

06.10.2019

Transistor als Verstärker

(Teil 3)

6.) Berechnungsbeispiel: - Zweistufiger NF - Verstärker -

6.1.) Statische Schaltungsbemessung (Ap - Einstellung)

Vorgegeben seien der Stromlaufplan einer Schaltung (die Funktion bleibe zunächst unberücksichtigt), die Arbeitspunkte der funktionsbestimmenden Bauelemente, die Versorgungsspannung(en) sowie einige Nebenbedingungen wie Spannungsteilerquerströme, Gegenkopplungen usw.

Ziel ist die Berechnung der erforderlichen Widerstände.

Zur Lösung dieser Aufgabenstellung sind folgende Schritte erforderlich:

1. Eintragung der Zählpfeile (Bezugspfeile) sämtlicher gegebenen Größen:

Die Zählpfeile der Spannungen und Ströme an funktionsbestimmenden Bauelementen sind standardisiert.

Knotenspannungen werden nach der Masse (Nullpotential) hin positiv gezählt.

Spannungsteilerquerströme haben mit den Lastströmen übereinstimmende Zählrichtung. Es ist oft zweckmäßig, bei Transistoren die Emitterströme zu berechnen und als gegebene Größen zu betrachten.

2. Ansatz von Maschengleichungen, in denen möglichst nur die gesuchte Größe als einzige Unbekannte auftritt und in denen möglichst keine schon berechnete Größe vorkommt (Gefahr der Verschleppung von Fehlern!). Sollte allerdings einmal ein Widerstandswert gewählt werden, der wesentlich von dem durch Rechnung ermittelten Wert abweicht, dann muß der Maschenumlauf über diesen Widerstand geführt werden, um Folgefehler zu vermeiden.

3. Auflösung der Maschengleichungen nach der Unbekannten. Einsetzen der gegebenen Größen (unter Beachtung ihrer Vorzeichen!) und Berechnung der gesuchten Größe.

Beispiel 4: Wechselspannungsverstärker

Es sind sämtliche zur Arbeitspunkteinstellung der Transistoren erforderlichen Widerstände des im Bild 2.11. dargestellten Stromlaufplanes eines Wechselspannungsverstärkers zu berechnen. Gegeben sind:

Versorgungsspannung: $U_S = 6,0 \text{ V}$

Arbeitspunkte:	U_{BE}/V	$I_B/\mu\text{A}$	U_{CE}/V	I_C/mA
VT_1 :	0,6	10	2,8	0,50
VT_2 :	0,7	40	2,7	2,00

Spannungsteilerquerstrom: $I_4 = 10 I_{B2}$

Spannung am Gegenkopplungswiderstand: $-R_6 I_{B2} = 0,9 \text{ V}$

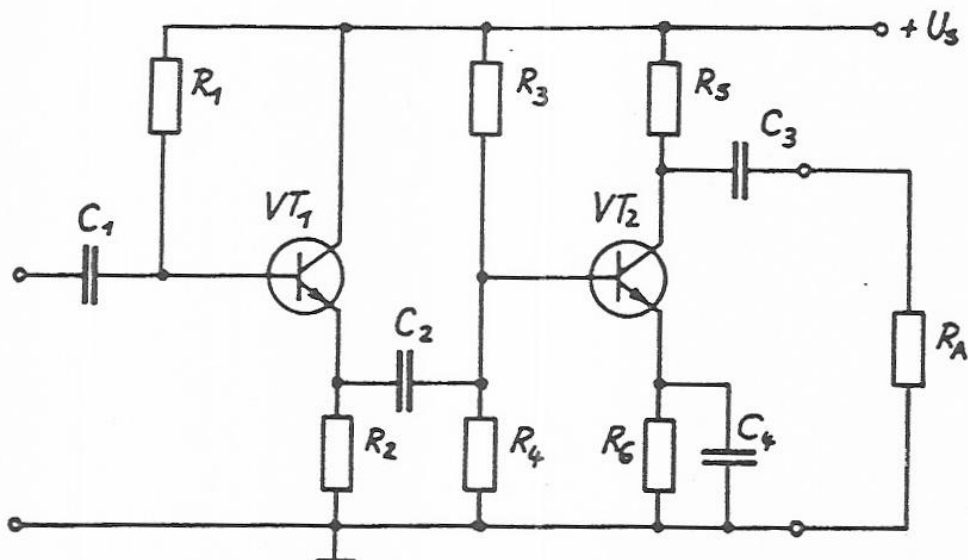


Bild 2.11. Stromlaufplan eines Wechselspannungsverstärkers

Lösung:

Zweckmäßig werden zunächst die Emitterströme der Transistoren berechnet, um diese als weitere gegebene Größen mit eintragen zu können:

Aus $I_E + I_B + I_C = 0$ folgen:

$$-I_{E1} = I_{B1} + I_{C1} = (0,01 + 0,50) \text{ mA} = \underline{0,51 \text{ mA}}$$

$$-I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = (0,04 + 2,00) \text{ mA} = \underline{2,04 \text{ mA}}$$

Im Bild 2.12. sind die Zählpfeile sämtlicher gegebenen Größen in den Stromlaufplan eingetragen.

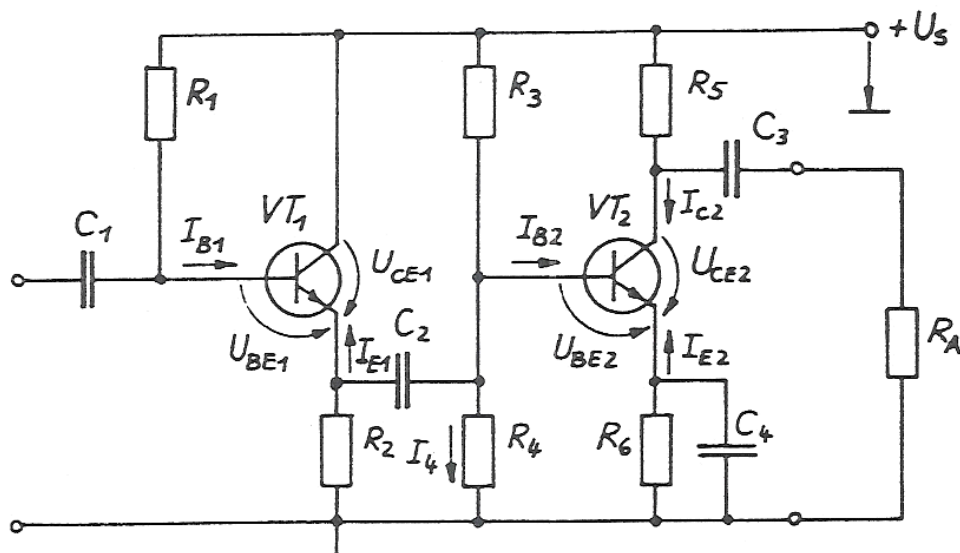


Bild 2.12. Stromlaufplan nach Eintragung der Zählpfeile

Ansätze und Berechnungen:

(Verfolgen Sie die Maschenumläufe! Beachten Sie dabei und beim Einsetzen der gegebenen Größen deren Vorzeichen! Durch die Koppelkondensatoren C_1 , C_2 , C_3 werden die einzelnen Stufen voneinander sowie von der Signalquelle und dem Abschlußwiderstand galvanisch getrennt.)

$$R_1 I_{B1} + U_{BE1} - U_{CE1} = 0$$

$$\underline{R_1} = \frac{-U_{BE1} + U_{CE1}}{I_{B1}} = \frac{(-0,6 + 2,8) \text{ V}}{0,01 \text{ mA}} = \frac{2,2 \text{ V}}{0,01 \text{ mA}} = \underline{220 \text{ k}\Omega}$$

$$-(+U_S) + U_{CE1} - R_2 I_{E1} = 0$$

$$\underline{R_2} = \frac{U_S - U_{CE1}}{-I_{E1}} = \frac{(6,0 - 2,8) \text{ V}}{0,51 \text{ mA}} = \frac{3,2 \text{ V}}{0,51 \text{ mA}} = \underline{6,3 \text{ k}\Omega}$$

$$-(+U_S) + R_3 (I_{B2} + I_4) + U_{BE2} - R_6 I_{E2} = 0$$

$$\underline{R_3} = \frac{U_S - U_{BE2} + R_6 I_{E2}}{I_{B2} + I_4} = \frac{(6,0 - 0,7 - 0,9) \text{ V}}{(0,04 + 10 \cdot 0,04) \text{ mA}} = \frac{4,4 \text{ V}}{0,44 \text{ mA}} = \underline{10 \text{ k}\Omega}$$

$$R_4 I_4 + R_6 I_{E2} - U_{BE2} = 0$$

$$\underline{R_4} = \frac{-R_6 I_{E2} + U_{BE2}}{I_4} = \frac{(0,9 + 0,7) \text{ V}}{10 \cdot 0,04 \text{ mA}} = \frac{1,6 \text{ V}}{0,40 \text{ mA}} = \underline{4,0 \text{ k}\Omega}$$

$$-(+U_S) + R_5 I_{C2} + U_{CE2} - R_6 I_{E2} = 0$$

$$\underline{R_5} = \frac{U_S - U_{CE2} + R_6 I_{E2}}{I_{C2}} = \frac{(6,0 - 2,7 - 0,9) \text{ V}}{2,00 \text{ mA}} = \frac{2,4 \text{ V}}{2,00 \text{ mA}} = \underline{1,2 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{R_6} = \frac{-R_6 I_{E2}}{-I_{E2}} = \frac{0,9 \text{ V}}{2,04 \text{ mA}} = \underline{0,44 \text{ k}\Omega}$$

Der Zähler des Bruches vor dem Ergebnis ist die Spannung am betreffenden Widerstand, der Nenner ist der durch den Widerstand fließende Strom. Beide haben gleiches Vorzeichen! Das Produkt beider ist die im Widerstand im Ruhestand auftretende Verlustleistung, für die der Widerstand mindestens bemessen sein muß. Im vorliegenden Beispiel reichen Schichtwiderstände mit einer Belastbarkeit von $0,1 \text{ W} = 100 \text{ mW}$ aus.

6.2.) Verstärkerberechnung - Zweistufiger NF - Verstärker -

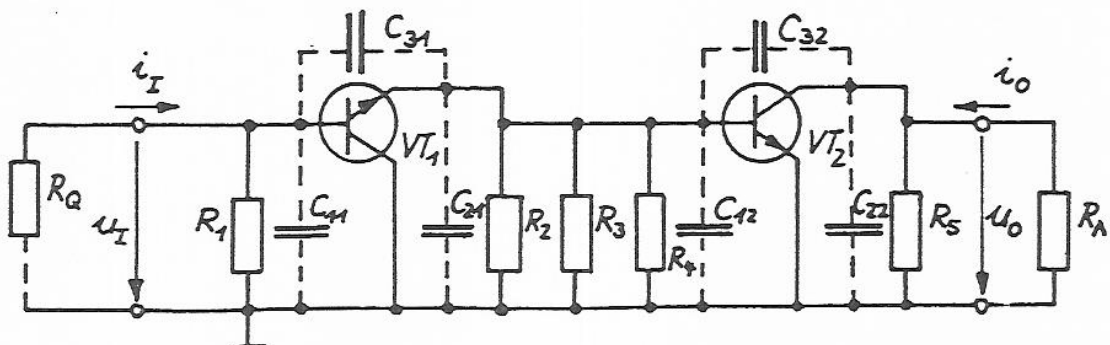
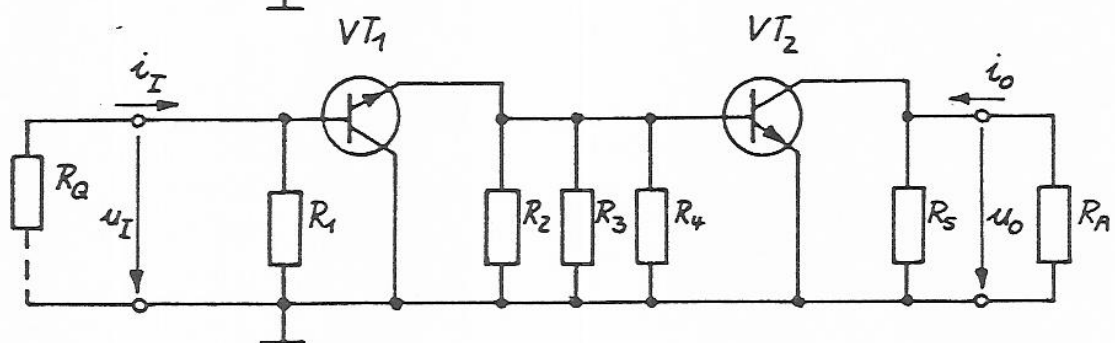
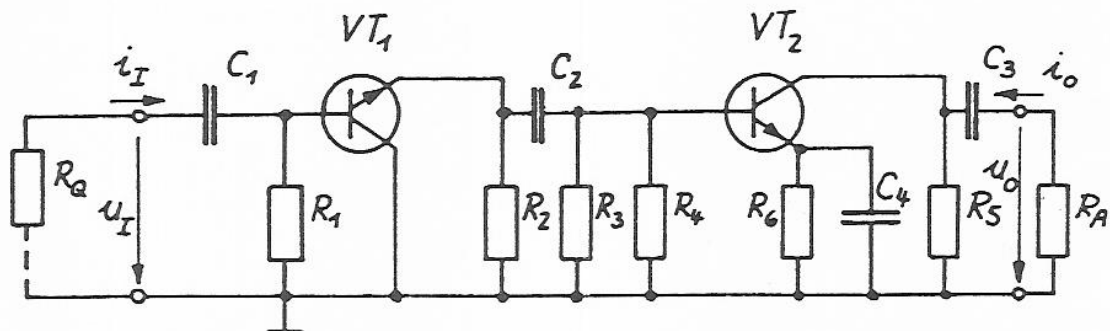
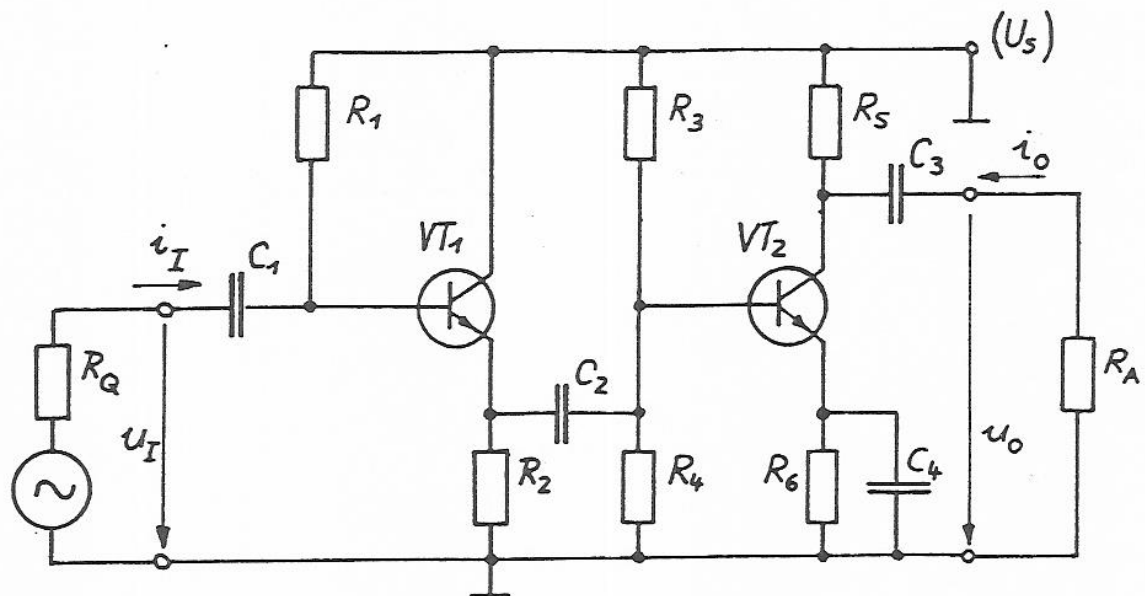
Beispiel : Berechnung eines Wechselspannungsverstärkers

Die Hauptkennndaten des im Beispiel 4 statisch bemessenen Wechselspannungsverstärkers (Bild 2.11.) sind für den Bereich mittlerer Frequenzen zu bestimmen. Für die eingestellten Arbeitspunkte sind die h-Parameter für die Emitterschaltung gegeben:

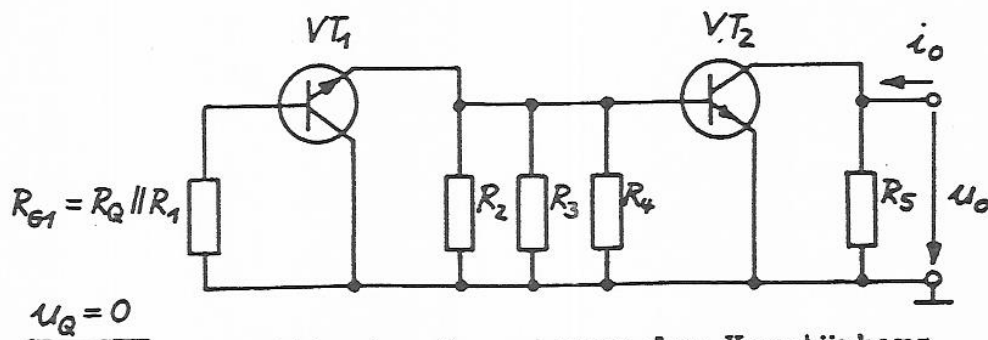
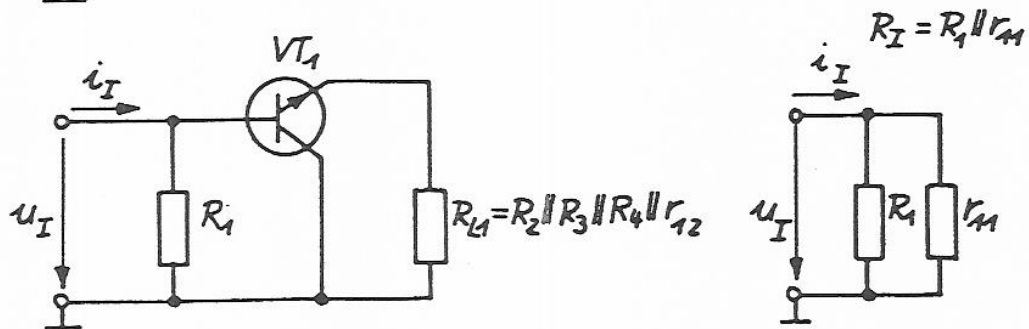
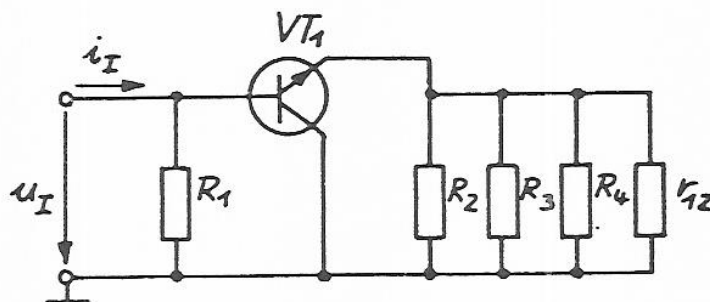
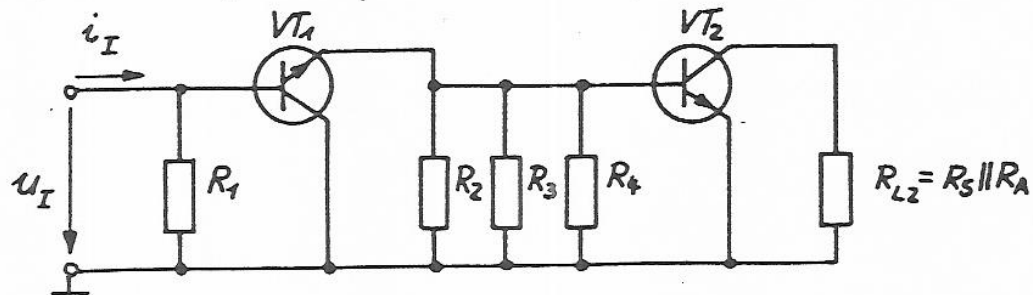
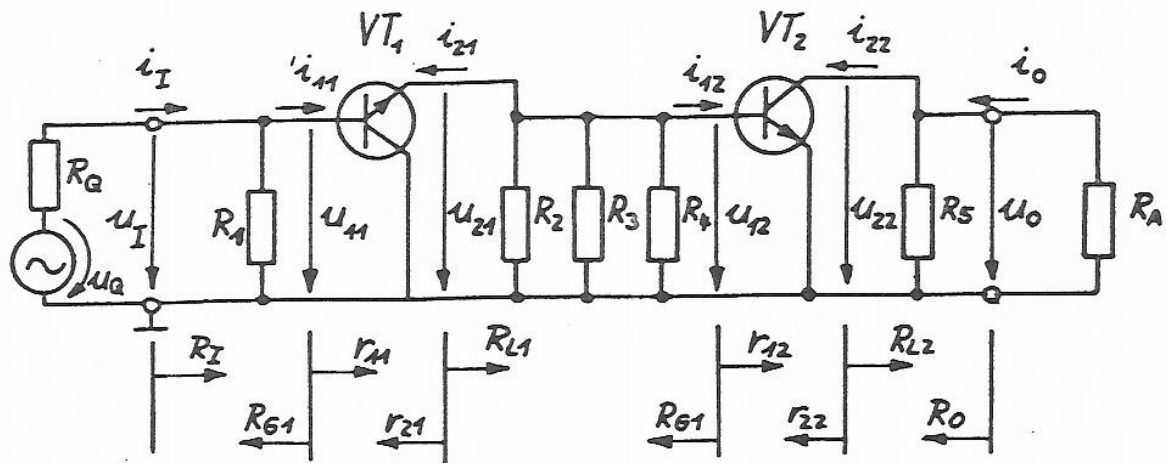
$h_{11E} = 1,0 \text{ k}\Omega$, $h_{12E} = 10^{-3}$, $h_{21E} = 50$, $h_{22E} = 0,1 \text{ mS}$. (Sie seien der Einfachheit wegen gleich angenommen). Der Ausgangswiderstand der Signalquelle ist $R_Q = 30 \text{ k}\Omega$, der Verstärker ist mit $R_A = 5,0 \text{ k}\Omega$ abgeschlossen. Die Widerstandswerte der Schaltung sind der Lösung des Beispiels 4 zu entnehmen.

Lösung:

Nach Kurzschließen der die Arbeitspunkte bestimmenden Versorgungsspannungsquelle ist der Stromlaufplan für tiefe, mittlere und hohe Frequenzen im Bild 2.29. umgezeichnet dargestellt worden. Die laut Aufgabenstellung für mittlere Frequenzen in Frage kommende Darstellung ist noch einmal speziell für die schrittweise Berechnung im Bild 2.30. aufbereitet worden.



Umzeichnung eines Stromlaufplanes zur Verstärkerberechnung bei tiefen, mittl. u. hohen Frequenzen



$$u_Q = 0$$

Schrittweise Berechnung des Verstärkers

Berechnungen:

Die Transistoren sind nicht rückwirkungsfrei ($h_{12} \neq 0$). Deshalb beginnt die Berechnung des Eingangswiderstandes am Ausgang des Verstärkers.

Lastwiderstand von VT_2 :

$$R_{L2} = \frac{R_5 R_A}{R_5 + R_A} = \frac{1,2 \cdot 5,0}{1,2 + 5,0} \text{ k}\Omega = \underline{0,97 \text{ k}\Omega}$$

Eingangswiderstand von VT_2 (Emitterschaltung):

$$\Delta h_E = h_{11E} \cdot h_{22E} - h_{12E} \cdot h_{21E} = 1,0 \text{ k}\Omega \cdot 0,1 \text{ mS} - 10^{-3} \cdot 50 = 0,05$$

$$r_{12} = \frac{h_{11E} + \Delta h_E R_{L2}}{1 + h_{22E} R_{L2}} = \frac{(1,0 + 0,05 \cdot 0,97) \text{ k}\Omega}{1 + 0,1 \text{ mS} \cdot 0,97 \text{ k}\Omega} = \frac{1,05 \text{ k}\Omega}{1,1} = \underline{0,95 \text{ k}\Omega}$$

Lastwiderstand von VT_1 :

$$\frac{1}{R_{L1}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{r_{12}} = (0,16 + 0,01 + 0,25 + 1,05) \text{ mS} = 1,47 \text{ mS}$$

$$R_{L1} = \frac{1}{1,47 \text{ mS}} = \underline{0,68 \text{ k}\Omega}$$

Eingangswiderstand von VT_1 (Kollektorschaltung):

Umrechnung der h-Parameter nach Glg. (2.8.):

$$h_{11C} = h_{11E} = 1,0 \text{ k}\Omega$$

$$h_{12C} = 1 - h_{12E} = 1 - 10^{-3} = 1$$

$$h_{21C} = -(1 + h_{21E}) = -(1 + 50) = -51$$

$$h_{22C} = h_{22E} = 0,1 \text{ mS}$$

$$\Delta h_C = h_{11C} h_{22C} - h_{12C} h_{21C} = 1,0 \text{ k}\Omega \cdot 0,1 \text{ mS} - 1 \cdot (-51) = 51$$

$$r_{11} = \frac{h_{11C} + \Delta h_C R_{L1}}{1 + h_{22C} R_{L1}} = \frac{(1,0 + 51 \cdot 0,68) \text{ k}\Omega}{1 + 0,1 \text{ mS} \cdot 0,68 \text{ k}\Omega} = \frac{34,7 \text{ k}\Omega}{1,07} = \underline{32,4 \text{ k}\Omega}$$

Man erkennt deutlich den im Vergleich zur Emitterschaltung sehr hohen Eingangswiderstand der Kollektorschaltung des Transistors.

Eingangswiderstand des Verstärkers:

$$\underline{R_I} = \frac{R_1 \cdot r_{11}}{R_1 + r_{11}} = \frac{220 \cdot 32,4}{220 + 32,4} \text{ k}\Omega = \underline{28,2 \text{ k}\Omega}$$

Der Verstärkereingang, als passiver Zweipol betrachtet, ist an die Signalquelle mit dem Innenwiderstand $R_Q = 30 \text{ k}\Omega$ gut angepaßt. Die Signalquelle gibt die maximal mögliche Leistung an den Verstärker ab.

Zur Berechnung der Spannungsverstärkung werden die Zwischenergebnisse der Widerstandsberechnung mit verwendet.

Der Spannungsverstärkungsfaktor des gesamten Verstärkers ist

$$V_U = \frac{u_O}{u_I}.$$

Durch systematische Erweiterung dieses Bruches mit dem jeweils nachfolgenden Spannungssignal erhält man (s. Bild 2.30. oben!):

$$V_U = \frac{u_{11}}{u_I} \cdot \frac{u_{21}}{u_{11}} \cdot \frac{u_{12}}{u_{21}} \cdot \frac{u_{22}}{u_{12}} \cdot \frac{u_O}{u_{22}} = 1 \cdot V_{u1} \cdot 1 \cdot V_{u2} \cdot 1$$

$$V_U = V_{u1} \cdot V_{u2}$$

Spannungsverstärkung des VT_2 :

$$\underline{V_{u2}} = \frac{u_{22}}{u_{21}} = \frac{-h_{21E} R_{L2}}{h_{11E} + \Delta h_E R_{L2}} = \frac{-50 \cdot 0,97 \text{ k}\Omega}{1,05 \text{ k}\Omega} = \underline{-46,2}$$

Das Minuszeichen ergibt sich aus der Signalumkehr der Emitterschaltung.

Spannungsverstärkung des VT_1 :

$$\underline{V_{u1}} = \frac{u_{21}}{u_{11}} = \frac{-h_{21C} R_{L1}}{h_{11C} + \Delta h_C R_{L1}} = \frac{51 \cdot 0,68 \text{ k}\Omega}{34,7 \text{ k}\Omega} = \underline{0,999}$$

Die Spannungsverstärkung einer Kollektorstufe ist nur wenig kleiner als 1. In einer Kollektorstufe wird das Spannungssignal nicht umgekehrt.

Damit wird $V_U = 0,999 (-46,2) \underline{-46}$

Die Stromverstärkung des gesamten Verstärkers ist $V_I = \frac{i_0}{i_I}$.

Durch systematische Erweiterung dieses Bruches mit dem jeweils nachfolgenden Stromsignal erhält man (s. Bild 2.30. oben!):

$$V_I = \frac{i_{11}}{i_I} \cdot \frac{i_{21}}{i_{11}} \cdot \frac{i_{12}}{i_{21}} \cdot \frac{i_{22}}{i_{12}} \cdot \frac{i_0}{i_{22}}$$

Hier folgen durch die Widerstände bedingte Stromteilungen und durch die Transistoren bewirkte Stromverstärkungsfaktoren aufeinander. Dabei sind die Zählrichtungen der Ströme mit zu berücksichtigen:

$$V_I = \frac{R_I}{R_{11}} \cdot V_{11} \left(-\frac{R_{L1}}{R_{12}}\right) \cdot V_{12} \cdot \frac{R_{L2}}{R_A}$$

Nach Einsetzen der Betriebsparameter ergibt sich daraus:

$$V_I = -\frac{R_I}{R_A} V_U.$$

Zum gleichen Ergebnis gelangt man auf eine viel einfachere Überlegung:

$$V_I = \frac{i_0}{i_I} = \frac{-u_0/R_A}{u_I/R_I} = -\frac{R_I}{R_A} \cdot \frac{u_0}{u_I} = -\frac{R_I}{R_A} V_U. \quad (2.10.)$$

Diese Formel sollten Sie sich einprägen. Ein Vergleich mit der Glg. (2.9.) zeigt die Übereinstimmung: Was für den einzelnen Transistor (als Verstärker) gilt, gilt sinngemäß auch für einen gesamten Verstärker.

$$\underline{V_I} = -\frac{28,2 \text{ k}}{5,0 \text{ k}} (-46) = \underline{260}$$

Zu beachten sind die stets unterschiedlichen Vorzeichen von Spannungs- und Stromverstärkungsfaktor, bedingt durch die festgelegte Zählpfeilzuordnung.

Leistungsverstärkung des Verstärkers:

$$\underline{V_P = V_U \cdot V_I = -46 \cdot 260 \approx -2 \cdot 10^4}$$

Das Minuszeichen rührt von der festgelegten Zählpfeilsuordnung her. Danach wird die Ausgangsleistung in den Verstärker hineinfließend positiv gezählt, tatsächlich fließt sie aus dem Verstärker heraus.

Die Berechnung des Ausgangswiderstandes beginnt am Verstärkereingang. Die Quellenspannung der Signalquelle wird dabei gleich Null gesetzt (Zweipoltheorie).

Generatorwiderstand vor VT_1 :

$$\underline{R_{G1} = \frac{R_Q R_1}{R_Q + R_1} = \frac{30 \cdot 220}{30 + 220} \text{ k}\Omega = 26,4 \text{ k}\Omega}$$

Ausgangswiderstand von VT_1 :

$$\underline{r_{21} = \frac{h_{11C} + R_{G1}}{\Delta h_C + h_{22C} R_{G1}} = \frac{(1,0 + 26,4) \text{ k}\Omega}{51 + 0,1 \text{ mS} \cdot 26,4 \text{ k}\Omega} = 0,51 \text{ k}\Omega}$$

Generatorwiderstand vor VT_2 :

$$\frac{1}{R_{G2}} = \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = (1,96 + 0,16 + 0,01 + 0,25) \text{ mS} = 2,38 \text{ mS}$$

$$\underline{R_{G2} = \frac{1}{2,38 \text{ mS}} = 0,42 \text{ k}\Omega}$$

Ausgangswiderstand von VT_2 :

$$\underline{r_{22} = \frac{h_{11E} + R_{G2}}{\Delta h_E + h_{22E} R_{G2}} = \frac{(1,0 + 0,42) \text{ k}\Omega}{0,05 + 0,1 \text{ mS} \cdot 0,42 \text{ k}\Omega} = 15,4 \text{ k}\Omega}$$

Ausgangswiderstand des Verstärkers:

$$\underline{R_O = \frac{r_{22} R_5}{r_{22} + R_5} = \frac{15,4 \cdot 1,2}{15,4 + 1,2} \text{ k}\Omega = 1,1 \text{ k}\Omega}$$