

Elektronische Schaltungen – Hochfrequenzschaltungen und Leistungselektronik

Vorlesung 2

Prof. Nils Weimann

IW / Bauelemente der Höchstfrequenzelektronik (BHE)
nils.weimann@uni-due.de

16.04.2025



Struktur der Vorlesung (1)

1. kurze Wiederholung: passive Elemente, physikalisches Prinzip der Dioden und Transistoren
2. Bipolartransistor (BJT): Grundsaltungen, Konstantstromquelle, Darlington-Schaltung, Differenzverstärker, Rauschen
3. Feldeffekttransistor (FET): Grundsaltungen, Stromquelle, Differenzverstärker, steuerbarer Widerstand
4. Operationsverstärker: Eigenschaften, Gegenkopplung, interner Aufbau, Frequenzgang
5. Analogrechner und gesteuerte Quellen
6. Aktive Filter: Tiefpass, Bandpass, Hochpass, switched capacitor

Struktur der Vorlesung (2)

7. Oszillatoren: LC, Quarz, Wien-Brücke, Colpitts, Gegentakt
8. Breitbandverstärker (1): Frequenzabhängigkeit, Kaskode, Differenz- und Symmetrische Verstärker
9. Breitbandverstärker (2): Spannungsfolger, Operationsverstärker, Transimpedanz- und Cherry-Hooper-Verstärker
10. Leistungsverstärker (1): Emitter- und Sourcefolger, komplementäre, Dimensionierung, Ansteuerschaltung
11. Stromversorgung: lineare Regler, Referenzspannung, Schaltregler
12. DA- und AD-Wandler: Prinzipien und Schaltkreise

Passive Netzwerke

Kompensierter Spannungsteiler

Kompensierter Spannungsteiler: Netzwerk

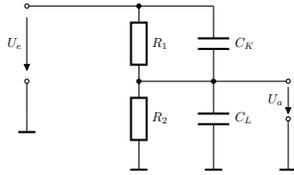


Abbildung: kompensierter Spannungsteiler

- ▶ kapazitiv belasteter ohmscher Spannungsteiler → Tiefpass
- ▶ Kompensation durch Hochpass

$$\frac{C_K}{C_L} = \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ dadurch selbes Spannungsteiler-Verhältnis auch bei hohen Frequenzen → Bias-Schaltkreis für Transistoren

Bipolare Bauelemente

pn-Diode

BJT

pn-Diode: Symbol und Kennlinie

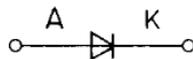


Abbildung: Schaltsymbol Diode

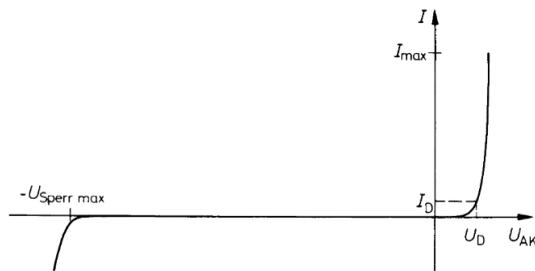


Abbildung: Kennlinie Diode

pn-Diode: IV-Kennlinie



Abbildung: Kennlinie Diode

- ▶ Kennlinie

$$I = I_S(T) \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{AK}}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right]$$

- ▶ Sperrstrom I_S
- ▶ Idealität m
- ▶ Temperaturspannung $U_T = 26 \text{ meV}$

BJT

BJT: Polarität

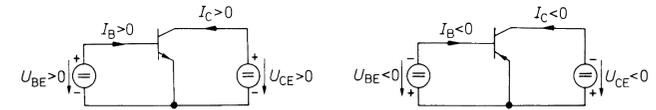


Abbildung: Polung *npn* und *pnp* Bipolar-Transistor

- ▶ *npn* in Vorwärtsbetrieb
 - ▶ $U_{BE} > 0$
 - ▶ $U_{CE} > 0$
 - ▶ $I_B > 0, I_C = \beta I_B > 0$
- ▶ *pnp* in Vorwärtsbetrieb
 - ▶ $U_{BE} < 0$
 - ▶ $U_{CE} < 0$
 - ▶ $I_B < 0, I_C = \beta I_B < 0$

BJT: Kennlinien

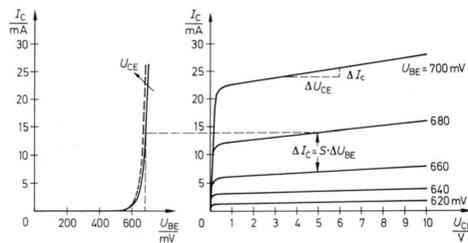


Abbildung: ÜKL und AKF Bipolar-Transistor

- ▶ Übertragungskennlinie $I_C(U_{BE}) = I_{CS}(U_{CE}, T)e^{U_{BE}/kT}$
- ▶ Ausgangskennlinienfeld $I_C(U_{CE})|_{U_{BE}}$

BJT: Steilheit

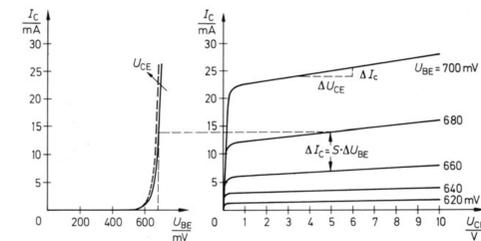


Abbildung: ÜKL und AKF Bipolar-Transistor

- ▶ $I_C(U_{BE}) = I_{CS}(U_{CE}, T)e^{U_{BE}/kT}$
- ▶ Steilheit $S = \partial I_C / \partial U_{BE}$
- ▶ $S = \frac{I_C}{U_T} e^{U_{BE}/kT} = I_C / U_T$

BJT: diff. Ausgangswid.

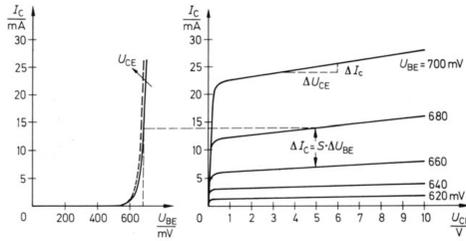


Abbildung: ÜKL und AKF Bipolar-Transistor

- ▶ $I_C(U_{BE}) = I_{CS}(U_{CE}, T)e^{U_{BE}/kT}$
- ▶ diff. Ausg.wid. $r_{CE} = \partial U_{CE} / \partial I_C = U_Y / I_C$
- ▶ Early-Spannung U_Y , verbunden mit Änderung der BC-RLZ bei sich änderndem U_{CE} ($U_Y = 80 \text{ V bis } 200 \text{ V}$)

BJT: diff. Eingangswid.

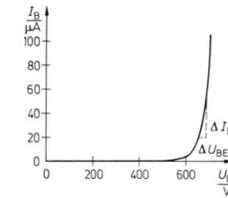


Abbildung: ÜKL und AKF Bipolar-Transistor

- ▶ $I_C(U_{BE}) = I_{CS}(U_{CE}, T)e^{U_{BE}/kT}$
- ▶ diff. Eing.wid. $r_{BE} = \partial U_{BE} / \partial I_B = mU_T / I_B$
- ▶ Korrekturfaktor i.A. von I_C abhängig

BJT: Stromverstärkung

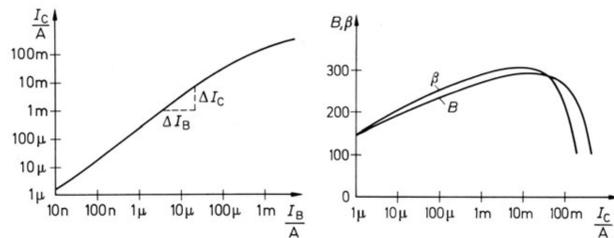


Abbildung: Kollektorstrom und Stromverstärkung

- ▶ Erreichen der Sättigung, Arbeitspunkt darunter wählen
- ▶ Großsignal-Stromverstärkung $B = I_C / I_B$
- ▶ (differentielle) Kleinsignal-Stromverstärkung im Arbeitspunkt $\beta = \partial I_C / \partial I_B$

BJT: Isolation

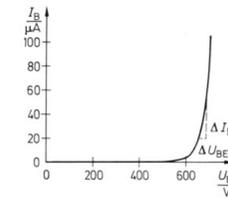


Abbildung: EKL

- ▶ kaum Einfluss von U_{CE} auf Verlauf der EKL
- ▶ gute "Isolation" des Transistors, Grundlage für mögliche Kaskadierung von Verstärkerstufen
- ▶ Rückwirkung $A_r = \partial U_{BE} / \partial U_{CE}$
- ▶ Rückwärtssteilheit $S_r = \partial I_B / \partial U_{CE} = -A_r / \beta \sim 10^{-4}$

BJT: Vierpol

- ▶ allgemeiner Ansatz für Ströme

$$I_B = I_B(U_{BE}, U_{CE})$$

$$I_C = I_C(U_{BE}, U_{CE})$$

- ▶ totale Differentiale

$$dI_B = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \cdot dU_{BE} + \frac{\partial I_B}{\partial U_{CE}} \cdot dU_{CE}$$

$$dI_C = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \cdot dU_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} \cdot dU_{CE}$$

BJT: Vierpol

- ▶ kleine Rückwirkung $S_r = \partial I_B / \partial U_{CE} \approx 0$
- ▶ Wid. $1/r_{BE} = \partial I_B / \partial U_{BE}$, $1/r_{CE} = \partial I_C / \partial U_{CE}$
- ▶ Vorwärts-Steilheit $S = \partial I_C / \partial U_{BE}$
- ▶ Grundgleichungen BJT

$$dI_B = \frac{1}{r_{BE}} \cdot dU_{BE}$$

$$dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot dU_{CE}$$

- ▶ Matrizen Schreibweise (Y-Matrix)

$$\begin{pmatrix} dI_B \\ dI_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/r_{BE} & 0 \\ S & 1/r_{CE} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dU_{CE} \end{pmatrix} = Y \cdot \begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dU_{CE} \end{pmatrix}$$

BJT: Emitterschaltung

- ▶ Y-Matrix

$$\begin{pmatrix} dI_B \\ dI_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/r_{BE} & 0 \\ S & 1/r_{CE} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dU_{CE} \end{pmatrix} = Y \cdot \begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dU_{CE} \end{pmatrix}$$

- ▶ H-Matrix

$$\begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dI_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11e} & h_{12e} \\ h_{21e} & h_{22e} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dI_B \\ dU_{CE} \end{pmatrix} = H_e \cdot \begin{pmatrix} dI_B \\ dU_{CE} \end{pmatrix}$$

- ▶ Zusammenhang Kleinsignalelemente, Y, H

$$1/r_{BE} = y_{11e} = 1/h_{11e}$$

$$S_r = y_{12e} = -h_{12e}/h_{11e} \approx 0$$

$$S = y_{21e} = h_{21e}/h_{11e} = \beta/r_{BE}$$

$$1/r_{CE} = y_{22e} = \frac{1}{h_{11e}} (h_{11e}h_{22e} - h_{21e}h_{12e}) \approx h_{22e}$$

BJT: Grenzdaten

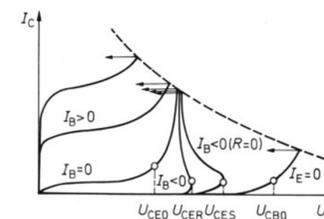
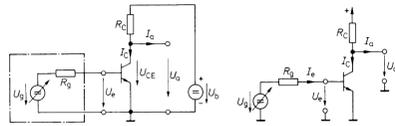


Abbildung: AKL im Grenzbereich

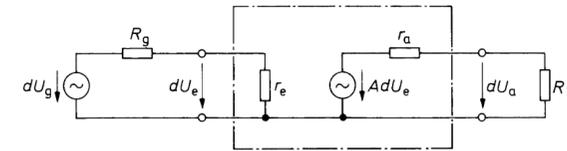
- ▶ CB-Sperrspannung U_{CB0}
- ▶ CE-Sperrspannung $U_{CE0} < U_{CB0}$ (Gain des Transistors)
- ▶ Sperrstrom abfließen lassen mit ext. Basiswiderstand $U_{CE0} < U_{CER} < U_{CES} < U_{CB0}$
- ▶ Durchbruch 2. Art (neg. Temp.koeff.)
- ▶ max. Verlustleistung, Wärmeleitfähigkeit

BJT: Emitter-Grundschriftg.



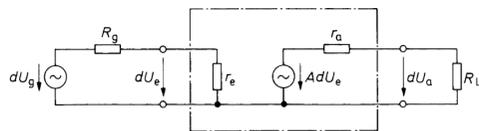
- ▶ $A = -\frac{dU_a}{dU_e} = -S \frac{R_C \cdot r_{CE}}{R_C + r_{CE}} = -S (R_C \parallel r_{CE})$
- ▶ 1. Grenzfall $R_C \ll r_{CE} \Rightarrow A = -S \cdot R_C = -\frac{I_C \cdot R_C}{U_T} \propto R_C$
- ▶ 2. Grenzfall $R_C \gg r_{CE} \Rightarrow \mu \equiv |A| = S (R_C \parallel r_{CE}) \sim S \cdot r_{CE}$ groß!
- ▶ $\mu = S \cdot r_{CE} = \frac{I_C}{U_T} \cdot \frac{U_Y}{I_C} = \frac{U_Y}{U_T}$ (mit Konstantstromquelle)

BJT: Quellen- und Lastwiderstand



- ▶ Innenwiderstand R_g der Quelle in Serie am Eingang
- ▶ Lastwiderstand (Verbraucher) R_L in Serie am Ausgang
- ▶ reduzierte Eingangsspannung $dU_e = \frac{r_e}{r_e + R_g} \cdot dU_g$
- ▶ am Eingang $dU_e = dU_{BE}$, $dI_e = dI_B$
- ▶ mit Grundgleichung $r_e = r_{BE} = \beta/S = \beta U_T/I_C \propto I_C$
- ▶ Signal soll nicht am Generatorwiderstand abfallen \rightarrow wähle r_e möglichst groß

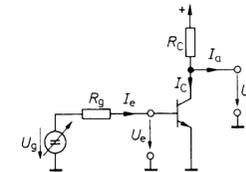
BJT: Quellen- und Lastwiderstand



- ▶ Last R_L bildet mit Ausgangswiderstand $r_a = \partial U_a / \partial I_a$ einen Spannungsteiler
- ▶ Betriebsverstärkung mit Last $A_b = A \frac{R_L}{R_L + r_a}$
- ▶ Einfluss von R_g und R_L auf effektive Verstärkung

$$\frac{\partial U_a}{\partial U_g} = \frac{r_e}{r_e + R_g} \cdot A_b = \frac{r_e}{r_e + R_g} \cdot A \cdot \frac{R_L}{R_L + r_a}$$
- ▶ was ist r_a ?

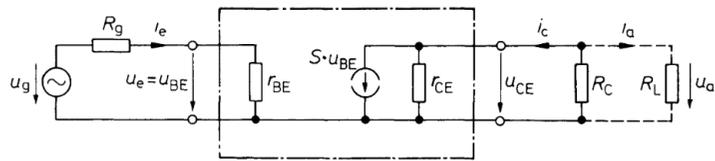
BJT: Quellen- und Lastwiderstand



- ▶ Knotenregel am Ausgang $-dI_C - dI_a - dU_a/R_C = 0$
- ▶ mit Grundgleichung $-dI_a - \frac{dU_a}{R_C} = S \cdot dU_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot dU_a$
- ▶ keine Rückwirkung $dU_g = 0 \Rightarrow dU_{BE} = 0$
- ▶ Ergebnis $r_a = -\frac{dU_a}{dI_a} = \frac{R_C \cdot r_{CE}}{R_C + r_{CE}} = R_C \parallel r_{CE}$
- ▶ in Betriebsverstärkung

$$A_b = \frac{A \cdot R_L}{R_L + r_a} = -S \frac{R_C \cdot r_{CE} \cdot R_L}{R_C \cdot r_{CE} + R_L r_{CE}} = -S (R_C \parallel r_{CE} \parallel R_L)$$

BJT: Kleinsignal-Ersatzschaltbild



- ▶ Betriebsverstärkung $A_b = -S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_L)$
- ▶ Parallelschaltung von R_C, r_{CE}, R_L
- ▶ im KSEB ist DC-Spannungsquelle kurzgeschlossen (ideale Quelle ohne Innenwiderstand)
- ▶ Spannungsteiler $\frac{r_{BE}}{r_{BE} + R_g}$ am Eingang
- ▶ resultierende u_{BE} wird mit Steilheit S verstärkt
- ▶ Zusammenhang direkt ablesbar, lineare Netzwerktheorie

BJT: nichtlineare Verzerrung

- ▶ Übertragungsfunktion nichtlinear, Sinus-Signal am Eingang

$$U_e(t) = U_{eA} + \hat{U}_e \sin \omega t$$

- ▶ in Großsignal-ÜKL

$$I_C(t) = I_S \cdot e^{\frac{U_{eA}}{U_T}} \cdot e^{\frac{\hat{U}_e}{U_T}} \sin \omega t$$

- ▶ Reihenentwicklung gibt **Grund-** und **Oberschwingungen**

$$I_C(t) = I_S \cdot e^{\frac{U_{eA}}{U_T}} \left[1 + \frac{\hat{U}_e}{U_T} \sin \omega t + \frac{\hat{U}_e^2}{4U_T^2} (1 - \cos 2\omega t) + \dots \right]$$

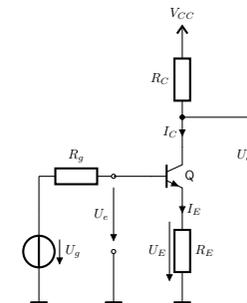
- ▶ **Klirrfaktor** ablesen

$$K \approx \frac{\hat{I}_{C,1}}{\hat{I}_{C,0}} = \frac{\hat{U}_e}{4U_T} < 1\% \Rightarrow U_e < 1 \text{ mV}$$

BJT: Strom-Gegenkopplung

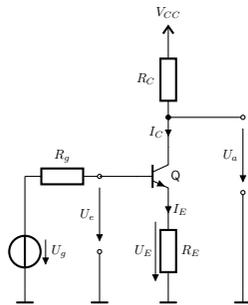
- ▶ **Linearisierung** des Transistors
- ▶ Ausgangssignal wird zurückgekoppelt über ohmschen Widerstand
- ▶ die Verstärkung wird begrenzt durch den linearen Widerstand, statt durch den nichtlinearen Transistor

BJT: Strom-Gegenkopplung



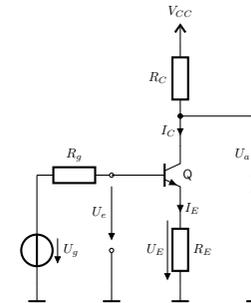
- ▶ Stromgegenkopplung durch R_E
- ▶ je mehr Strom I_E durch R_E fließt, umso höher liegt das Emitterpotential wegen $U_E = I_E R_E$
- ▶ dadurch sinkt $U_{BE} = U_e - U_E$
- ▶ und I_E nimmt ab

BJT: Strom-Gegenkopplung



- ▶ Analyse: Spannungsänderung ΔU_e
- ▶ vernachlässige Änderung $\Delta U_{BE} \propto \Delta \ln I_C$
- ▶ dadurch ist $\Delta U_E \approx \Delta U_e$

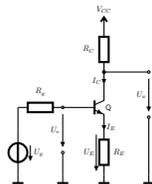
BJT: Strom-Gegenkopplung



- ▶ mit $\Delta U_{BE} \approx 0$
- ▶ Spannungsverstärkung

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} \approx -\frac{R_C}{R_E}$$

BJT: Strom-Gegenkopplung



- ▶ genauere Betrachtung

$$\begin{aligned} dU_{BE} &= dU_e - dU_E; & dU_a &= -R_C dI_C \\ dU_{CE} &= dU_a - dU_E; & dU_E &\approx R_E dI_C \end{aligned}$$

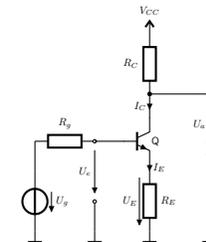
- ▶ einsetzen in Grundgleichung

$$dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot dU_{CE}$$

- ▶ ergibt

$$A = \frac{dU_a}{dU_e} = -\frac{SR_C}{1 + SR_E + R_C/r_{CE}} = -\frac{R_C}{R_E + 1/S + R_C/\mu}$$

BJT: Strom-Gegenkopplung



- ▶ negativer Kehrwert der Spannungsverstärkung

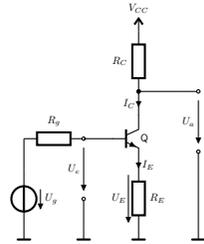
$$-\frac{1}{A} = \frac{1}{S(R_C \parallel r_{CE})} + \frac{R_E}{R_C}$$

- ▶ für $R_E \rightarrow 0$ ist

$$A \rightarrow -S(R_C \parallel r_{CE})$$

also die Spannungsverstärkung des Transistors in Emitterschaltung ohne Rückkopplung

BJT: Strom-Gegenkopplung



- ▶ mit starker Gegenkopplung

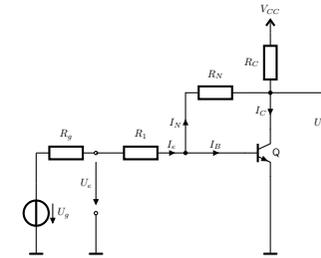
$$\frac{R_C}{R_E} \ll S(R_C \parallel r_{CE})$$

- ▶ folgt im Grenzfall

$$A = -R_C/R_E$$

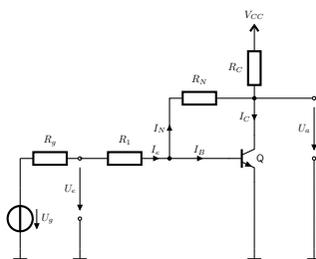
(wie anfangs qualitativ bestimmt)

BJT: Spannungs-Gegenkopplung



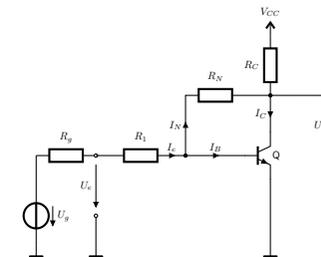
- ▶ addiere Teil der Ausgangsspannung über R_N zur Eingangsspannung
- ▶ EF ist invertierender Verstärker
- ▶ Eingangsspannung wird reduziert

BJT: Spannungs-Gegenkopplung



- ▶ erhöhe Eingangsspannung um ΔU_e , dadurch höheres U_{BE}
- ▶ mit höherem Strom I_C fällt mehr Spannung an R_C ab
- ▶ Ausgangsspannung erniedrigt sich um $|\Delta U_a| \gg U_{BE}$
- ▶ $R_N \gtrsim r_{BE}$ gibt $\Delta I_B \ll \Delta I_N$ und $\Delta I_N \approx \Delta I_e$

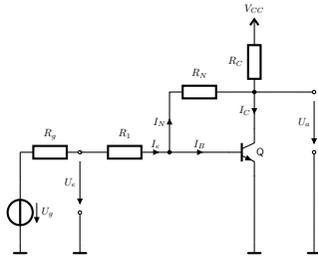
BJT: Spannungs-Gegenkopplung



- ▶ mit großem $R_1 \gg \{R_N, r_{BE}\}$ fällt Eingangs-Spannungsänderung $\Delta U_e \gg \Delta U_{BE}$ fast ganz über R_1 ab
- ▶ damit Ausgangsspannungsänderung

$$\Delta U_a = \Delta U_{BE} - \Delta I_N R_N \approx -\Delta I_N R_N \approx -\frac{R_N}{R_1} \Delta U_e$$

BJT: Spannungs-Gegenkopplung



- ▶ genaue Rechnung aus Grundgleichungen

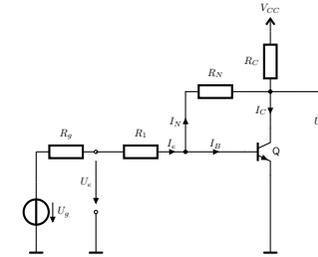
$$\frac{1}{A} = \frac{dU_e}{dU_a} = - \frac{1 + R_1 / (r_{BE} \parallel R_N)}{\left(S - \frac{1}{R_N}\right) (R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} - \frac{R_1}{R_N}$$

- ▶ Näherung mit Rückkopplung $R_N \gg 1/S$

$$\frac{1}{A} = - \frac{1 + R_1 / (r_{BE} \parallel R_N)}{S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} - \frac{R_1}{R_N}$$

- ▶ Grenzfall $R_1 \rightarrow 0$ gibt $A = -S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)$

BJT: Spannungs-Gegenkopplung



- ▶ Dimensionierung für stabile Verstärkung: aus

$$\frac{1}{A} = - \frac{1 + R_1 / (r_{BE} \parallel R_N)}{S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} - \frac{R_1}{R_N}$$

- ▶ folgt mit Ansatz $R_N \approx R_C \approx r_{BE}$ und $R_1 \sim R_N$
- ▶ Spannungs-Verstärkung $A = -R_N / R_1$

Danke für Ihre Teilnahme