{ V}$
- Verstärkung:  $v_u = \frac{dU_a}{dU_e} \approx -2$

### Fakt 1

Für Verstärker, in denen der Einfluss der Stromverstärkung durch die Rückkopplung stark gemindert ist, liefert der Überschlag mit dem bisherigen Transistormodell erstaunlich genaue Ergebnisse.



Eine Simulation erlaubt im Vergleich zur Übersichtsrechnung weiterführende empirische Untersuchungen, z.B. wie sich die Schaltung bei Veränderung der Temperatur verhält.

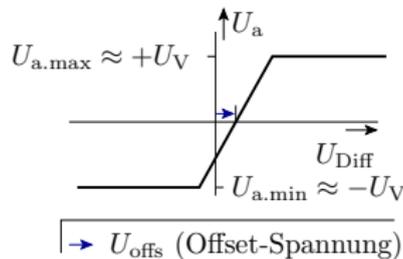
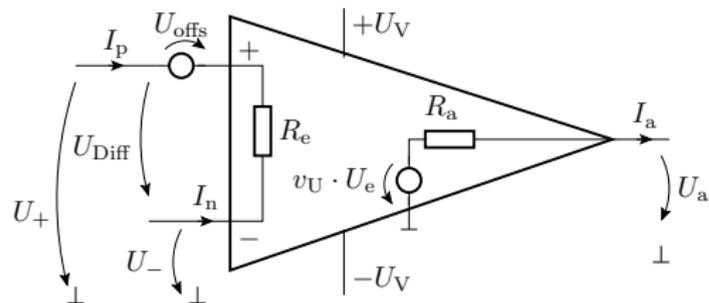


Die Temperatur verschiebt die Kennlinie laut Simulationsergebnis nach links zu kleineren Eingangsspannungen, hat aber offenbar kaum Einfluss auf die Verstärkung. In der schnellen Durchführbarkeit solcher Zusatzuntersuchungen liegt eine wesentliche Stärke der Simulation.

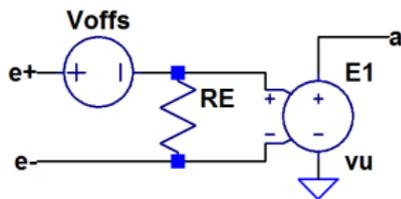


# Operationsverstärkerschaltung

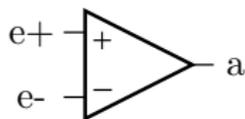
## Idealer Operationsverstärker



Ein Operationsverstärker ist ein Differenzverstärker mit hoher Verstärkung, sehr hohem Eingangswiderstand, kleiner Offsetspannung, ... In Spiece eine »Teilschaltung« mit einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle als Kern.



Symbol





## Modell eines realen OV's

Echte Modelle werden durch wesentlich komplexere Schaltungen nachgebildet. Beispiel TLC07X<sup>6</sup>:

### ■ Kommentare

```
* DEVICE = TLC07X
* SUPPLY VOLTAGE: +/-15V
* CONNECTIONS:
* 1 NON-INVERTING INPUT
* 2 INVERTING INPUT
* 3 POSITIVE POWER SUPPLY
* 4 NEGATIVE POWER SUPPLY
* 5 OUTPUT
```

### ■ Schnittstellenbeschreibung (1 bis 5 sind die Signalnamen für die Anschlüsse)

```
.subckt TLC07X_5V 1 2 3 4 5
```

### ■ Schaltungsbeschreibung

<sup>6</sup>Einzel-OV zu dem aus dem aus dem Praktikum



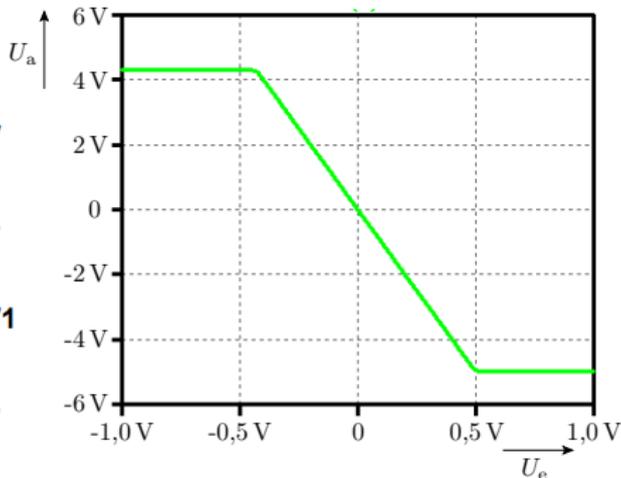
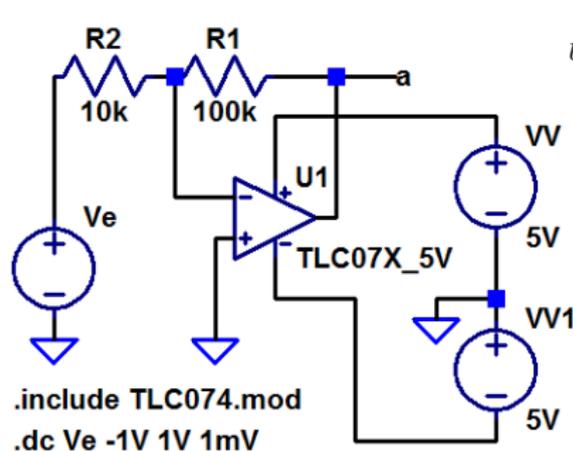
### 3. Kennlinie

```
c1 11 12 4.8697E-12
c2 6 7 8.0000E-12
css 10 99 4.0063E-12
dc 5 53 dy
de 54 5 dy
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2) (3,0)
+(4,0) 0 .5 .5
fb 7 99 poly(5) vb vc
+ve vlp vln 0 6.9132E6
+-1E3 1E3 6E6 -6E6
ga 6 0 11 12 457.42E-6
gcm 0 6 10 99 1.1293E-6
iss 3 10 dc 183.67E-6
ioff 0 6 dc .806E-6
hlim 90 0 vlim 1K
j1 11 2 10 jx1
j2 12 1 10 jx2
r2 6 9 100.00E3
```

### 5. Operationsverstärkerschaltung

```
rd1 4 11 2.1862E3
rd2 4 12 2.1862E3
ro1 8 5 10
ro2 7 99 10
rp 3 4 2.4728E3
rss 10 99 1.0889E6
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 1.5410
ve 54 4 dc .84403
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc 119
vln 0 92 dc 119
.model dx D(Is=800.00E-18)
.model dy D(Is=800.00E-18
+ Rs=1m Cjo=10p)
.model jx1 PJF(Is=117.50E-15
+ Beta=1.1391E-3 Vto=-1)
.model jx2 PJF(Is=117.50E-15
+ Beta=1.1391E-3 Vto=-1)
.ends
```

## Invertierender Verstärker mit einem TLC07X



- Modell in das Arbeitsverzeichnis kopieren und mit »include« einbinden.
- Die minimale Ausgangsspannung ist etwa  $U_{a.min} \approx U_{V-} = -5\text{ V}$ , aber die maximale positive Ausgangsspannung ist nur  $U_{a.max} \approx 4,3\text{ V} < U_{V+} = 5\text{ V}$ .



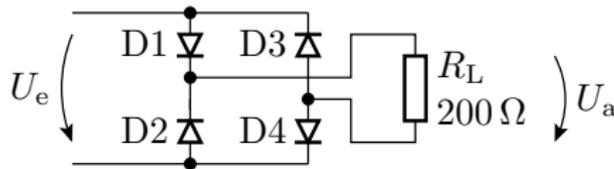
# Aufgaben

## Aufgabe 3.1: Brückengleichrichter

Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des nachfolgenden Brückengleichrichters

- 1 mit vier Schottky-Dioden vom Typ BAT43<sup>7</sup> und
- 2 mit vier Siliziumdioden vom Typ 1N4148.

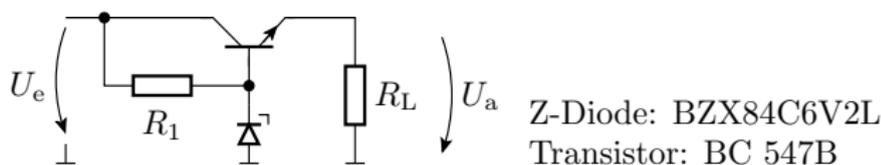
im Bereich  $-5\text{ V} \leq U_e \leq 5\text{ V}$ .



<sup>7</sup>Besorgen Sie sich das Modell der Schottky-Dioden Typ BAT43 aus dem Internet oder übernehmen Sie es von Folie 49.

## Aufgabe 3.2: Spannungsstabilisierung

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

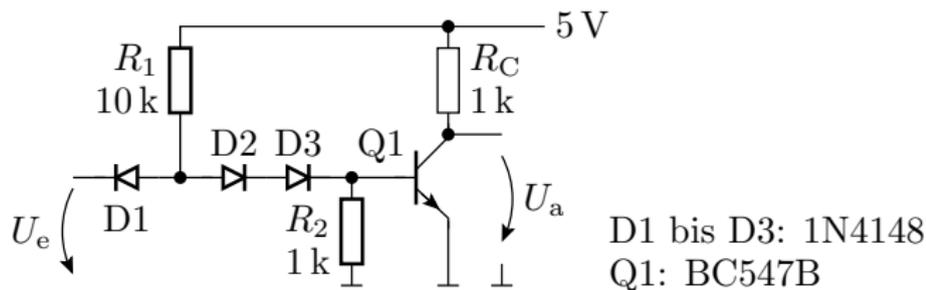


- 1 Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $U_a$  in Abhängigkeit der Eingangsspannung  $U_e$  im Bereich von  $5\text{ V} \leq U_e \leq 10\text{ V}$  mit  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  und  $R_L = 100\ \Omega$ .
- 2 Legen Sie  $R_1$  so fest, dass bei einer Eingangsspannung von  $8\text{ V}$  und einem von  $1\text{ k}\Omega$  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).

## Aufgabe 3.3: Transistorinverter

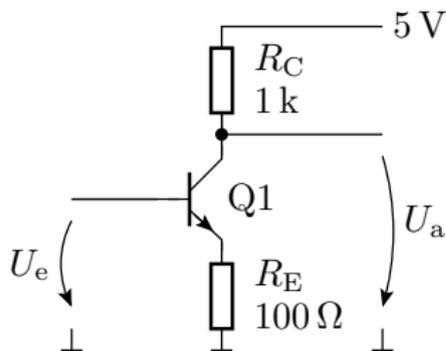
Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $U_a = f(U_e)$  für den nachfolgenden Transistorinverter im Bereich  $0 \leq U_e \leq 5 \text{ V}$ .



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

## Aufgabe 3.4: Verstärker mit Bipolartransistor

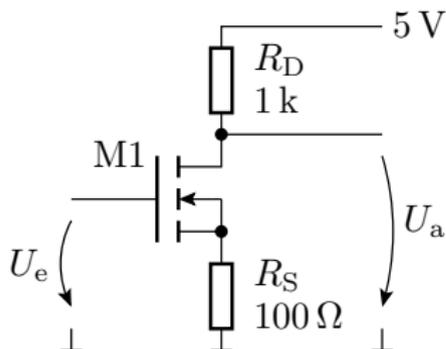
Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $U_a = f(U_e)$  für den nachfolgenden Verstärker mit einem Bipolartransistor BC547B im Bereich  $0 \leq U_e \leq 5 \text{ V}$ .



Q1: BC547B

## Aufgabe 3.5: Verstärker mit MOS-Transistor

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



## Aufgabe 3.6: Nichtinvertierender Verstärker mit OV

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.



## Aufgabe 3.7: Brückenverstärker mit OV

Ergänzen Sie die Brückenschaltung aus Aufgabe 2.4 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 3.8: Brückenverstärker mit OV

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



# Kleinsignalverhalten



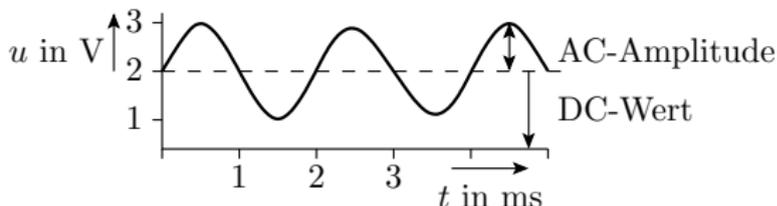
## DC- / AC-Trennung

Aufspaltung der zu verarbeitenden Signale in

- DC (direct current<sup>8</sup>, Gleichanteil) und
- AC (alternate current, zeitveränderlicher Anteil).

Beispiel:

$$u(t) = \underbrace{2 \text{ V}}_{\text{DC-Wert}} + \underbrace{1 \text{ V} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{1 \text{ ms}} \cdot t\right)}_{\text{AC-Teil}}$$



Erlaubt für lineare (linear angenäherte) Systeme eine unabhängige  
 ↓ ↓  
 Arbeitspunktberechnung (Gleichspannungsanalyse)      gleichanteilfreie AC-Berechnung (da linear auch im Frequenzraum)

<sup>8</sup>Kann auch eine Spannung sein.

## Kleinsignalverhalten

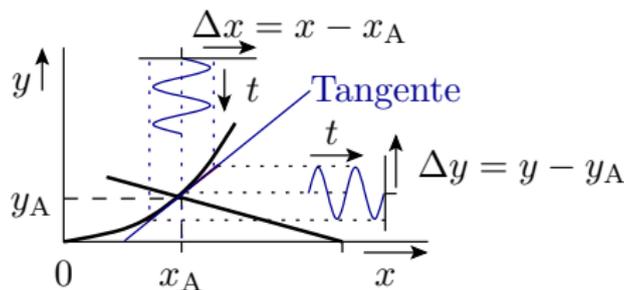
Für kleine Abweichungen der Signalwerte vom Arbeitspunkt lässt sich das Verhalten eines nichtlinearen Systems gut durch die Tangente im Arbeitspunkt annähern.

$$y = \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=x_A} \cdot (x - x_A) + y_A$$

( $x_A, y_A$  – Werte im Arbeitspunkt). Zwischen den Abweichungen vom Arbeitspunkt besteht die linearisierte Beziehung:

$$\Delta y = \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=x_A} \cdot \Delta x$$

Anwendbar für kleine AC-Amplituden im Vergleich zu den Kennlinienkrümmungen im Arbeitspunkt.

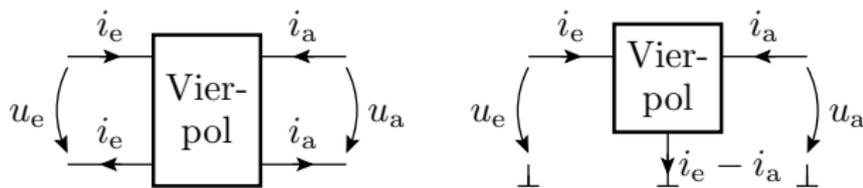




# Vierpole

## Vierpole

Ein Vierpol ist eine Ersatzschaltung für ein lineares System mit einer Eingangs- und einer Ausgangsspannung sowie einem Eingangs- und einem Ausgangsstrom. Keine internen Quellen:



Ein Ein- und Ausgang können verbunden sein. Die Funktion eines Vierpols ist eine lineare Abbildung von zwei Eingabe- auf zwei Ausgabegrößen.

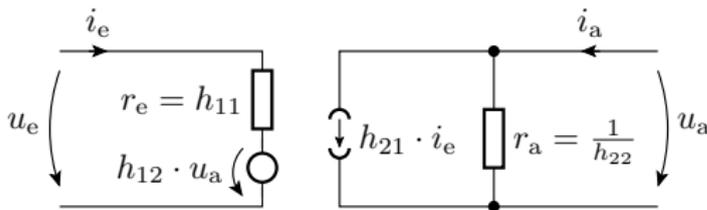
| Form            | Eingabegrößen | Ausgabegrößen |
|-----------------|---------------|---------------|
| Widerstandsform | $i_e, i_a$    | $u_e, u_a$    |
| Hybridform      | $i_e, u_a$    | $u_e, i_a$    |

## Hybridmatrix-Form

In der H- (Hybridmatrix) Form sind  $i_e$  und  $u_a$  die Eingaben, aus denen  $u_e$  und  $i_a$  berechnet werden:

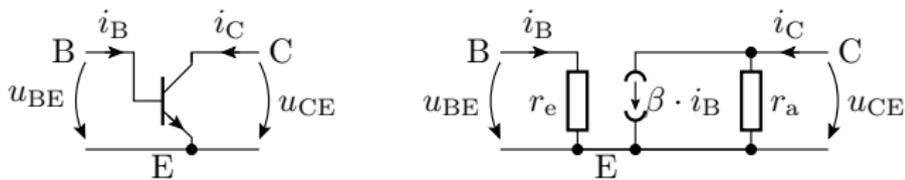
$$\begin{pmatrix} u_e \\ i_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} = \left. \frac{u_e}{i_e} \right|_{u_a=0} & h_{12} = \left. \frac{u_e}{u_a} \right|_{i_e=0} \\ h_{21} = \left. \frac{i_a}{i_e} \right|_{u_a=0} & h_{22} = \left. \frac{i_a}{u_a} \right|_{i_e=0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_e \\ u_a \end{pmatrix}$$

Die Hybridmatrix beschreibt eine Schaltung aus zwei Widerständen, einer stromgesteuerten Strom- und einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle:



## Kleinsignalersatzschaltung Bipolartransistor

Im AC-Ersatzschaltbild entfällt die konstante Spannungsquelle mit  $U_{BEF}$  wie alle konstanten Quellen. Dafür soll zusätzlich ein arbeitspunktabhängiger Ein- und Ausgangswiderstand für den Anstieg des Stroms mit der Spannung berücksichtigt werden:



Die Ersatzschaltung entspricht der Vierpol-Hybridform.

$$\begin{pmatrix} u_{BE} \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} = r_e & h_{12} = 0 \\ h_{21} = \beta & h_{22} = \frac{1}{r_a} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_B \\ u_{CE} \end{pmatrix}$$

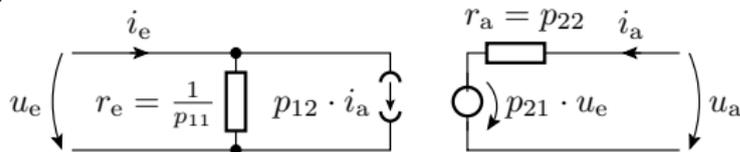
Die Stromverstärkung findet man in der Literatur und in Datenblättern auch unter der Bezeichnung  $h_{21}$ .

## Inverse Hybridmatrix

Bei Invertierung der Hybridmatrix werden  $u_e, i_a$  die Eingaben der Berechnung und  $i_e, u_a$  die zu berechnenden Größen:

$$\begin{pmatrix} i_e \\ u_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} = \left. \frac{i_e}{u_e} \right|_{u_a=0} & p_{12} = \left. \frac{i_e}{i_a} \right|_{u_a=0} \\ p_{21} = \left. \frac{u_a}{u_e} \right|_{i_a=0} & p_{22} = \left. \frac{u_a}{i_a} \right|_{u_a=0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_e \\ i_a \end{pmatrix}$$

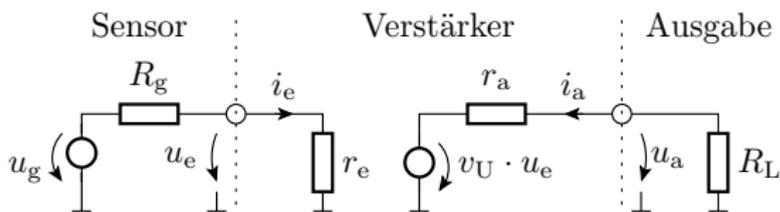
In der korrespondierenden Schaltung wird die Vorwärtsverstärkung mit einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle und die Rückwirkung mit einer stromgesteuerten Stromquelle beschrieben.



Setzt man die Stromrückwirkung  $p_{12} = 0$ , ist das die bisher verwendete AC-Ersatzschaltung eines Spannungsverstärkers.

## Berechnung der Kettenverstärkung

Die Beschreibung des AC-Verhaltens von Verstärkern durch rückwirkungsfreie Vierpole aus Eingangswiderstand, Spannungsverstärkung und Ausgangswiderstand hilft bei der Bestimmung der Gesamtverstärkung einer Verarbeitungskette aus Sensoren, Verstärkern, Dämpfungsgliedern und Ausgabeelementen:



Die Schnittstellen Sensor-Verstärker und Verstärker-Ausgabe bilden Spannungsteiler, die das Signal dämpfen. Die spannungsgesteuerte Spannungsquelle verstärkt es:

$$u_a = u_g \cdot \frac{r_e}{R_g + r_e} \cdot v_u \cdot \frac{R_L}{r_a + R_L}$$



Es gibt weitere Formen der Vierpoldarstellung:

- Widerstandsform,
- Leitwertform und
- Kettenform

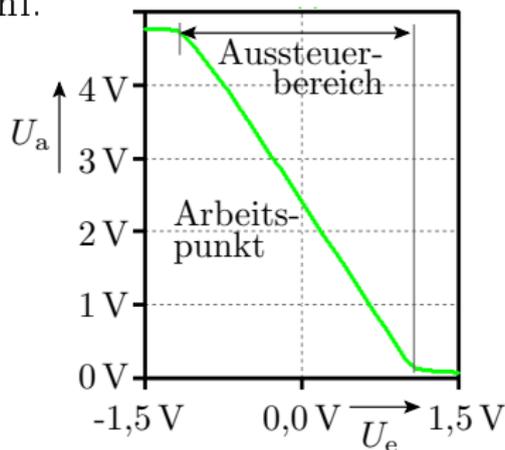
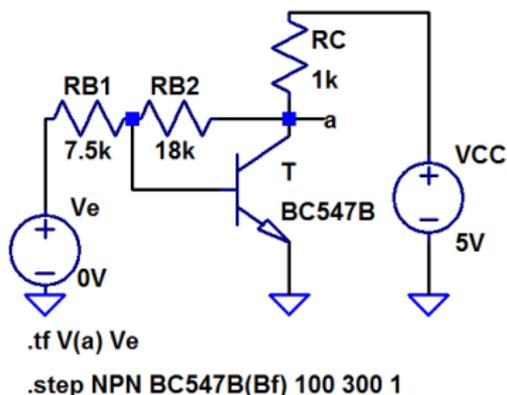
sowie Umrechnungsvorschriften zwischen den Formen, Vierpolzusammenfassungen, ... Wird in der Vorlesung nicht benötigt und deshalb auch nicht behandelt.



## Simulationionsart .tf

## Simulationsart »Transferfunktion«

Die Simulationsart .tf (Transfer Function) berechnet die Parameter Eingangswiderstand, Verstärkung und Ausgangswiderstand eines Vierpols im Arbeitspunkt. Der Arbeitspunkt wird etwa in die Mitte des zu nutzenden Bereichs der Übertragungskennlinie gelegt. Für das Testobjekt wird zuerst die Kennlinie bestimmt und der Gleichanteil für die Eingangsgröße festgelegt.  $U_e = 0$  ist im Beispiel eine zweckmäßige Wahl.





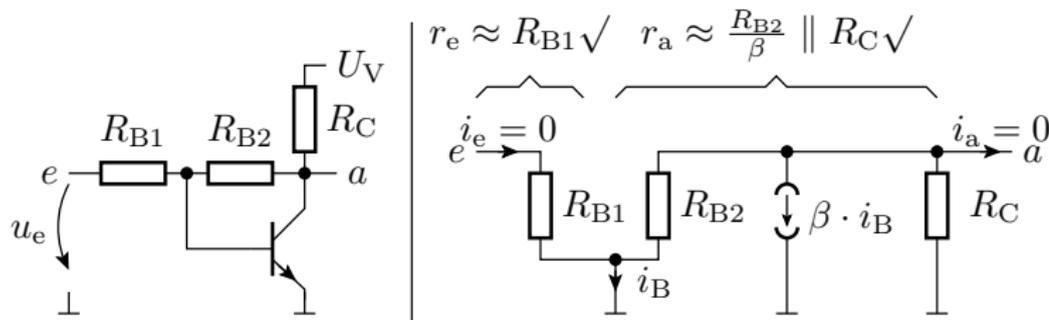
Für die Simulationsart .tf sind Eingabequelle und Ausgabegröße festzulegen. Mit Potential Knoten a als Ausgabe und Ve als Eingabequelle lautet das Simulationskommando:

```
.tf V(a) Ve
```

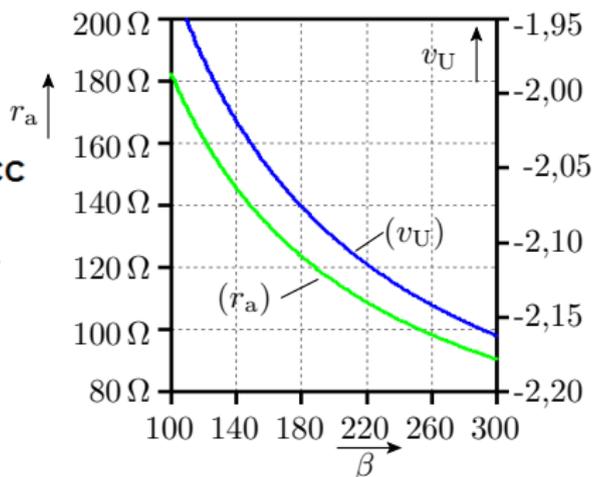
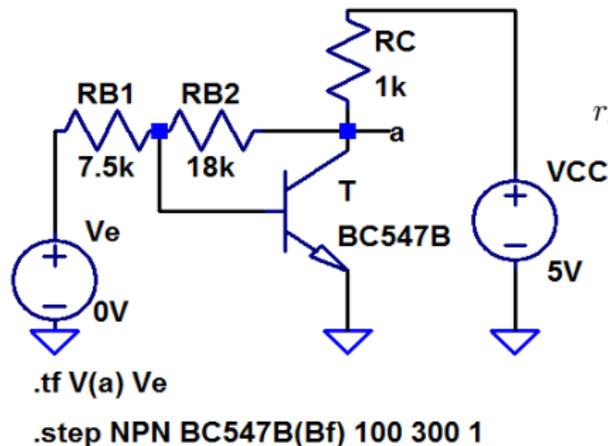
Simulationsergebnis:

```
Transfer_function:      -1.98833 transfer
ve#Input_impedance:    7607.44 impedance
output_impedance_at_V(a): 74.4068 impedance
```

AC-Ersatzschaltung mit vereinfachter Transistorersatzschaltung zur Kontrolle, ob die Ergebnisse plausibel sind:



Die gesuchten Kenngrößen lassen sich auch als Funktion der Bauteilparameter, z.B. der Transistorverstärkung berechnen und darstellen:

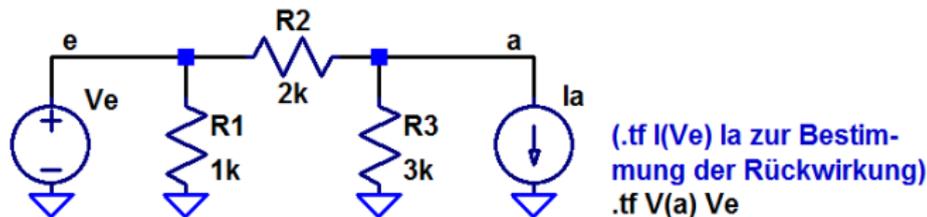


- Der Ausgangswiderstand nimmt mit  $\beta$  ab. Die Verstärkung schwankt erwartungsgemäß nur unerheblich (ca.  $\pm 5\%$ ).



## Simulation mit Rückwirkung

Transistorschaltungen haben kaum Rückwirkung, Widerstandsnetzwerke schon. Um die Rückwirkung zu bestimmen, ist die Schaltung mit einer Quelle am Ausgang zu simulieren:

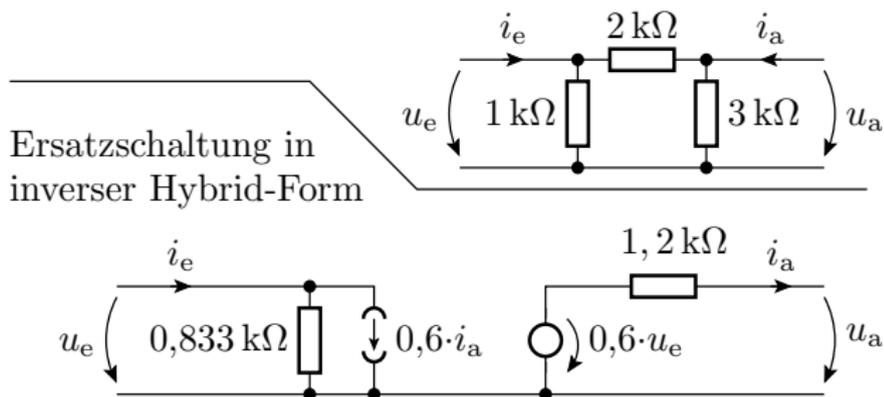


Ergebnis der Vorwärtsanalyse:

|                           |         |           |
|---------------------------|---------|-----------|
| Transfer_function:        | 0.6     | transfer  |
| ve#Input_impedance:       | 833.333 | impedance |
| output_impedance_at_V(a): | 1200    | impedance |

Ergebnis der Rückwärtsanalyse:

|                         |        |           |
|-------------------------|--------|-----------|
| Transfer_function:      | -0.6   | transfer  |
| ia#Input_impedance:     | 1200   | impedance |
| V(ve#Output_impedance): | 1e+020 | impedance |



Mit einem Strom als Ausgabe funktioniert die Ausgangswiderstandsberechnung nicht.

Probe:

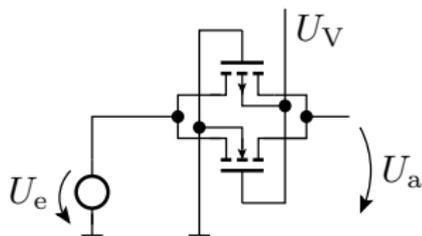
- $r_e = R_1 \parallel (R_2 + R_3) = 1 \text{ k}\Omega \parallel (2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega) = \frac{5}{6} \text{ k}\Omega \checkmark$
- $r_a = R_3 \parallel (R_1 + R_2) = 3 \text{ k}\Omega \parallel 2 \text{ k}\Omega = \frac{6}{5} \text{ k}\Omega \checkmark$
- $v_u = \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 0,6 \checkmark$  (Spannungsteiler)
- $v_{RI} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 0,6 \checkmark$  (Stromteiler)



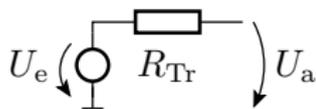
# Transfergatter

## Transfergatter

NMOS-Transistoren sind nur zur Durchschaltung einer Null und PMOS-Transistoren zur Durchschaltung einer Eins geeignet. Als Transferschalter zur Weiterleitung einer beliebigen Spannung ist ein NMOS- und ein PMOS-Transistor parallel zu schalten.

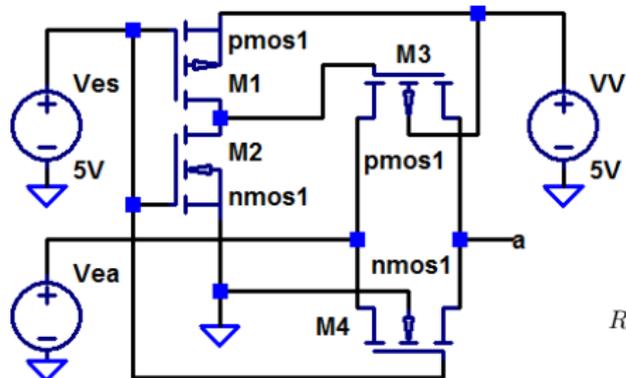


Ersatzschaltung  
mit eingeschalteten  
Transistoren

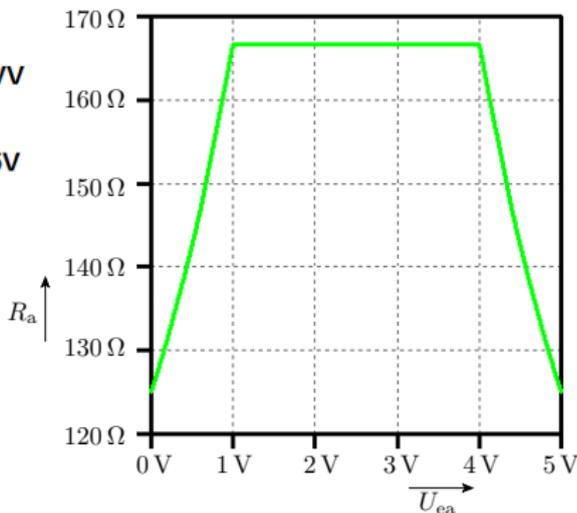


Mit einer Spannungsquelle ohne Innenwiderstand am Eingang ist die Verstärkung eins und der Ausgangswiderstand gleich dem Transferwiderstand. Frage: Wie hängt der Transferwiderstand von der Eingangsspannung ab?

Transfergatter mit Inverter für die invertierte Steuerspannung.



```
.model nmos1 NMOS(VTO=1V, Kp=2e-3)
.model pmos1 PMOS(VT0=-1V, Kp=2e-3)
.step Vea 0 5V 0.1V
.tf V(a) Vea
```

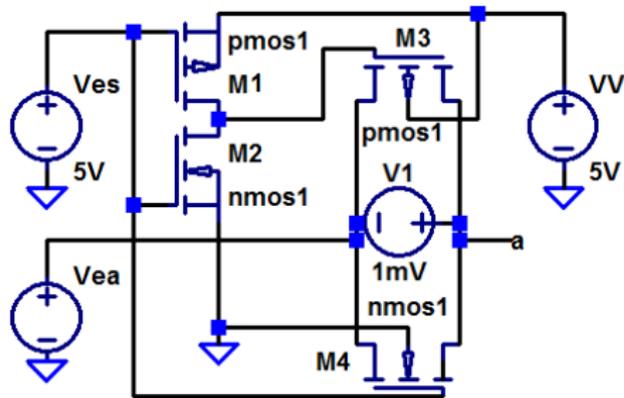


Modellparameter:  $VTO$  ( $U_{th}$ ) – Einschaltspannung;  $Kp$  ( $K$ ) – Steiheit).

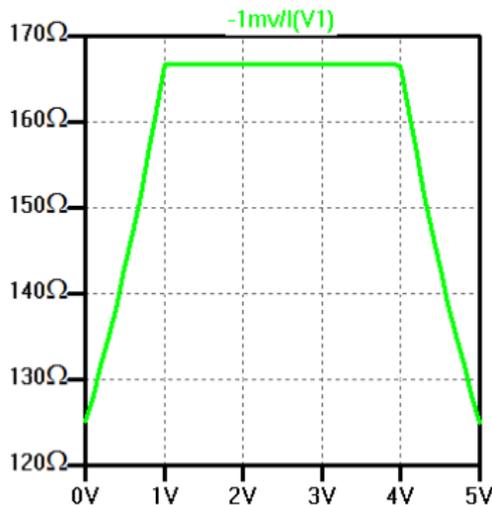
- Warum ist die Kurve eckig, statt abgerundet?
- Kann das Simulationsergebnis richtig sein?

## Bestimmung des Transferwiderstands anders

In der nachfolgenden Simulation wird zwischen Ein- und Ausgang des Transfergatters eine kleine Spannung angelegt und der Widerstand aus dem berechneten Strom bestimmt.



```
.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
```



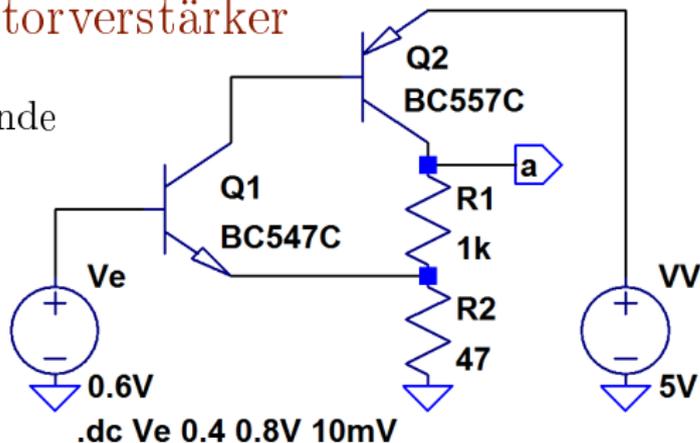
Scheint doch im Rahmens des Modells zu stimmen.



# Aufgaben

## Aufgabe 4.1: Transistorverstärker

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 im gewählten Arbeitspunkt
  - die Übertragungsfunktion  $U_a = f(U_e)$
  - den Eingangswiderstand  $R_e = \frac{dU_e}{dI_e}$  und
  - den Ausgangswiderstand  $R_a = \frac{dU_a}{dI_a}$ .

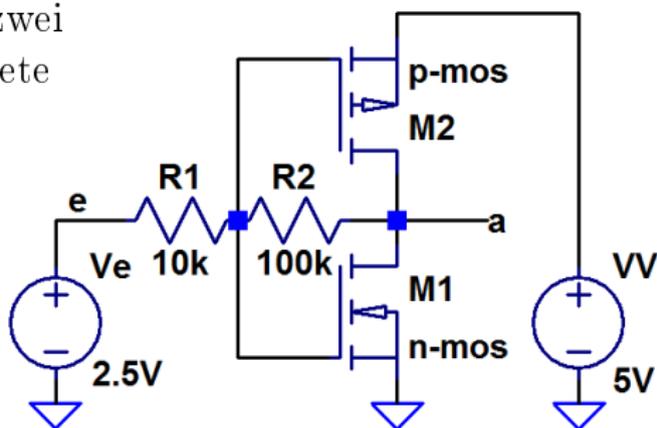


## Aufgabe 4.2: Transfergatter

- 1 Untersuchen Sie für das Transfergatter auf Folie 103, wie sich der Transferwiderstand mit der Versorgungsspannung im Bereich von  $3\text{ V} < U_V < 10\text{ V}$  ändert.
- 2 Untersuchen Sie durch Probieren, welche Steilheiten  $K_p$  die Transistoren haben müssen, damit der Transferwiderstand bei einer Versorgungsspannung von  $5\text{ V}$  nicht größer als  $10\ \Omega$  ist.

## Aufgabe 4.3: CMOS-Inverter als Verstärker

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

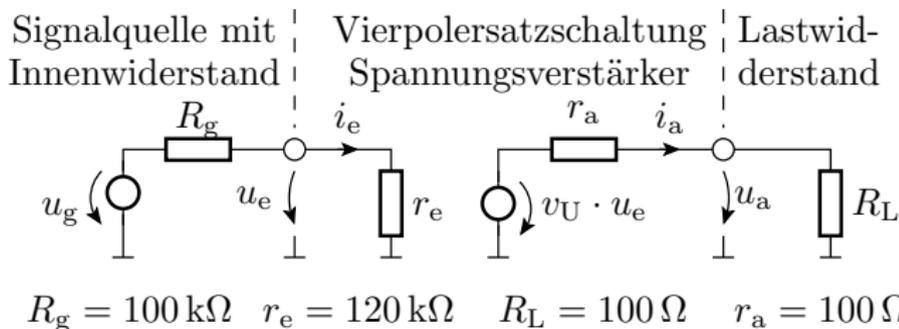


```
.model n-mos NMOS(VT0=1V, Kp=2e-2, lambda=2e-2)
.model p-mos PMOS(VT0=-1V, Kp=2e-2, lambda=2e-2)
.tf V(a) Ve
```

Bestimmen Sie für den Arbeitspunkt  $U_e = U_V/2$  die Verstärkung und den Ausgangswiderstand.

## Aufgabe 4.4: Aufgabe

Gegeben sind die vier Widerstände in der nachfolgenden Ersatzschaltung:



Wie groß muss die Spannungsverstärkung  $v_u$  sein, damit die Amplitude der Ausgangsspannung 10-mal so groß wie die der Generatorspannung  $u_g$  ist?



# Bauteiltoleranzen



### Bauteiltoleranzen

Die Parameter elektronischer Bauteile (Widerstand, Kapazität, Verstärkung, ...) streuen:

- fertigungsbedingt,
- in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte,...) und

verändern sich bei Alterung.

- Eine professionelle Schaltung ist so zu entwerfen, dass sie für alle zulässigen Variationen von Parameterwerten funktioniert.
- Dazu zählt auch die Festlegung der zulässigen Bauteiltoleranzen.



### Entwurf mit Bauteiltoleranzen

Ausgehend von der spezifizierten Zielfunktion mit einem oder mehreren Parametern, z.B. Verstärkung, Eingangs- und Ausgangswiderstand (Verstärker), und deren zulässigen Toleranzen

- Entwurf der Schaltung so, dass die Zielparameter etwa in der Mitte der Toleranzbereiche liegen.
- Sensitivitätsanalyse: Untersuchung für alle Bauteilparameter einzeln, wie stark ihre Änderungen die Zielparameter ändern.
- Parameter mit geringem Einfluss werden größere und solchen mit großem Einfluss geringere Toleranzbereiche zugeordnet.
- Kontrolle der Einhaltung der Toleranzen mit einer Monte-Carlo-<sup>9</sup> oder Worst-Case-Simulation<sup>10</sup> und Nachbesserung, wenn nicht eingehalten.

---

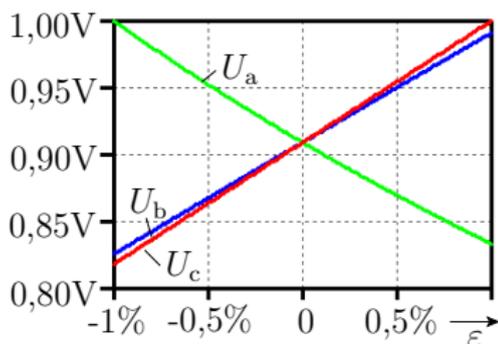
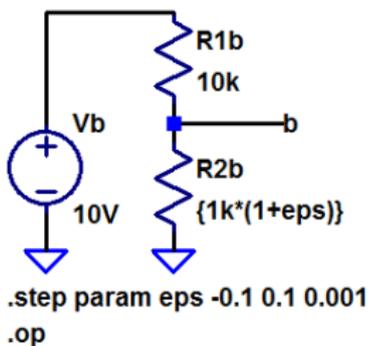
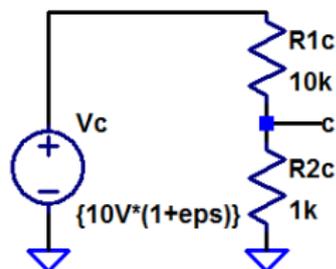
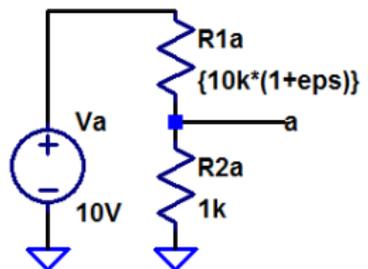
<sup>9</sup>Simulation mit einer großen Anzahl zufällig ausgewählter Parameterkombinationen.

<sup>10</sup>Simulation mit den ungünstigsten Parameterkombinationen.



# Sensitivitätsanalyse

Wiederhole für alle Parameter. Simulation unter Variation von  $\epsilon$  ( $\epsilon$  – Relative Parameterabweichung).

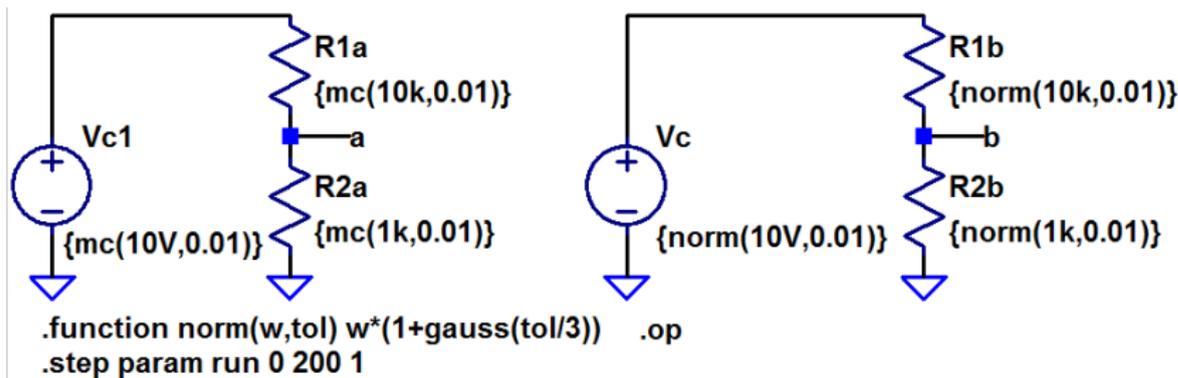


Die Sensibilität hat für alle drei variierten Parameter etwa den selben Betrag und für  $R_1$  negatives Vorzeichen.



# Monte-Carlo-Simulation

## Monte-Carlo-Simulation



Ersatz der Parameterwerte durch Funktionen für eine zufällige Auswahl:

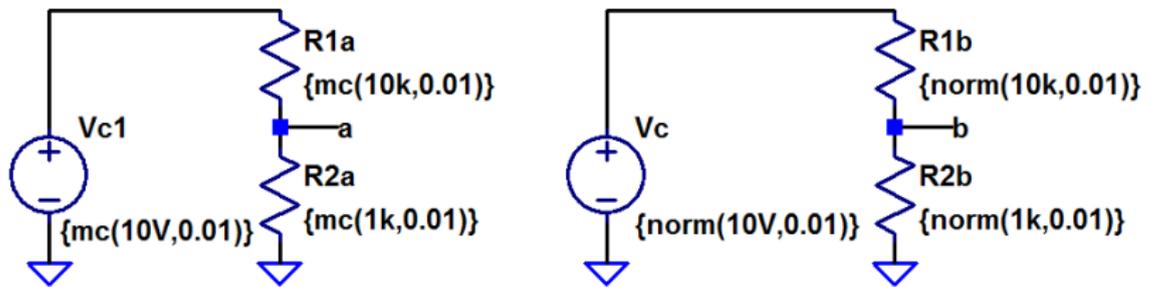
`{mc(< $\mu$ >, < $t$ >)}` \* Gleichverteilung (existiert)

`{norm(< $\mu$ >, < $t$ >)}` \* Normalverteilung (selbst definiert)

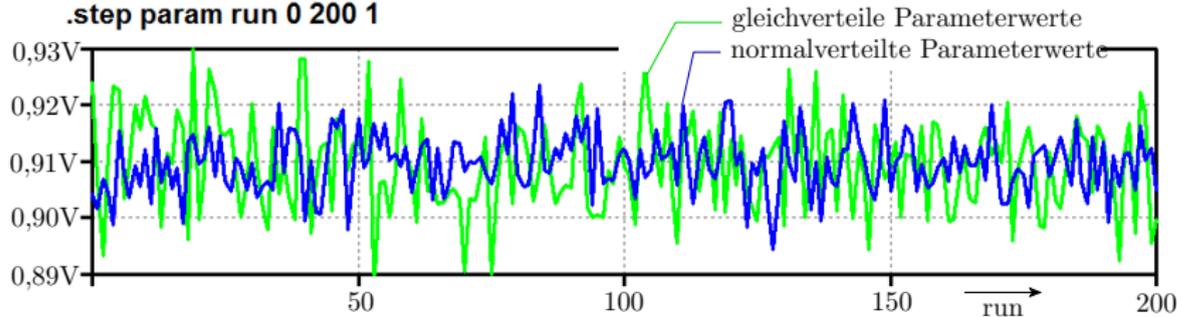
( $\mu$  – Nennwert;  $t$  –  $\pm$ -Toleranzbereich; die Normalverteilung ist hier mit  $\sigma = t/3$  definiert;  $\sigma$  – Standardabweichung).



Die Zählschleife läuft von run=0 bis 200, Schrittweite 1. Ergebnis sind 201 zufällige Ausgangsspannungen.



```
.function norm(w,tol) w*(1+gauss(tol/3)) .op  
.step param run 0 200 1
```



Für eine Darstellung als Verteilung könnten die Daten exportiert und mit Matlab weiterverarbeitet werden.

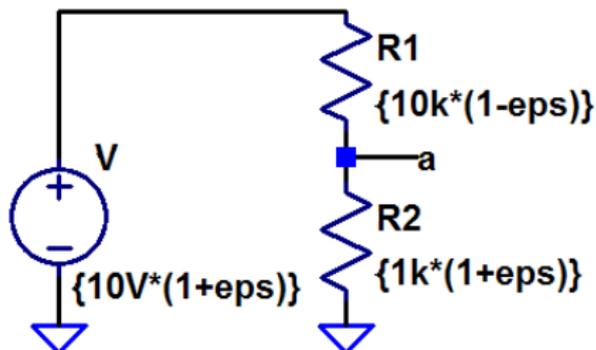


## Worst-Case-Analyse

## Worst-Case-Analyse

```

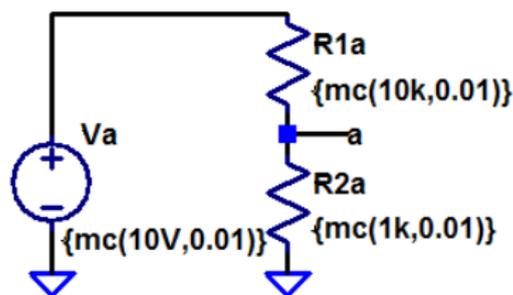
.step param eps list -0.01 +0.01
.meas op vamin min(V(a))
.meas op vamax max(V(a))
.op
    
```



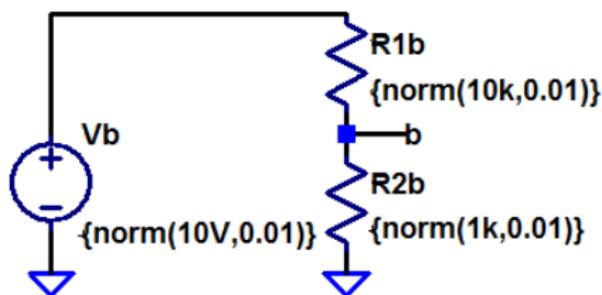
Die Sensitivitätsanalyse auf Folie 113 hat gezeigt, dass sich Änderungen von  $R_1$  mit umgekehrtem Vorzeichen wie bei den anderen beiden Parameter auf  $U_a$  auswirken. Simuliert wird im Beispiel nur mit  $\varepsilon = -1\%$  und  $\varepsilon = 1\%$ . Die »meas«-Anweisungen schreiben in das »Error Log« den minimalen und den maximalen Wert von  $U_a$ :

```

vamin: MIN(v(a))=0.883769 FROM -0.01 TO 0.01
vamax: MAX(v(a))=0.935014 FROM -0.01 TO 0.01
    
```



```
.function norm(w,tol) w*(1+gauss(tol/3))
.step param run 0 2000 1
.op
```



```
.meas vamin min(V(a))
.meas vamax max(V(a))
.meas vbmin min(V(b))
.meas vbmax max(V(b))
```

Die Worst-Case-Werte lassen sich auch bei einer Monte-Carlo-Analyse ausgeben. Das erspart die manuelle Untersuchung und Einprogrammierung der Vorzeichen der Sensitivität.

```
vamin: MIN(v(a))=0.886231 FROM 0 TO 2000
vamax: MAX(v(a))=0.933017 FROM 0 TO 2000
vbmin: MIN(v(b))=0.891122 FROM 0 TO 2000
vbmax: MAX(v(b))=0.925834 FROM 0 TO 2000
```



E-Reihe



## E-Reihe

- Toleranzen werden in der Regel als  $\pm$ -Bereich in Prozent relativ zum Nennwert gegeben.
- Für Widerstände, Kondensatoren erfolgt die Werteabstufung der käuflichen Bauteile nach einer E-Reihe, z.B. E3, E6, ...
- Die Nummer der E-Reihe gibt die Anzahl der Werte je Dekade an:

| Serie | Werte je Dekade                               | Toleranz   |
|-------|---|------------|
| E3    | 1, 2,2, 4,7                                   | $\mp 50\%$ |
| E6    | 1, 1,5, 2,2, 3,3, 4,7, 6,8                    | $\mp 20\%$ |
| E12   | 1, 1,2, 1,5, 1,8, 2,2, 2,7 3,3, 3,9, 4,7, ... | $\mp 10\%$ |

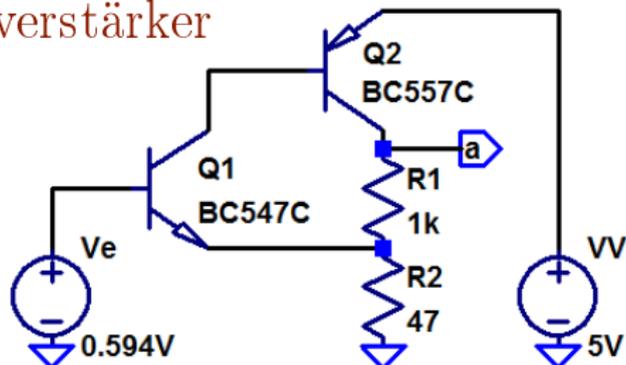
Die E-Reihen E24, E48, ..., E192 haben je doppelt so viele Werte und die halbe Toleranz der E-Reihe davor.



# Aufgaben

## Aufgabe 5.1: Transistorverstärker

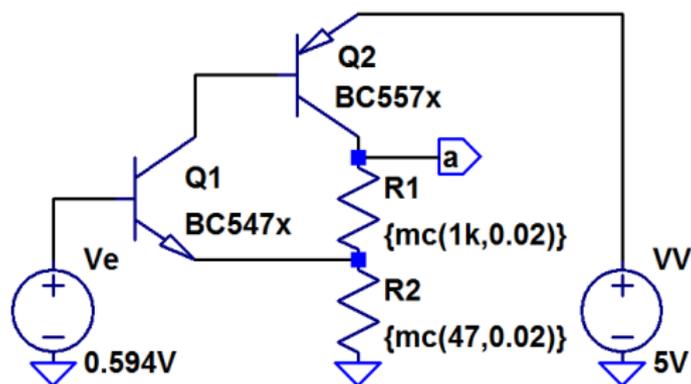
Gegeben ist der nachfolgende Transistorverstärker.



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

- 1 Bestimmen Sie den Bereich der Ausgangsspannung  $U_a$  im Arbeitspunkt.
- 2 Bestimmen Sie den Bereich, in dem die Verstärkung liegt.

Hinweis: Zur Veränderung einzelner Parameter gegenüber einem Referenzmodell dient der nichtdokumentierte Befehl »ako« (another kind of). Für jedes Bauteil mit unabhängig streuenden Parameters ist ein eigens Modell anzulegen.



```

.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
    
```

Ergebnisse:

- 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  $\mp 2\%$ :  $2,45608 \leq V(a) \leq 2,54933$
- nur R2  $\mp 2\%$ :  $2,45608 \leq V(a) \leq 2,54933$
- nur R1  $\mp 2\%$ :  $2,45641 \leq V(a) \leq 2,54091$
- zusammen:  $2.164 \leq V(a) \leq 2.714$

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



## Aufgabe 5.2: Wert und Toleranz eines Widerstands

Es werden zwei Widerstände mit den Werten  $3\text{ k}\Omega$  und  $8,8\text{ k}\Omega$  und einer zulässigen Toleranz von  $\pm 2\%$  benötigt. Aus welcher E-Reihe würden Sie die Widerstände nehmen und welche Nennwerte würden Sie wählen?