

Stabilisierungsschaltung mit Längstransistor

Bestimmung des Innenwiderstandes

Eine Stabilisierungsschaltung gemäß nebenstehender Schaltung ist mit folgenden Daten gegeben:

$$U_E = 18 \text{ V}$$

$$R_1 = 150 \Omega$$

Für die Z-Diode gelten folgende Daten:

$$U_Z = 12,7 \text{ V}$$

$$r_Z = 2 \Omega$$

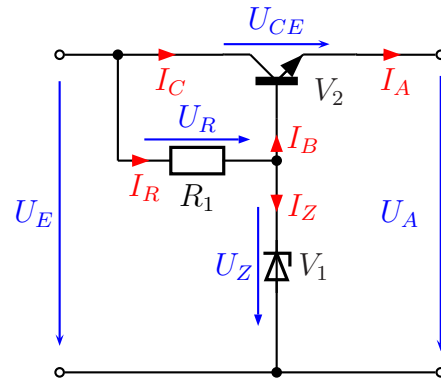
Für den Transistor gelten folgende Daten:

$$B = 120$$

$$U_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$r_B = 240 \Omega$$

$$r_C = 200 \Omega$$

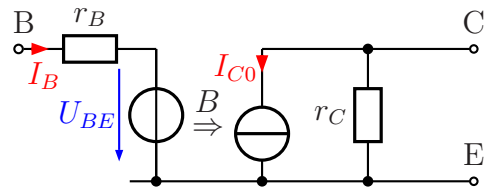


Diese Netzteilsschaltung stellt eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand dar. Bestimmen Sie den Innenwiderstand der Ersatzschaltung!

Lösung

Zweckmäßigerweise setzt man anstelle des Transistors und der Z-Diode die jeweilige Ersatzschaltung ein.

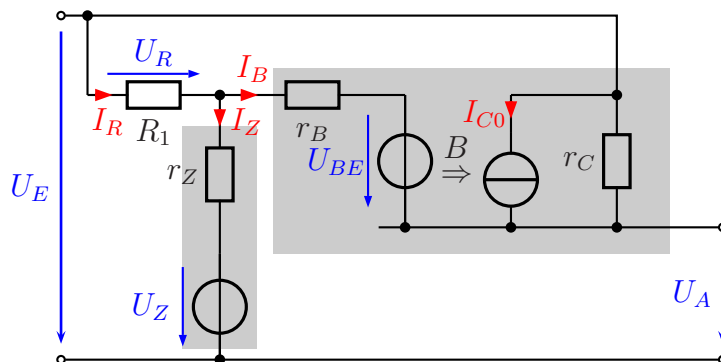
Nebenstehend ist die Ersatzschaltung eines Transistors dargestellt. Die Anschlüsse Basis, Kollektor und Emittter sind mit **B**, **C** und **E** gekennzeichnet. Der Widerstand r_B stellt den Basis-Widerstand dar, die Spannung U_{BE} die Schleusenspannung des Basis-Emitter-PN-Übergangs. Dieser Teil der Ersatzschaltung entspricht der Ersatzschaltung einer Diode.



Ersatzschaltung eines Transistors

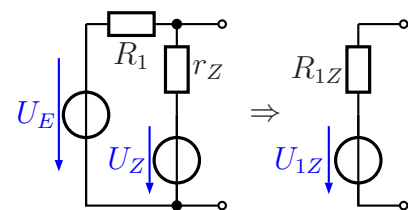
I_{C0} ist eine gesteuerte Stromquelle, die über den Basisstrom und den Stromverstärkungsfaktor B gesteuert wird, also mit $I_{C0} = B \cdot I_B$. Der Widerstand r_C ist der Innenwiderstand dieser Stromquelle, die an der Steigung der Geraden im Ausgangskennlinienfeld des Transistors erkennbar ist.

Man erhält hiermit folgende Schaltung:

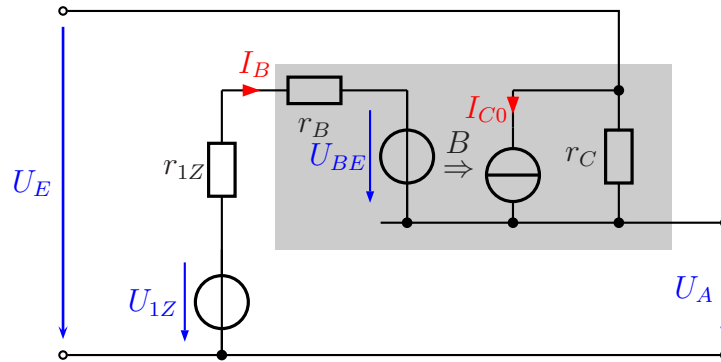


Die Ersatzschaltungen für Z-Diode und Transistor sind grau hinterlegt, damit sie besser im Zusammenhang erkennbar sind.

Die Schaltung kann nun schrittweise umgeformt werden. Als ersten Schritt bietet es sich an, den Spannungsteiler aus R_1 und r_Z zusammen mit U_Z und U_E in eine Spannungsquelle U_{1Z} mit Innenwiderstand R_{1Z} umzuformen, wie nebenstehend dargestellt ist. Baut man diese Umwandlung in die Gesamtschaltung ein, dann erhält man nachfolgende Schaltung.



Ersatzschaltung



Berechnen wir zuerst die Werte.

$$\begin{aligned}
 R_{1Z} &= R_1 \parallel r_Z \\
 &= \frac{R_1 \cdot r_Z}{R_1 + r_Z} \\
 &= \frac{150 \Omega \cdot 2 \Omega}{150 \Omega + 2 \Omega} \\
 R_{1Z} &= 1,974 \Omega
 \end{aligned}$$

Schaut man sich die Widerstandswerte mit $R_1 = 150 \Omega$ und $r_Z = 2 \Omega$ an, dann sieht man schnell, dass in der Parallelschaltung R_1 vernachlässigbar ist. Es ist $R_{1Z} \approx r_Z$.

Die Spannung, die am Spannungsteiler aus R_1 und r_Z anliegt, nenne ich U_{EZ} . Sie besteht aus den Spannungen U_E und U_Z . Hierbei muss allerdings die Polung berücksichtigt werden. Sie liegt am Spannungsteiler von oben links bis unten an. Machen wir einen Maschenumlauf, beginnend oben links.

$$\begin{aligned}
 U_{EZ} + U_Z - U_E &= 0 & | +U_E - U_Z \\
 U_{EZ} &= U_E - U_Z \\
 U_{EZ} &= 18 \text{ V} - 12,7 \text{ V} \\
 U_{EZ} &= 5,3 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Diese Spannung wird mit dem Spannungsteiler aus R_1 und r_Z auf eine Spannung an r_Z heruntergeteilt, die ich U_{rz} nennen möchte.

$$\begin{aligned}
 U_{rz} &= \frac{r_Z \cdot U_{EZ}}{r_Z + R_1} \\
 U_{rz} &= \frac{2 \Omega \cdot 5,3 \text{ V}}{2 \Omega + 150 \Omega} \\
 U_{rz} &= 69,7 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

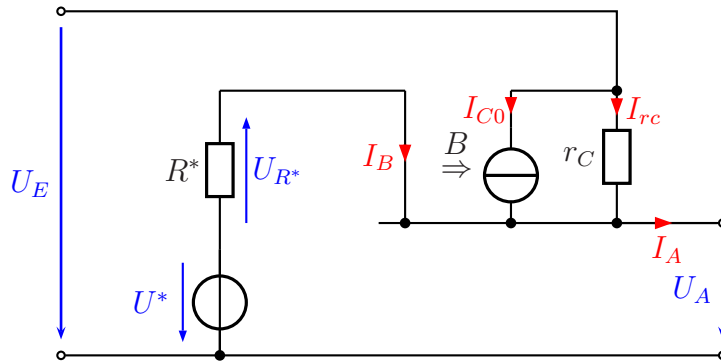
Die Ersatzspannung U_{1Z} setzt sich aus der Spannung U_Z und der eben bestimmten Spannung U_{rz} zusammen.

$$U_{1Z} = U_Z + U_{rz} = 12,7 \text{ V} + 69,7 \text{ mV} = 12,7697 \text{ V}$$

Wie man sieht, kann hierin der Einfluss von U_{rz} vernachlässigt werden.

$$U_{1Z} \approx U_Z$$

Im nächsten Vereinfachungsschritt können nun die Spannungen U_{1Z} und U_{BE} zu einer einzigen Spannung zusammengefasst werden. Ich nenne diese Spannung U^* . Auch die Widerstände R_{1Z} und r_B können zu einem Widerstand zusammengefasst werden. Diesen Widerstand nenne ich R^* . Überträgt man das auf die Schaltung, sieht diese so aus, wie nachfolgend gezeigt.



Berechnen wir nun die Werte für U^* und R^* .

$$U^* = U_{1Z} - U_{BE} = 12,7697 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 12,0697 \text{ V}$$

Näherungsweise ist diese Spannung der Sollwert für U_A .

$$R^* = R_{1Z} + r_B = 1,974 \Omega + 240 \Omega = 241,974 \Omega$$

Dieser Widerstand ist in erster Näherung gleich dem Widerstand r_B .

Langsam nähern wir uns der Lösung der Frage: „Wie groß ist der Innenwiderstand R_i der Schaltung?“ Zur Lösung dieser Frage gibt es (mindestens) zwei verschiedene Vorgehensweisen. Diese sind:

1. Man bestimmt für zwei unterschiedliche Belastungen die sich ergebende Ausgangsspannung und bestimmt über ΔU_A und ΔI_A den Innenwiderstand.
2. Man stellt „trickreiche“ Überlegungen an.

Methode 1: Ich bestimme U_A für $I_{A1} = 1 \text{ A}$ und $I_{A2} = 2 \text{ A}$.

Der Strom I_A setzt sich aus drei Strömen zusammen:

$$I_A = I_B + I_{C0} + I_{rc}$$

Der Strom I_{rc} kann vorab einfach bestimmt werden, wenn man voraussetzt, dass die Ausgangsspannung zumindest näherungsweise konstant bei $U_A = 12 \text{ V}$ bleibt.

$$I_{rc} = \frac{U_E - U_A}{r_C} = \frac{18 \text{ V} - 12 \text{ V}}{200 \Omega} = 30 \text{ mA}$$

Es ist bekannt, dass I_{C0} um den Stromverstärkungsfaktor B größer als I_B ist. Das setze ich in die obige Gleichung ein, um I_B zu berechnen.

$$\begin{aligned} I_A &= I_B + I_{C0} + I_{rc} \\ I_A &= I_B + B \cdot I_B + I_{rc} & | - I_{rc} \\ I_A - I_{rc} &= (1 + B) \cdot I_B & | : (1 + B) \\ I_B &= \frac{I_A - I_{rc}}{1 + B} \end{aligned}$$

Mit dieser Formel können wir nun die Basisströme I_{B1} und I_{B2} für die beiden Ausgangsströme $I_{A1} = 1 \text{ A}$ und $I_{A2} = 2 \text{ A}$ berechnen.

$$I_{B1} = \frac{1 \text{ A} - 30 \text{ mA}}{1 + 120} = 8,017 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = \frac{2 \text{ A} - 30 \text{ mA}}{1 + 120} = 16,281 \text{ mA}$$

Die Ausgangsspannung setzt sich aus der Spannung U^* und der Spannung zusammen. Daher bestimme ich jetzt die beiden Werte für U_{R^*1} und U_{R^*2} .

$$U_{R^*1} = R^* \cdot I_{B1} = 241,974 \Omega \cdot 8,017 \text{ mA} = 1,939\,906 \text{ V}$$

$$U_{R^*2} = R^* \cdot I_{B2} = 241,974 \Omega \cdot 16,281 \text{ mA} = 3,939\,579 \text{ V}$$

Machen wir einen Maschenumlauf, beginnend in der Mitte rechts.

$$\begin{aligned} U_A - U^* + U_{R^*} &= 0 & | + U^* - U_{R^*} \\ U_A &= U^* - U_{R^*} \end{aligned}$$

Hiermit könnten nun die beiden Ausgangsspannungen für die beiden verschiedenen Belastungen berechnet werden. Letztlich benötigen wir aber nur die Differenz ΔU_A . Da in beide Werte für U_A die Spannung U^* linear eingeht, hebt sich diese beim Bilden der Differenz wieder aus, übrig bleibt nur:

$$\Delta U_A = U_{R^*2} - U_{R^*1} = 3,939\,579 \text{ V} - 1,939\,906 \text{ V} = 1,999\,673 \text{ V}$$

Hiermit kann nun R_i berechnet werden.

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{1,999\,673 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1,999\,673 \Omega$$

Methode 2: Wir haben gesehen, dass der Innenwiderstand R_{1Z} des Spannungsteilers aus R_1 und r_Z näherungsweise r_Z ist. Dazu in Reihe wirkt r_B , wobei in dieser Reihenschaltung r_B dominiert. Die restlichen Widerstandsanteile können vernachlässigt werden.

Der Strom I_{re} fließt in diesem Modell ständig, kann also für die Differenzen unberücksichtigt bleiben, denn es ist $R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$. Für jedes Milliampere Basisstrom fließt ein um den Faktor B größerer Kollektorstrom. Als Ausgangsstrom I_A haben wir die Summe von I_B und I_{C0} , wobei hier wiederum der Basisstrom I_B vernachlässigt werden kann.

Für die Ausgangsspannungsänderung ist ausschließlich der Spannungsfall an $R^* \approx r_B$ verantwortlich. Da hier ein Strom fließt, der um den Faktor B **kleiner** als I_A ist, wirkt es für den Ausgang so, als ob ein um den Faktor B kleinerer Widerstand verantwortlich wäre. Warum?

$$\begin{aligned}
 R_i &= \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \\
 &= \frac{\Delta U_A}{\frac{\Delta I_B}{B}} \\
 &= \frac{1}{B} \cdot \frac{\Delta U_A}{\Delta I_B} \\
 &= \frac{1}{B} \cdot \frac{\Delta U^*}{\Delta I_B} \\
 R_i &\approx \frac{1}{B} \cdot r_B
 \end{aligned}$$

Zusammengefasst:

$$R_i \approx \frac{r_B}{B}$$

Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem zuvor berechneten Ergebnis, dann kann man feststellen, dass die Abweichung minimal ist.

$$R_i \approx \frac{r_B}{B} = \frac{240 \Omega}{120} = 2 \Omega$$

Man kann also sagen, dass bei dieser Schaltung der Widerstand r_B maßgeblich für den Innenwiderstand der Schaltung verantwortlich ist. Teilt man ihn durch die Stromverstärkung, erhält man den Innenwiderstand.