

Elektronische Schaltungen SS 2021

3. Übungsblatt

Bipolartransistoren

Aufgabe 1 (Großsignalanalyse - I/U Kennlinie, Arbeitspunkt)

- a) Das Eingangssignal wird an der Basis angelegt. Das Ausgangssignal befindet sich am Kollektor. Die Schaltung ist also eine Emitter-Schaltung.

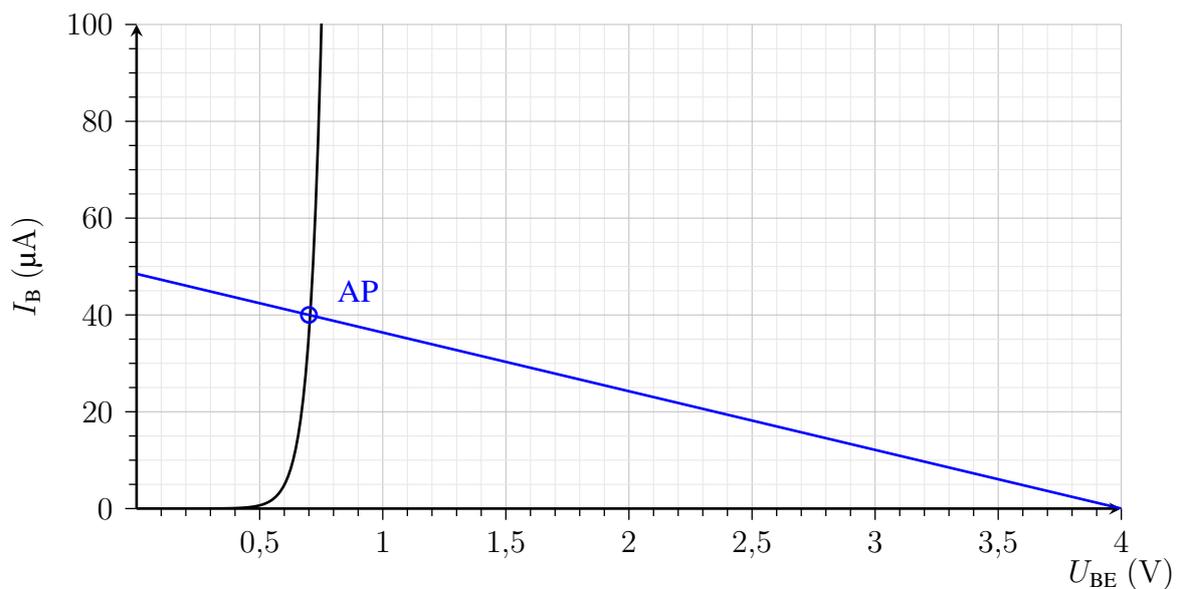


Abbildung 1: Eingangskennlinie des Bipolartransistors.

- b) Die Widerstandsgerade wird so gezeichnet, dass sie die Eingangskennlinie des Transistors bei einer Basis-Emitter-Spannung von $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ überschneidet. An dieser Stelle beträgt der Kollektorstrom $I_C = 40 \mu\text{A}$.

Der gesuchte Widerstand R_B kann aus der Steigung der gerade abgelesen werden

$$R_B = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{3,3 \text{ V}}{40 \mu\text{A}} = 82,5 \text{ k}\Omega$$

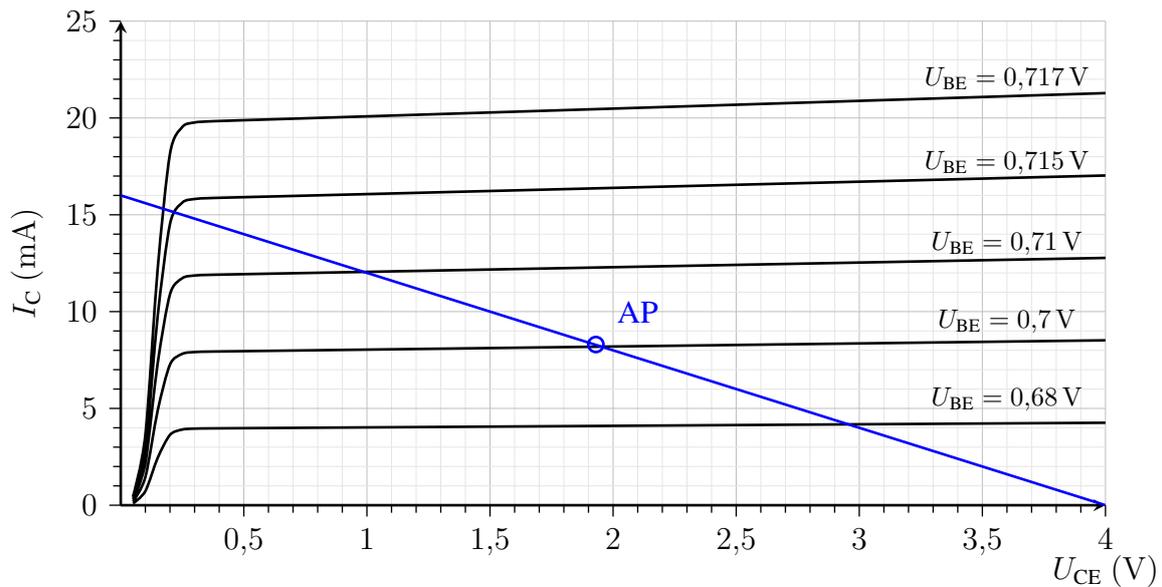


Abbildung 2: Ausgangskennlinienfeld des Bipolartransistors

c) Der Arbeitspunkt muss sich auf der zweiten Kennlinie ($U_{BE} = 0,7 \text{ V}$).

Die Steigung der Widerstandsgerade entspricht $-1/250 \Omega = -4 \text{ mS}$. U_{CE} ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit der zweiten Kennlinie ($U_B = 40 \mu\text{A}$) und beträgt ca. $1,9 \text{ V}$.

Alternativer Gedankengang: Wenn $U_{BE} = 0$, fällt die gesamte Spannung U_B am Widerstand ab. Nach dem ohmschen Gesetz ist der Strom dann $I_C = \frac{4\text{V}}{250\Omega} = 16 \text{ mA}$. Wenn $U_{CE} = 4 \text{ V}$, fällt keine Spannung am Widerstand ab und der Strom ist dann 0 . Die Gerade muss diese beide Punkte verbinden.

d) Der Early-Effekt kann man an der Steigung der Kennlinien in Abb. 2 festgestellt werden. Im Kleinsignalersatzschaltbild wird es durch Kollektor-Emitter Widerstand r_{CE} modelliert. Dieser befindet sich parallel zur Stromquelle im Ersatzschaltbild (Siehe Teilaufgabe e).

e) Das Ersatzschaltbild der Schaltung ist in Abb. 3 gegeben:

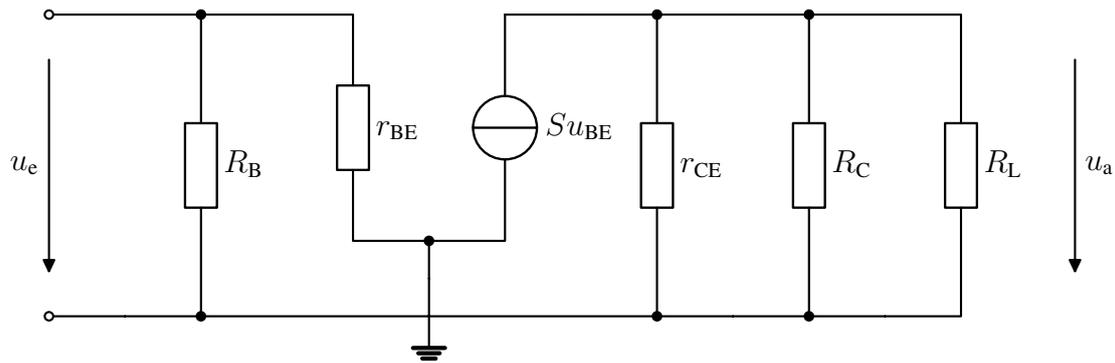


Abbildung 3: Schaltung aus zwei parallelen Dioden.

Der Kollektor-Emitter-Widerstand ist gegeben durch:

$$r_{CE} = \frac{|U_a| + U_{CE}}{I_C} = \frac{51,9 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = 6487,5 \Omega$$

f)

$$S = \frac{dI_C}{dU_{BE}} = \frac{I_{C,AP}}{U_T} = \frac{8 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 307,7 \text{ mS}$$

Bei der Berechnung der Spannungsverstärkung muss die gesamte Ausgangsimpedanz betrachtet werden. In diesem Fall, besteht er aus der Parallelschaltung aus r_{CE} , R_C und R_L .

$$r_a = (r_{CE} || R_C || R_L) = 41,4 \Omega$$

$$A_v = S \cdot r_a = 12,7$$

g) Eingangswiderstand:

$$r_{BE} = \frac{\beta}{S} = 651,5 \Omega$$

$$R_{\text{ein,ges}} = (R_B || r_{BE}) = 646,4 \Omega$$

Der Ausgangswiderstand wurde bereits bei Teilaufgabe (e) berechnet:

$$r_a = (r_{CE} || R_C || R_L) = 41,5 \Omega$$

Aufgabe 2 (Arbeitspunktbestimmung, Kleinsignalanalyse)

a) Das Eingangssignal wird am Emitter angelegt. Das Ausgangssignal befindet sich am Kollektor. Die Schaltung ist also eine Basis-Schaltung.

b) Die Masche von U_b über R_C , U_{CE} und R_E ergibt:

$$U_b = I_C R_C + U_{CE} + I_C R_E$$

Nach R_E aufgelöst:

$$R_E = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} - R_C = 100 \Omega$$

c) Der Basisstrom am Arbeitspunkt ist gegeben durch:

$$I_B = \frac{I_C}{B} = 40 \mu\text{A}$$

Aus dem Knoten an der Basis folgt:

$$I_{B2} = 10I_B - I_B = 9I_B = 360 \mu\text{A}$$

Um die richtige Basisspannung einzustellen, muss gelten:

$$U_{B2} = U_{RE} + R_E I_C = 0,9 \text{ V} + 1 \text{ V}$$

$$R_2 = \frac{U_{B2}}{9I_B} = 5,28 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_B - U_{B2}}{10I_B} = 7,75 \text{ k}\Omega$$

d) Kleinsignal-Ersatzschaltbild:

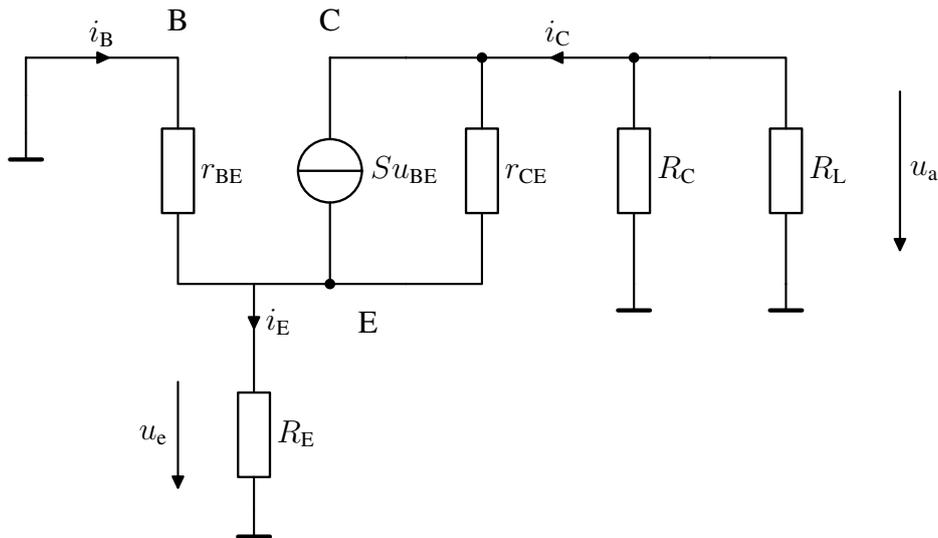


Abbildung 4: Kleinsignal-Ersatzschaltbild

e) Der Eingangswiderstand der Basisschaltung ist gegeben durch:

$$r_e = \left(\frac{1}{S} \parallel R_E \right),$$

mit

$$\frac{1}{S} = \frac{U_T}{I_C} = 2,6 \Omega, \quad R_E = 100 \Omega$$

Da $R_E \gg 1/S$, kann ES vernachlässigt werden

$$r_{e,ges} \approx \frac{1}{S} = 2,6 \Omega$$

Anmerkung: An dieser Stelle kann man festhalten, dass der Eingangswiderstand der Basisschaltung deutlich geringer ist als der von einer Emitterschaltung. Das ist der relevanteste Unterschied zwischen den zwei Schaltungen.

Der Ausgangswiderstand setzt sich aus der Parallelschaltung von r_{CE} , R_C und R_L zusammen.

$$r_a = R_C \parallel R_L = 66,23 \Omega,$$

mit

$$r_{CE} = \frac{U_{CE} + |U_A|}{I_C} = 10,15 \text{ k}\Omega$$

Da die gesamte Eingangsspannung zwischen Emitter und Basis abfällt, kann eingesetzt werden:

$$A_v = S r_a = \frac{I_C}{U_T} \cdot r_a = 25.5$$

Aufgabe 3 (Design-Aufgabe mit LTspice)

a) Der Verstärker soll eine hohe Verstärkung und eine Möglichst hohe Eingangsimpedanz haben. Eine Emitter-Schaltung eignet sich am besten für diese Randbedingungen.

b) Um die benötigte Verstärkung an der Last einzustellen, muss für die Steigung der Emitter-Schaltung gelten:

$$S = \frac{|A|}{R} = \frac{50}{100 \Omega} = 500 \text{ mS}$$

Entsprechend muss der Kollektorstrom eingestellt werden:

$$I_C = U_T S = 26 \text{ m}\Omega \cdot 500 \text{ mS} = 13 \text{ mS}$$

Eine *.op* (für *operating point*) gibt die Gleichspannungs- und Gleichstromanteile für die simulierte Schaltung (wie auf Abb. 5). Da wir vorerst nur den DC Arbeitspunkt bestimmen möchten, reicht die Simulation mit Basiswiderstand und Kollektorwiderstand. Beide Werte sollen jeweils variiert werden (*eng. sweep*), um die optimale Beschaltung zu bestimmen.

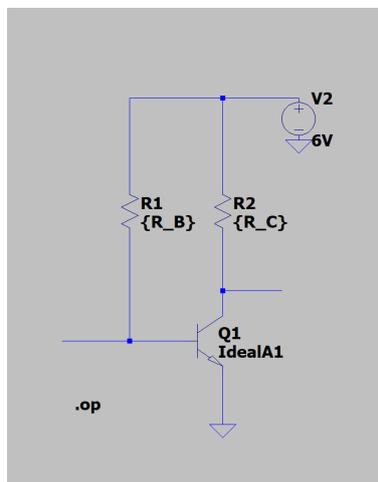


Abbildung 5: Spice-Simulation zur Bestimmung des Arbeitspunkt

Die Parametersweeps können anhand eines *.step*-Befehls eingestellt werden.

Syntax: `.step param <Parameter> <First Value> <Last Value> <Step>`

Für diese Simulation `.step param R_B 1k 60k 50`

Da die Ströme nur eine geringe Abhängigkeit vom R_C zeigen, können wir R_C für die erste Simulation willkürlich zu $10\ \Omega$ setzen.

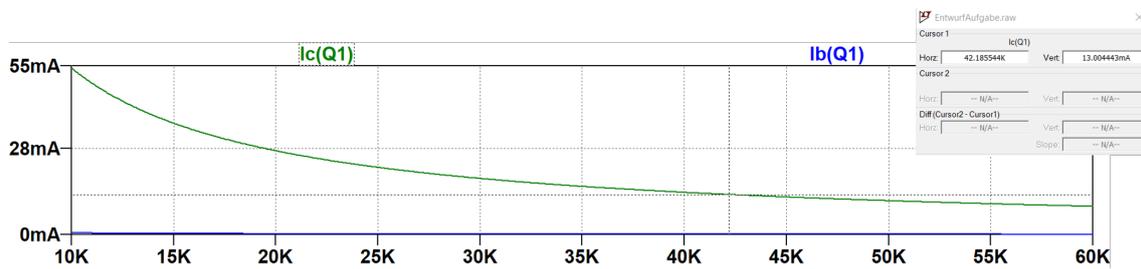


Abbildung 6: Kollektor Strom und Basistrom für unterschiedliche Basis-Widerstände R_B

c) Die Kollektor-Spannung muss sich im aktiven Bereich befinden. D.h. $U_{CE} > U_{BE}$. Ein Arbeitspunkt mit $U_{CE} \approx 3\text{ V}$ würde das entsprechen. So können später beim Wechselsignal Amplituden bis zu ca. 2 V vorhanden sein, ohne dass der Transistor in Sättigung geht, allerdings wäre bei einer solchen Amplitude ein starkes nicht-lineares Verhalten vorhanden.

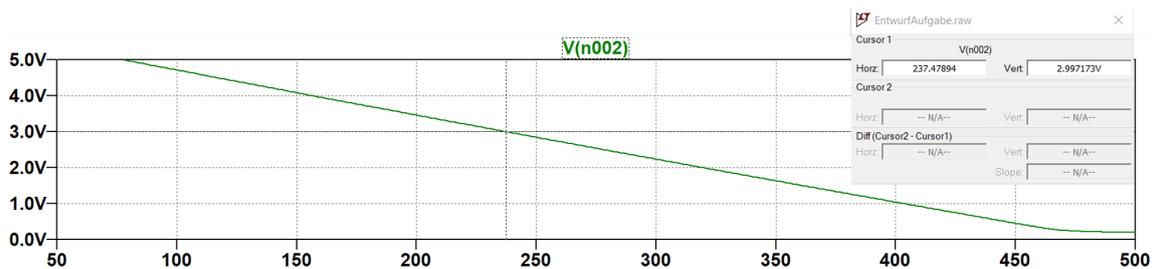


Abbildung 7: Kollektor-Emitter-Spannung für unterschiedliche R_C .

Eine Sweep des Kollektor-Widerstands (Abb. 7) zeigt, dass ein Widerstand von $R_C = 238\ \Omega$ sich dafür einigt.

Nun müssen die passende Signalquelle und die Last hinzugefügt werden. Um Wechselsignale einzuspeisen, ohne den Arbeitspunkt zu ändern, werden Koppelkondensatoren benutzt. Diese sollen möglichst groß sein, damit sie auch niedrige Frequenzen einkoppeln. Es wurde 1 mF als Koppelkapazität gewählt. Die Simulation ist in Abb. 8 gezeigt.

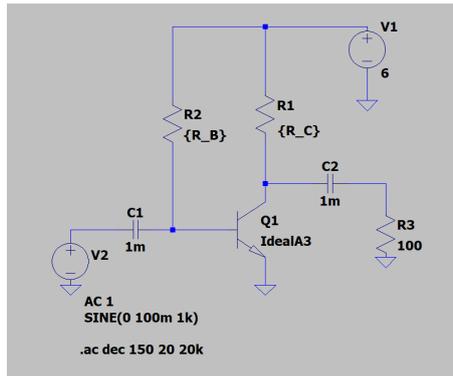


Abbildung 8: Simulationseinstellung für AC-Analyse

Die AC-Analyse (Abb. 9) zeigt nun, dass die Spannungsverstärkung bei allen relevanten Frequenzen 31,7 dB beträgt ($A_v \approx 38$), was kleiner ist als die erwünschte Verstärkung. Außerdem zeigt die Phase von 180° (punktierte Linie), dass das Signal am Ausgang invertiert wurde.

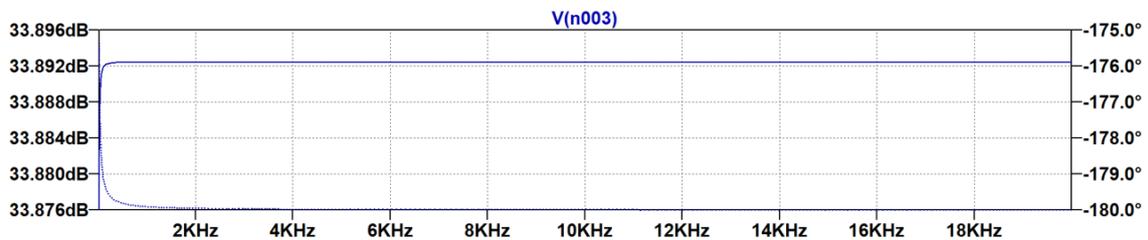


Abbildung 9: Bode-Diagramm für den gefundenen Arbeitspunkt

d) Um die Verstärkung wieder richtig einzustellen, kann die Steigung nochmal variiert werden. Dafür muss R_b angepasst werden. Da die Verstärkungen bei den meisten Simulationen in dB angegeben wird, lohnt es sich schon mal, die erwünschte Verstärkung in dB umzuwandeln:

$$[50]_{\text{dB}} = 20 \log(50) = 33,9 \text{ dB}$$

Über ein `.meas`-Befehl kann man sich die Verstärkung für unterschiedliche Werte von R_B ausgeben lassen. (*Strg. + L* öffnet die Log-Datei und mit *Rechts-Click → Plot...* wird der Plot angezeigt.)

Syntax: `.meas <Simulation> <Variable> find <Größe> at <Stelle>`

Diese Simulation: `.meas AC Verstaerkung find V(n003) AT=5k`

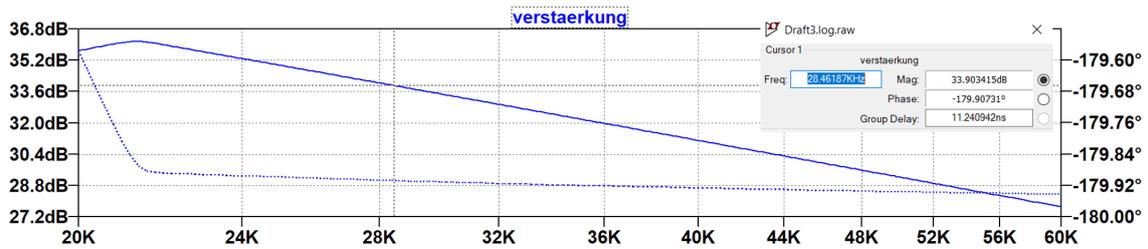


Abbildung 10: Verstärkung für unterschiedliche R_B

Aus Abbildung 10 lässt sich ablesen, dass die richtige Verstärkung von 33,9 dB mit $R_B = 28,4 \text{ k}\Omega$ eingestellt werden kann. Dafür hat sich der Arbeitspunkt offensichtlich geändert.

Eine weitere .op Simulation zeigt, dass die Kollektor-Emitter-Spannung mit der neuen Beschaltung 2,65 V beträgt. Die erwartete Amplitude des Ausgangssignals ist $|U_a| = 50 \cdot 10 \text{ mV} = 0,5 \text{ V}$. Das heißt dass das der Transistor immer im aktiven Bereich bleiben würde und zu keinem Zeitpunkt in Sättigung gehen würde. Der neue Arbeitspunkt ist also auch geeignet. Abb. 11 zeigt durch eine Transient-Simulation, dass das Signal nicht wesentlich verzerrt wird.

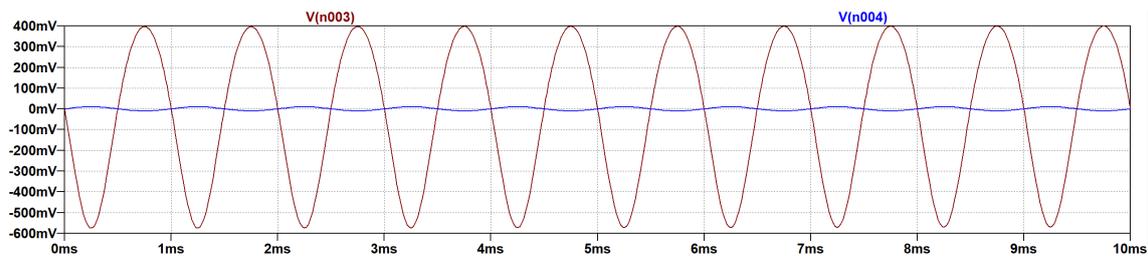


Abbildung 11: Eingang und Ausgangsspannung für eine Eingangsamplitude von 10 mV

e) Die Aufnahme kann nicht gut werden. Bei einer Eingangsamplitude von 0,1 V kann eine Ausgangsamplitude von 5 V erwartet werden. Es handelt sich um kein Kleinsignal mehr. Die Kleinsignal-Analyse ist nicht mehr präzise und das Ausgangssignal wird durch die Nichtlinearitäten der Kennlinien deutlich verzerrt. Außerdem werden die Grenzen des aktiven Bereichs aufgrund der großen Amplituden überschritten. Der Vergleich zwischen 11 und 12 zeigt den klaren Unterschied.

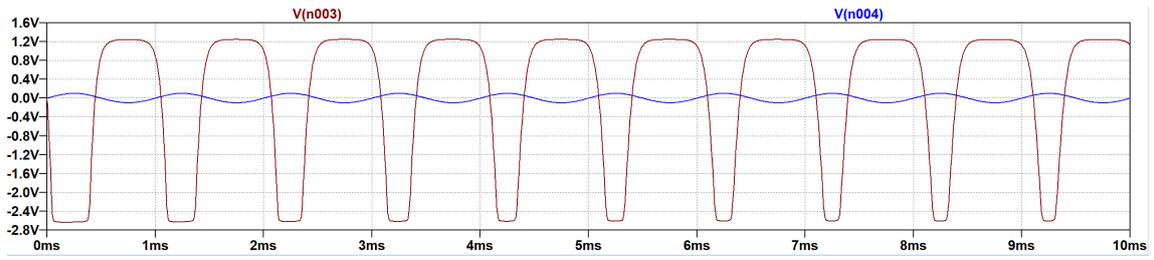


Abbildung 12: Eingangs und Ausgangsspannung für eine Eingangsamplitude von 100 mV