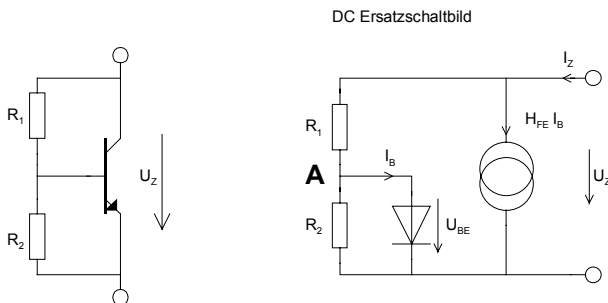


## U8 Konstantstromquellen , Konstantspannungselemente

### Konstantspannungselement (Zenerdiode)

Zenerdiode:



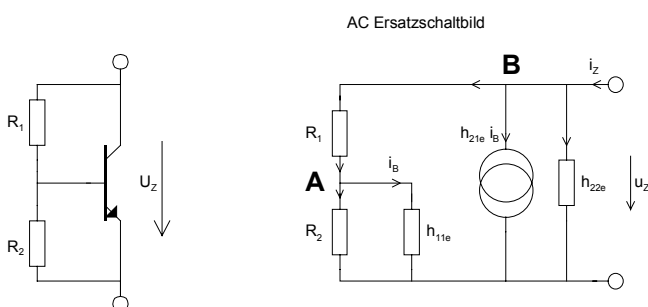
#### DC-Analyse

Sie bezweckt das Darlegen der Dimensionierungsgrundlagen für eine bestimmte (Zener-) Spannung  $U_Z$ . Über einen Knotensatz erhalten wir  $U_Z$  in Abhängigkeit der restlichen Größen:

$$\begin{aligned}
 A: \quad \frac{U_Z - U_{BE}}{R_1} &= \frac{U_{BE}}{R_2} + I_B \\
 U_Z R_2 &= U_{BE} (R_1 + R_2) + I_B R_1 R_2 \\
 U_Z &= \frac{U_{BE} (R_1 + R_2) + I_B R_1 R_2}{R_2} = \frac{U_{BE} (R_1 + R_2) + \frac{I_Z - \frac{U_Z - U_{BE}}{R_1}}{H_{FE}} R_1 R_2}{R_2} \\
 U_Z &\approx \frac{U_{BE} (R_1 + R_2)}{R_2} \quad (I_B = 0, \text{ resp. } H_{FE} \rightarrow \infty)
 \end{aligned}$$

#### AC-Analyse

Herleitung des dyn. Widerstandes  $r_z$ . Darlegen der Einflussfaktoren, die einen kleinen Zener-Widerstand begünstigen.



$$A: \quad \frac{u_{BE}}{R_2} + \frac{u_{BE}}{r_{BE}} = \frac{u_Z - u_{BE}}{R_1}$$

$$u_Z(R_2 h_{11e}) = u_{BE}(h_{11e} R_1 + R_2 R_1 + R_2 h_{11e})$$

$$B: \quad i_Z = \frac{u_Z - u_{BE}}{R_1} + u_Z h_{22e} + h_{21e} \frac{u_{BE}}{h_{11e}}$$

$$i_Z R_1 h_{11e} = (u_Z - u_{BE}) h_{11e} + u_Z h_{22e} h_{11e} R_1 + h_{21e} u_{BE} R_1$$

$$i_Z R_1 h_{11e} + u_{BE} h_{11e} - h_{21e} u_{BE} R_1 = u_Z h_{11e} + u_Z h_{22e} h_{11e} R_1$$

$$i_Z R_1 h_{11e} + u_{BE}(h_{11e} - h_{21e} R_1) = u_Z h_{11e}(1 + h_{22e} R_1)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & (h_{11e} R_1 + R_2 R_1 + R_2 h_{11e}) \\ R_1 h_{11e} & (h_{11e} - h_{21e} R_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_Z \\ u_{BE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_Z R_2 h_{11e} \\ u_Z h_{11e}(1 + h_{22e} R_1) \end{pmatrix}$$

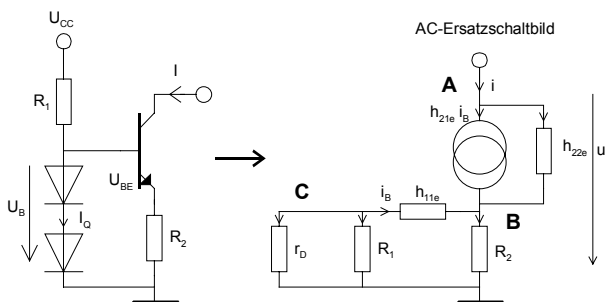
$$i_Z = u_Z \frac{R_1(R_2 + r_{BE}) + r_{BE} r_{CE} + R_2(r_{BE} + r_{CE}(h_{fe} + 1))}{r_{CE}[R_2 r_{BE} + R_1(R_2 + r_{BE})]}$$

$$r_Z = \frac{r_{CE}[R_2 r_{BE} + R_1(R_2 + r_{BE})]}{R_1(R_2 + r_{BE}) + r_{BE} r_{CE} + R_2(r_{BE} + r_{CE}(h_{fe} + 1))}$$

$$r_Z = \frac{R_2 r_{BE} + R_1(R_2 + r_{BE})}{R_2(h_{fe} + 1) + r_{BE}} \quad (r_{CE} \rightarrow \infty)$$

$$r_Z = 0 \quad (h_{fe} \rightarrow \infty)$$

### Konstantstromquelle



### AC-Analyse

$$\begin{aligned} A: \quad i &= h_{fe} \cdot i_B + (u - u_{R2}) h_{22e} \\ i &= h_{fe} \cdot i_B + u h_{22e} - u_{R2} h_{22e} \\ i - h_{fe} \cdot i_B + u_{R2} h_{22e} &= u h_{22e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B: \quad h_{fe} i_B + (u - u_{R2}) h_{22e} + i_B &= \frac{u_{R2}}{R_2} \\ R_2 h_{21e} i_B + u h_{22e} R_2 - u_{R2} h_{22e} R_2 + i_B R_2 &= u_{R2} \\ R_2 h_{21e} i_B - u_{R2} (1 + h_{22e} R_2) + i_B R_2 &= -u h_{22e} R_2 \\ i_B (R_2 (h_{21e} + 1)) - u_{R2} (1 + R_2 h_{22e}) &= -u_{R2} h_{22e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C: \quad \frac{u_{R2} + i_B h_{11e}}{R_1} + \frac{u_{R2} + i_B h_{11e}}{r_D} &= -i_B \\ u_{R2} r_D + i_B h_{11e} r_D + u_{R2} R_1 + i_B h_{11e} R_1 &= i_B R_1 r_D \\ i_B (h_{11e} r_D + h_{11e} R_1 + R_1 r_D) + u_{R2} (r_D + R_1) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} r_{CE} & -(r_{CE} \cdot h_{fe}) & 1 \\ 0 & (r_{CE} R_2 (h_{fe} + 1)) & -(R_2 + r_{CE}) \\ 0 & (r_{BE} r_D + r_{BE} R_1 + R_1 r_D) & (r_D + R_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ i_B \\ u_{R2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ -u_{R2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} i &= u \frac{R_1 (r_{BE} + r_D + R_2) + r_D (r_{BE} + R_2)}{r_D (r_{BE} r_{CE} + R_2 (r_{BE} + r_{CE} (h_{fe} + 1))) + R_1 (r_{CE} (r_{BE} + r_D) + R_2 (r_{BE} + r_D + r_{CE} (h_{fe} + 1)))} \\ r = \frac{u}{i} &= \frac{r_D (r_{BE} r_{CE} + R_2 (r_{BE} + r_{CE} (h_{fe} + 1))) + R_1 (r_{CE} (r_{BE} + r_D) + R_2 (r_{BE} + r_D + r_{CE} (h_{fe} + 1)))}{R_1 (r_{BE} + r_D + R_2) + r_D (r_{BE} + R_2)} \\ r &= \frac{r_{BE} r_{CE} + R_2 (r_{BE} + r_{CE} (h_{fe} + 1))}{r_{BE} + R_2} \quad (r_D \rightarrow 0) \\ r &\rightarrow \infty \quad (h_{fe} \rightarrow \infty \text{ oder } r_{CE} \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

### Aufgaben:

1. Dimensionieren Sie eine Konstantstromquelle für  $I=500\mu A$  mit zwei Shockley-Dioden ( $I_s=1E-10A$ ,  $n=1.5$ ),  $I_Q=1mA$  und einem Transistor BC107B für eine Speisespannung  $U_{CC}=20V$ .  
 $U_T = 0.026V$

$$H_{FE} = 245 \quad U_{BE} = 590mV \quad (BC107B, I_C = 500\mu A)$$

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right) \rightarrow U_D = \ln \left( \frac{I_D}{I_s} + 1 \right) n U_T = \ln \left( \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-10}} + 1 \right) \cdot 1.5 \cdot 0.026 = 0.6286057V$$

$$U_B = 2U_D$$

$$R_2 = \frac{2U_D - U_{BE}}{I \left( 1 + \frac{1}{H_{FE}} \right)} = \frac{2 \cdot 0.6286 - 0.59}{500 \cdot 10^{-6} \left( 1 + \frac{1}{245} \right)} = 1329\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_{CC} - 2U_D}{I_D + I_B} = \frac{20 - 2 \cdot 0.6286}{1 \cdot 10^{-3} + \frac{500 \cdot 10^{-6}}{245}} = 18.70462k\Omega$$

2. Bestimmen Sie die dyn. Eigenschaften der beiden Quellen, d.h. den Innenwiderstand bei gegebener Beschaltung  $R_p$ ,  $R_2$  und Transistorparameter  $h_{FE}$ ,  $r_{BE}$ ,  $r_{CE}$ .

3. Dimensionieren Sie ein Konstantspannungselement für  $U_Z=1.6V$ , wenn  $R_1$  mit  $47\Omega$  gegeben ist. Durch das Element fliesst ein mittlerer Strom  $I=2mA$ .

$$U_{BE} = 0.62V$$

$$U_Z \approx \frac{U_{BE}(R_1 + R_2)}{R_2} \rightarrow R_2 \approx \frac{U_{BE}R_1}{U_Z - U_{BE}} = \frac{0.62 \cdot 47}{1.6 - 0.62} = \underline{29.7347\Omega}$$

4. Wie gross werden die Innenwiderstände der beiden Quellen konkret?

Konstantspannungselement:

$$r_{BE} = 4.5k\Omega \quad h_{fe} = 330 \quad r_{CE} = 33.333k\Omega \quad (BC107B, I_C = 2mA, U_{CE} \text{ unberücksichtigt})$$

$$r_Z = \frac{r_{CE}[R_2 r_{BE} + R_1(R_2 + r_{BE})]}{R_1(R_2 + r_{BE}) + r_{BE}r_{CE} + R_2(r_{BE} + r_{CE}(h_{fe} + 1))} = \frac{33.33K(47 \cdot 4.5K + 29.7347(47 + 4.5K))}{29.7347(47 + 4.5K) + 4.5K \cdot 33.33K + 47(4.5K + 33.33K \cdot 331)} = \underline{17.277\Omega}$$

$$r_Z \approx \frac{R_2 r_{BE} + R_1(R_2 + r_{BE})}{R_2(h_{fe} + 1) + r_{BE}} = \frac{47 \cdot 4.5K + 29.7347(47 + 4.5K)}{47 \cdot 331 + 4.5K} = \underline{17.2859\Omega} \quad (r_{CE} \rightarrow \infty)$$

Konstantstromquelle:

$$r_{BE} = 10.5k\Omega \quad h_{fe} = 320 \quad r_{CE} = 66k\Omega \quad (BC107B, I_C = 500\mu A, U_{CE} = 5V)$$

$$r_D = 2 \cdot \frac{nU_T}{I_D} = 2 \cdot \frac{1.5 \cdot 0.026}{0.001} = 78\Omega$$

$$r = \frac{r_D(r_{BE}r_{CE} + R_2(r_{BE} + r_{CE}(h_{fe} + 1))) + R_1(r_{CE}(r_{BE} + r_D) + R_2(r_{BE} + r_D + r_{CE}(h_{fe} + 1)))}{R_1(r_{BE} + r_D + R_2) + r_D(r_{BE} + R_2)}$$

$$= \frac{78(10.5K \cdot 66K + 1329(10.5K + 66K \cdot 321)) + 18.705K(66K(10.5K + 78) + 1329(10.5K + 78 + 66K \cdot 321))}{18.705K(10.5K + 78 + 1329) + 78(10.5K + 1329)}$$

$$= \underline{2.42455M\Omega}$$

$$r \approx \frac{r_{BE}r_{CE} + R_2(r_{BE} + r_{CE}(h_{fe} + 1))}{r_{BE} + R_2} = \frac{10.5K \cdot 66K + 1329(10.5K + 66K \cdot 321)}{10.5K + 1329} = \underline{2.44M\Omega} \quad (r_{CE} \rightarrow \infty)$$