



Elektronik 1, Foliensatz 3: Schaltungen mit Bipolartransistoren

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU-Clausthal (E1F3.pdf)
4. Dezember 2023



Bipolartransistoren

- 1.1 Spannungsverstärker
- 1.2 Differenzverstärker
- 1.3 Stromquellen
- 1.4 Transistorinverter
- 1.5 DT-Gatter
- 1.6 Spannungsstabilisierung
- 1.7 Aufgaben

Inhalt Foliensatz 3

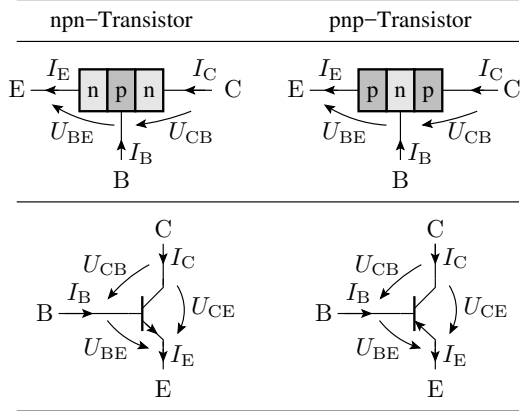


Bipolartransistoren



1. Bipolartransistoren

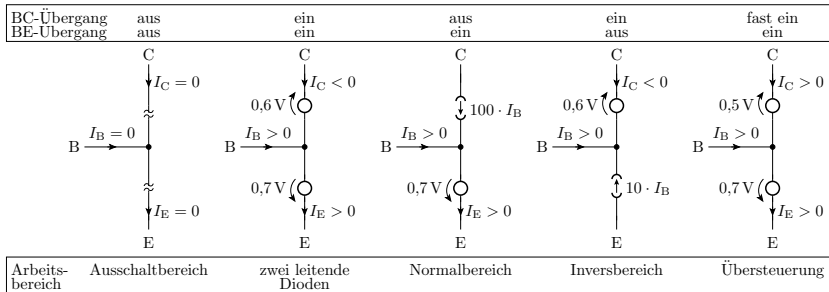
Bipolartransistor: Aufbau, Anschlüsse und Schaltsymbol



- E Emitter
- B Basis
- C Kollektor
- I_E Emitterstrom
- I_B Basisstrom
- I_C Kollektorstrom
- U_{BE} Basis-Emitter-Spannung
- U_{CB} Kollektor-Basis-Spannung
- U_{CE} Kollektor-Emitter-Spannung

Arbeitsbereiche

Ein Transistor hat viele Arbeitsbereiche¹:



- Die Spannungswerte und Stromverstärkungen im Bild sind nur grobe Richtwerte.
- Die Vorzeichen im Bild gelten für npn-Transistoren. Für pnp-Transistoren sind sie genau umgekehrt.

¹Die pn-Übergänge werden bei Transistoren nicht Durchbruchbereich betrieben.



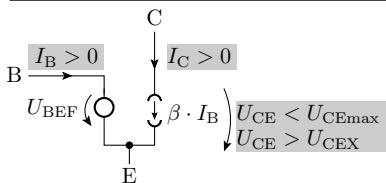
1. Bipolartransistoren

Normalbereich

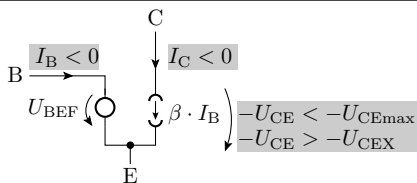
Fast alle Transistorschaltungen (außer Digitalschaltungen) nutzen den Normalbereich:

- Basis-Emitter-Übergang im Durchlassbereich.
Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode.
- Basis-Kollektor-Übergang im Sperrbereich. Wirkt wie eine vom Basisstrom gesteuerte Stromquelle (Transistoreffekt).

npn-Transistorersatzschaltung



pnp-Transistorersatzschaltung



Voraussetzung für die Gültigkeit der Ersatzschaltung

- Das ist ein einfaches, aber kein sehr genaues Modell.



1. Bipolartransistoren

Modellparameter für zwei typische Transistoren

| | β | U_{BEF} | U_{CEX} | U_{CEmax} | P_{max} |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|
| BC327-16 (pnp) -25 -40 | 100 - 250 160 - 400 250 - 600 | $\approx -0,9 \text{ V}$ | $\approx -0,3 \text{ V}$ | -45 V | 625 mW |
| BC337-16 (npn) -25 40 | 100 - 250 160 - 400 250 - 630 | $\approx 0,9 \text{ V}$ | $\approx 0,3 \text{ V}$ | 45 V | 625 mW |

U_{BEF} Basis-Emitter-Flussspannung

β Stromverstärkung

U_{CEX} Kollektor-Emitter-Restspannung

U_{CEmax} Spannungsfestigkeit zwischen Kollektor und Emitter

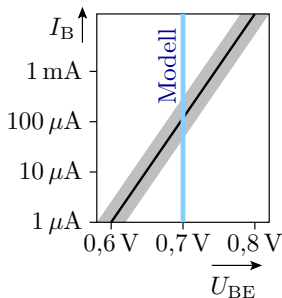
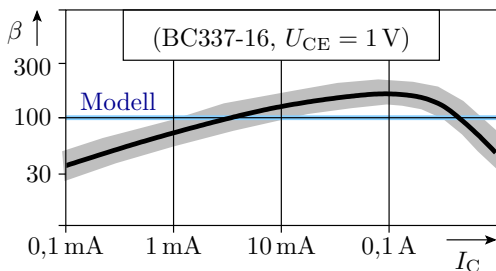
P_{max} maximale Verlustleistung



1. Bipolartransistoren

Einfaches, aber nicht sehr genaues Modell

- Die Stromverstärkung ist in Datenblättern ein breiter Bereich, z.B. 100 bis 250. Dahinter verbergen sich große fertigungs- und arbeitspunktabhängige Schwankungen.
- Die Angabe der Basis-Emitter-Flussspannung ist mit einer Toleranz von ca. $\pm 20\%$ behaftet.



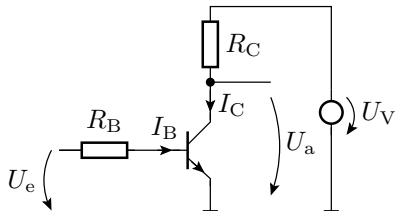
- Schaltungen so entwerfen, dass sie funktionieren, solange die Parameter aller Bauteile in ihren Toleranzbereichen liegen!



Spannungsverstärker

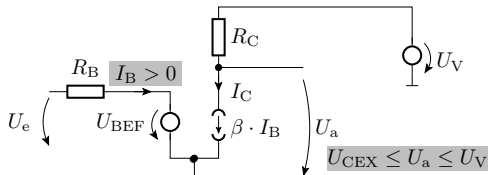
Einfacher Spannungsverstärker

- R_B bildet U_e auf I_B ab.
- Der Transistor bildet I_B auf ein verstärkten I_C ab.
- R_C bildet I_C auf U_a ab.



Die Versorgungsspannung U_V ist erforderlich, damit der Kollektor-Basis-Übergang in Sperrrichtung betrieben wird, so dass der Transistor im Normalbereich arbeitet.

Ersatzschaltung



Gültigkeitsvoraussetzungen für das Modell

$$I_B = \frac{U_e - U_{BEf}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = \frac{\beta}{R_B} \cdot (U_e - U_{BEf})$$

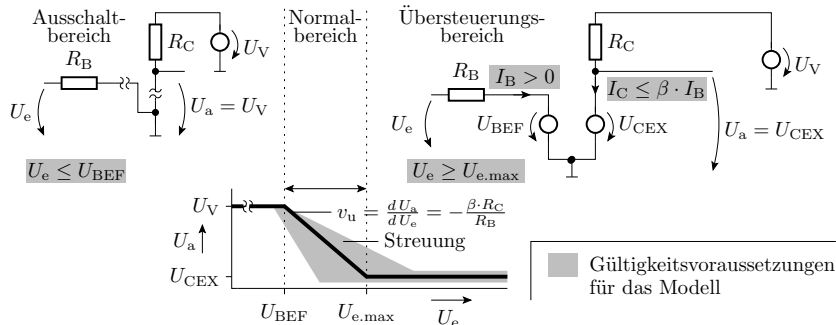
$$U_a = U_V - R_C \cdot I_C$$

$$U_a = U_V - \frac{\beta \cdot R_C}{R_B} \cdot (U_e - U_{BEf}) \text{ für } U_{CEX} < U_a < U_V$$

Zulässiger Eingangsspannungsbereich:

$$U_{BEf} < U_e < U_{e,max} = \frac{R_B \cdot (U_V - U_{CEX})}{\beta \cdot R_C} + U_{BEf}$$

Übertragungsfunktion mit allen Arbeitsbereichen



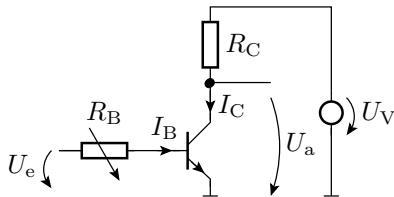
Problem Parameterstreuungen:

- v_u und $U_{e,max}$ hängen von der Verstärkung β ab, die Toleranzbereiche von mehr als $\pm 50\%$ hat, z.B. 100 bis 250.
- Daraus folgen mehr als $\pm 50\%$ Unsicherheit der Verstärkung und der Breite des Eingangsspannungsbereichs!

Verstärkungsabgleich

- Korrektur der Verstärkung durch Abgleich von R_B :

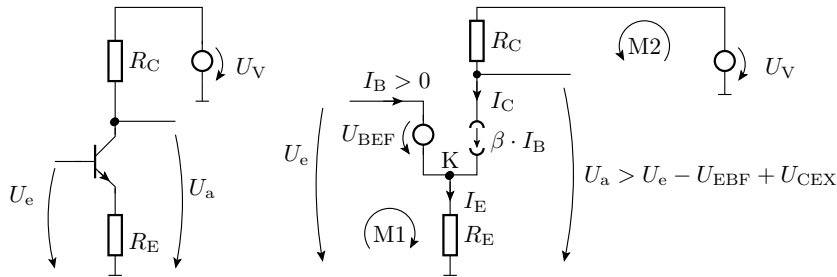
$$v_u = -\frac{\beta \cdot R_C}{R_B}; \quad R_B = -\frac{\beta \cdot R_C}{v_u} \quad (1)$$



- In einer integrierten Schaltung müsste man den R_B nach dem Test mit einem Laser trimmen. Sehr fertigungsaufwändig!

Verstärker so konstruieren, dass die Verstärkung v_u nicht von dem stark streuungsbehafteten Parameter β abhängt.

Verbesserter Spannungsverstärker



Knotengleichung für K:

$$I_E = I_B + I_C = (1 + \beta) \cdot I_B$$

Maschengleichung für M1:

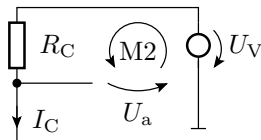
$$U_e = U_{BEF} + U_{RE} = U_{BEF} + R_E \cdot (1 + \beta) \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{(U_e - U_{BEF})}{R_E \cdot (1 + \beta)}; I_C = \frac{\beta \cdot (U_e - U_{BEF})}{R_E \cdot (1 + \beta)}$$

Fortsetzung

Übertrag von oben:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (U_e - U_{BEF})}{R_E \cdot (1 + \beta)}$$



Maschengleichung für M2:

$$U_a = U_V - R_C \cdot I_C = U_V - \frac{\beta \cdot R_C}{(1 + \beta) \cdot R_E} \cdot (U_e - U_{BEF})$$

Masche nicht über die Stromquelle legen, warum?

Die Spannungsverstärkung

$$v_u = \frac{dU_a}{dU_e} = - \frac{\beta \cdot R_C}{(1 + \beta) \cdot R_E}$$

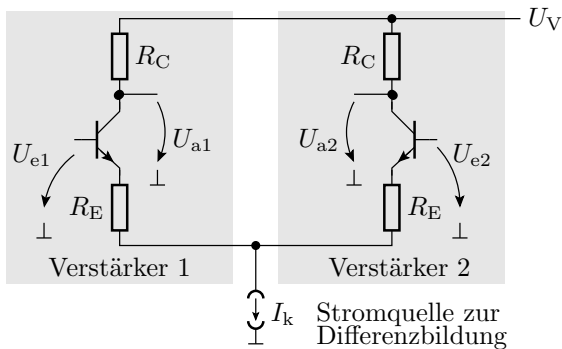
ist nahezu das Verhältnis R_C/R_E .



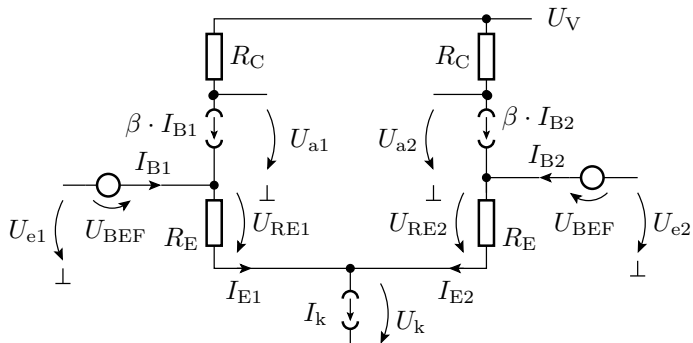
Differenzverstärker

Schaltung des Differenzverstärkers

- Ziel: Eliminierung des zweiten streuungsbehafteten Transistorparameters U_{BEF} aus der Übertragungsfunktion.
- Lösung: Symmetrie und Kompensation. Zwei identische Verstärker, deren Parameterabweichungen sich kompensieren.



Ersatzschaltung



Für die Emitterströme der beiden Einzelverstärker gilt:

$$I_{E.i} = \frac{U_{e.i} - U_{BEF} - U_k}{R_E} \text{ mit } i \in \{1, 2\}$$

Die Spannung über der Stromquelle stellt sich genau so ein, das am Knoten K der Knotensatz gilt:

$$I_k = I_{E.1} + I_{E.2}$$

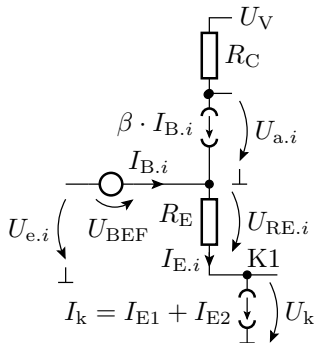
$$I_k = \frac{U_{e1} + U_{e2} - 2 \cdot (U_{BEF} + U_k)}{R_E}$$

$$U_k = \frac{U_{e1} + U_{e2} - R_E \cdot I_k}{2} - U_{BEF}$$

Eingesetzt in die Gl. oben ergibt sich für die Emitterströme:

$$I_{E.1} = \frac{U_{e1} - U_{e2}}{2 \cdot R_E} + \frac{I_k}{2}$$

$$I_{E.2} = \frac{U_{e2} - U_{e1}}{2 \cdot R_E} + \frac{I_k}{2}$$

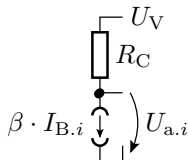


Mit

$$I_{C.i} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_{E.i}$$

und

$$U_{a.i} = U_V - R_C \cdot I_{C.i}$$



betragen die beiden Ausgangsspannungen:

$$U_{a1} = U_V - \frac{\beta \cdot R_C}{2 \cdot (\beta + 1) \cdot R_E} \cdot (U_{e1} - U_{e2}) - \frac{\beta \cdot R_C \cdot I_k}{2 \cdot (\beta + 1)}$$

$$U_{a2} = U_V - \frac{\beta \cdot R_C}{2 \cdot (\beta + 1) \cdot R_E} \cdot (U_{e2} - U_{e1}) - \frac{\beta \cdot R_C \cdot I_k}{2 \cdot (\beta + 1)}$$

Ergebnis:

$$\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1} = \frac{\beta \cdot R_C}{(\beta + 1) \cdot R_E} \cdot (U_{e1} - U_{e2})$$

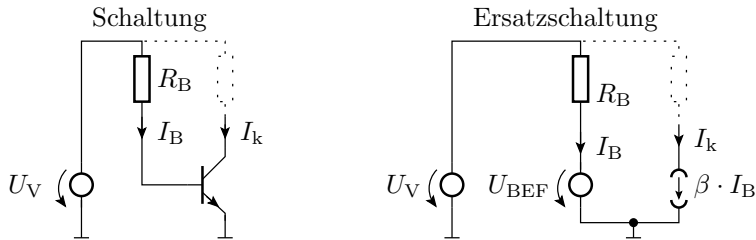
Die Flussspannungen der Basis-Emitter-Übergänge sind aus der Übertragungsfunktion herausgefallen.



Stromquellen

Transistor als Konstantstromquelle

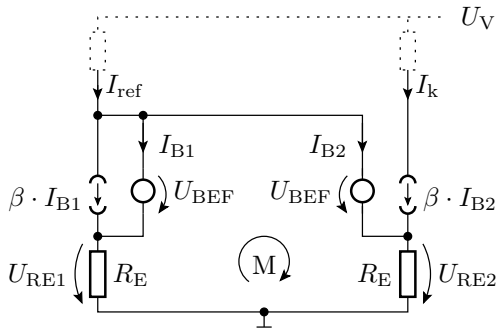
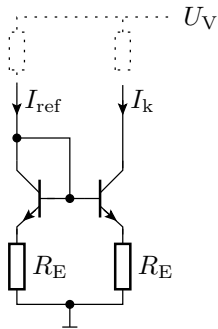
Der Differenzverstärker benötigt eine Konstantstromquelle. Einfachste Lösung ist ein Transistor mit konstantem Basisstrom:



$$I_k = \frac{\beta}{R_B} \cdot (U_V - U_{BEF})$$

Problem: Der erzeugte Konstantstrom I_k hängt erheblich von den streuungsbehafteten Transistorparametern β und U_{BEF} ab.

Stromspiegel



Aus der Masche M in der Ersatzschaltung folgt, dass über beiden Widerständen R_E dieselbe Spannung abfällt:

$$U_{RE1} = U_{RE2}$$

linker Widerstand:

$$U_{RE1} = R_E \cdot (I_{ref} - I_{B2})$$

rechter Widerstand:

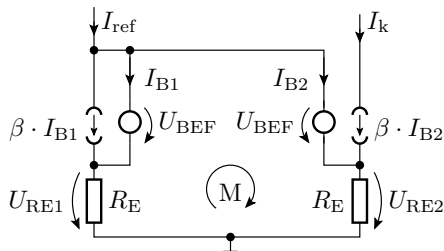
$$U_{RE2} = R_E \cdot (I_k + I_{B2})$$

Mit $I_{B1} \approx I_{B2} \approx I_B \approx I_k/\beta$ ergibt sich:

$$I_{ref} = I_k \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right)$$

Bei Transistoren mit identischen Parametern (β und U_{BEF} , ...) ² ist der Ausgabestrom fast gleich dem Vorgabestrom I_{ref} .

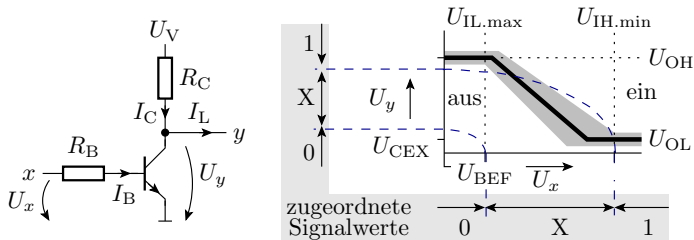
²Erreichbar mit integrierten geometrisch identischen benachbarten Transistoren. Die richtigen Simulationsmodelle haben zehnmal so viele Parameter. Aber auch da fallen die Parameter nahezu komplett aus der Rechnung heraus.





Transistorinverter

Transistorverstärker auf Seite 10 als Inverter



- Bei einer 0 am Eingang muss der Transistor sicher sperren.
- Bei einer 1 am Eingang muss der Transistor übersteuern.

max. Eingangsspannung für 0:

$$U_{IL,max} = U_{BEF,min}$$

min. Eingangsspannung für 1

$$U_{IH,min} = f(\beta_{min}, U_{BEF,max}, \dots)$$

Ausgangsspannung für 0:

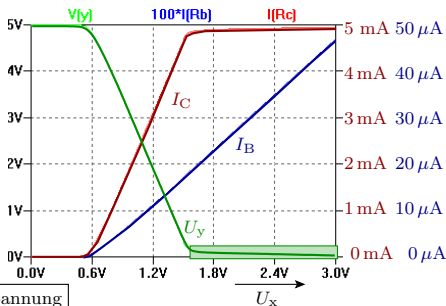
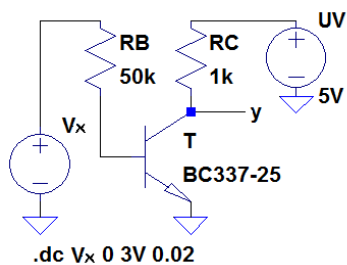
$$U_{OL} = U_{CEX} < U_{IL,max}^*$$

Ausgangsspannung für 1:

$$U_{OH} = f(U_V, I_L) > U_{IH,min}^*$$

* Voraussetzung für die Hintereinanderschaltung mehrerer Inverter.

Simulation Übersteuerungsbereich

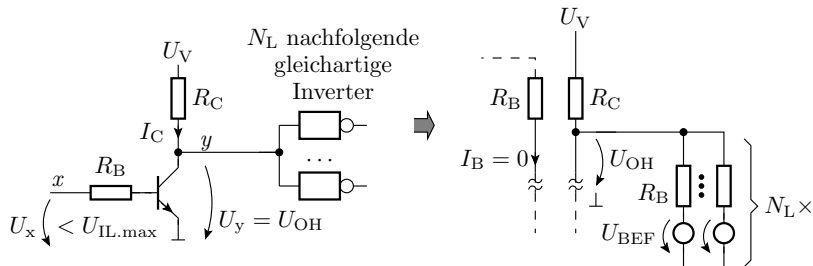


Für $U_y \rightarrow 0$ kann mit einer weiteren Zunahme des Basisstroms nicht mehr Strom am Kollektor abfließen. Modellierung von U_{CE} als Quelle mit einer Spannung U_{CEX} (Kollektor-Emitter-Restspannung).

Modell Übersteuerungsbereich:

$$U_{OL} = U_{CEX} \quad \text{für } I_C < \beta \cdot I_B$$

Ersatzsch. mit Transistor im Ausschaltbereich



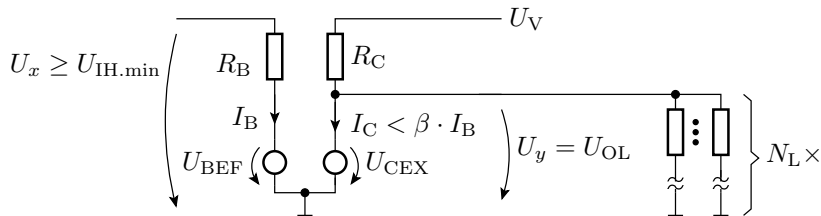
- Eingangsspannung so klein, dass der Transistor ausschaltet:

$$U_{IL,max} = U_{BEF,min}$$

- Der Ausgang steuert N_L (Lastanzahl) gleichartige Inverter an. Ausgangsspannung Tr. gesperrt nach Spannungsteilerregel:

$$U_{OH} = U_{BEF} + (U_V - U_{BEF}) \cdot \frac{R_B/N_L}{R_B/N_L + R_C} > I_{IH,min}$$

Ersatzschaltung mit übersteuertem Transistor



Die minimale Eingangsspannung, ab der der Transistor übersteuert:

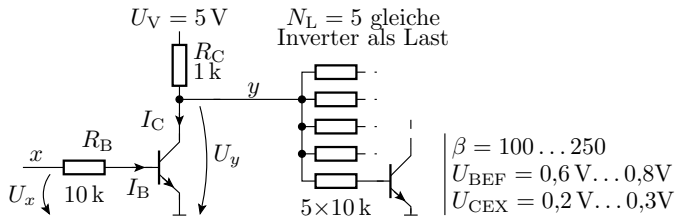
$$\beta \cdot \frac{U_{IH} - U_{BEFF}}{R_B} < \frac{U_V - U_{CEX}}{R_C}$$

$$U_{IH.min} = \frac{R_B \cdot (U_V - U_{CEX})}{\beta_{min} \cdot R_C} + U_{BEFF.max}$$

Maximaler Basiswiderstand, wenn $U_{IH.min}$ gegeben:

$$R_B \leq \beta_{min} \cdot R_C \cdot \frac{U_{IH.min} - U_{BEFF}}{U_V - U_{CEX}}$$

Beispielrechnung Inverter mit 5 Lasten



$$U_{IL.\max} = U_{BEF.\min} = 0,6\text{ V}$$

$$U_{IH.\min} = \frac{R_B \cdot (U_V - U_{CEX.\max})}{\beta_{\min} \cdot R_C} + U_{BEF.\max} \approx 1,19\text{ V}$$

$$U_{OL.\max} = U_{CEX.\max} = 0,3\text{ V}$$

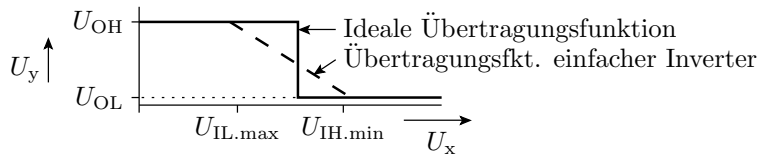
$$U_{OH.\min} = U_{BEF.\min} + (U_V - U_{BEF.\min}) \cdot \frac{\frac{R_B}{N_L}}{R_C + \frac{R_B}{N_L}} \approx 3,57\text{ V}$$

Kontrolle: $U_{OH.\min} > U_{IH.\min} \checkmark$ und $U_{OL.\max} < U_{IL.\max} \checkmark$

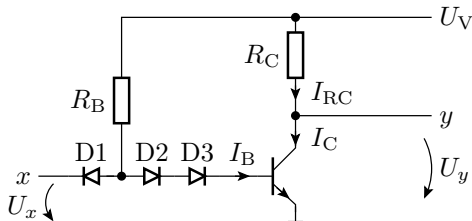


DT-Gatter

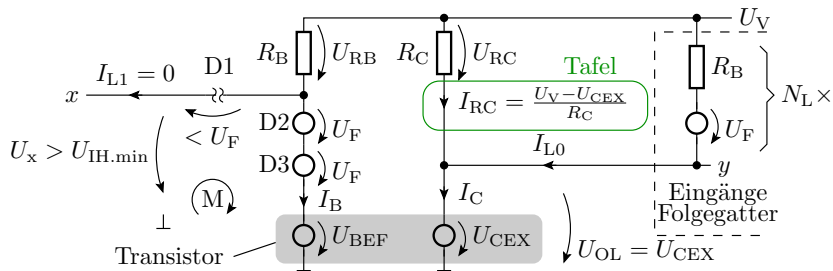
Dioden-Transistor-Inverter



Der DT-Inverter hat fast diese ideale Übertragungsfunktion:



Ersatzsch. für $y = 0$ (Transistor übersteuert)



- $U_{IH.min} = 2 \cdot U_{F.max} + U_{BEF.max} - U_{F.min}$

- $U_{OL.max} = U_{CEX.max}$

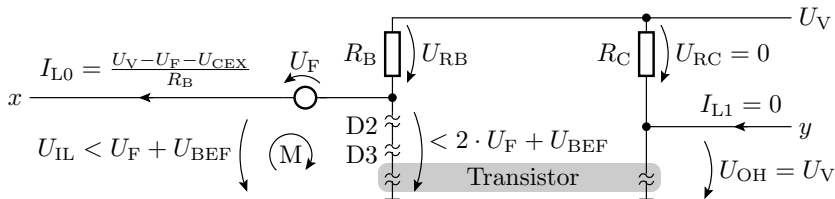
- Bedingung für die Übersteuerung des Transistors:

$$I_B = \frac{(U_V - 2 \cdot U_F - U_{BEF})_{min}}{R_B} > \frac{(U_V - U_{CEX})_{max}}{R_C} + N_L \cdot \frac{(U_V - U_{CEX} - U_F)_{max}}{R_B}$$

$$N_L < \frac{\beta_{min} \cdot (U_V - 2U_F - U_{BEF})_{min} - \frac{R_B}{R_C} \cdot (U_V - U_{CEX})_{max}}{(U_V - U_{CEX} - U_F)_{max}} \quad (2)$$

N_L – Lastanzahl.

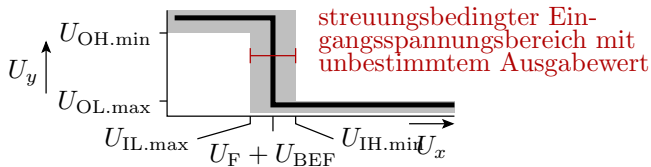
Ersatzschaltung für $y = 1$ (Transistor aus)



- $U_{IL, \max} = 2 \cdot U_{F, \min} + U_{BEF, \min} - U_{F, \max}$

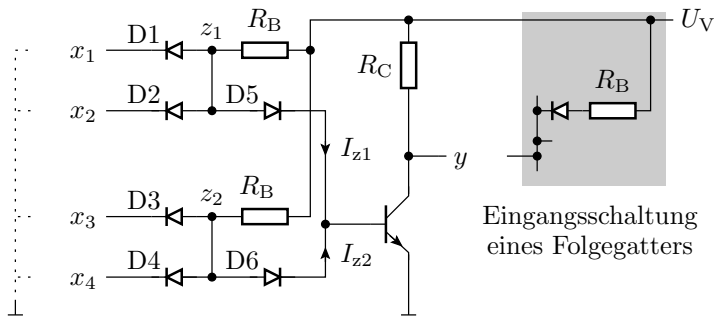
- $U_{OH, \min} = U_{V, \min}$

Die Schaltung hat die nahezu perfekte Übertragungsfunktion:



DT-Gatter mit mehreren Eingängen

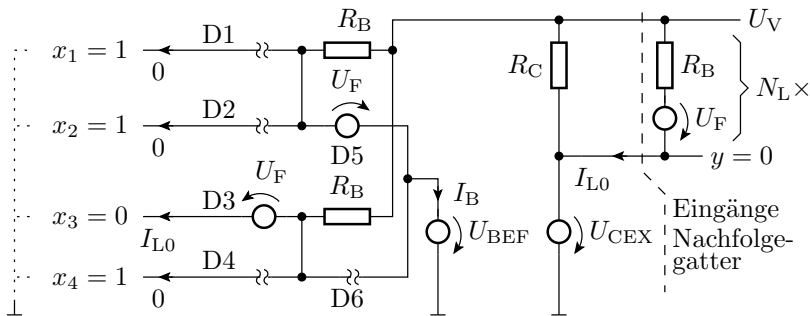
Kombination aus Dioden-UND-ODER-Gatter und Transistorinverter



Eingangsschaltung
eines Folgegatters

$$y = \overline{(x_1 \wedge x_2) \vee (x_3 \wedge x_4)}$$

Ersatzschaltung für $y = 0$



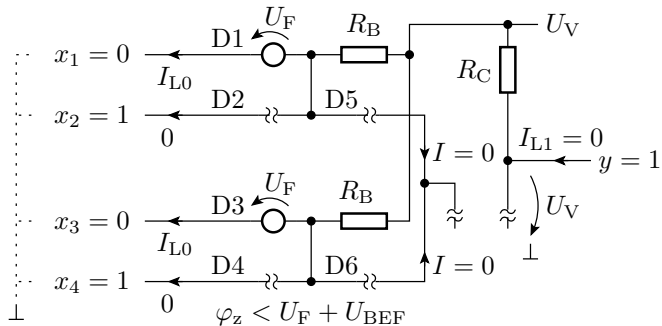
- Potential an x_1 und x_2 oder an x_3 und x_4 größer:

$$U_{IH.min} = U_{F.max} - U_{F.min} + U_{BEF.max}$$

- Damit Transistor sicher übersteuert (Gl. 2 mit Ersatz $2 \cdot U_F$ durch U_F):

$$N_L < \frac{\beta_{min} \cdot (U_V - U_F - U_{BEF})_{min} - \frac{R_B}{R_C} \cdot (U_V - U_{CEX})_{max}}{(U_V - U_{CEX} - U_F)_{max}}$$

Ersatzschaltung für $y = 1$

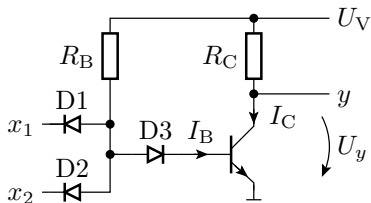


- Potential an x_1 oder x_2 und x_3 oder x_4 kleiner:

$$U_{IL,max} = U_{F,min} - U_{F,max} + U_{BEF,min}$$

Beispielrechnung DT-Gatter

Gegeben sei folgende DT-Gatterschaltung:



$$U_V = 3,1 \text{ V} \dots 3,4 \text{ V}$$

$$R_B = R_C = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 20 \dots 50$$

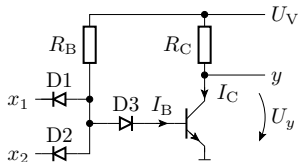
$$U_F = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

$$U_{BEF} = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

$$U_{CEX} = 0,1 \dots 0,2 \text{ V}$$

- 1 Wie lautet die logische Funktion?
- 2 Maximale Eingangsspannung für eine 0?
- 3 Minimale Eingangsspannung für eine 1?
- 4 Maximale Lastanzahl?

Lösung



$$\begin{aligned}
 U_V &= 3,1 \text{ V} \dots 3,4 \text{ V} \\
 R_B &= R_C = 10 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 20 \dots 50 \\
 U_F &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{BEF} &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{CEX} &= 0,1 \dots 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

- 1 Logische Funktion:

$$y = \overline{x_1 \wedge x_2}$$

- 2 Maximale Eingangsspannung für eine 0:

$$U_{IL,max} = U_{F,min} + U_{BEF,min} - U_{F,max} = 0,6 \text{ V} + 0,6 \text{ V} - 0,8 \text{ V} = 0,4 \text{ V}$$

- 3 Minimale Eingangsspannung für eine 1:

$$U_{IH,min} = U_{F,max} + U_{BEF,max} - U_{F,min} = 0,8 \text{ V} + 0,8 \text{ V} - 0,6 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

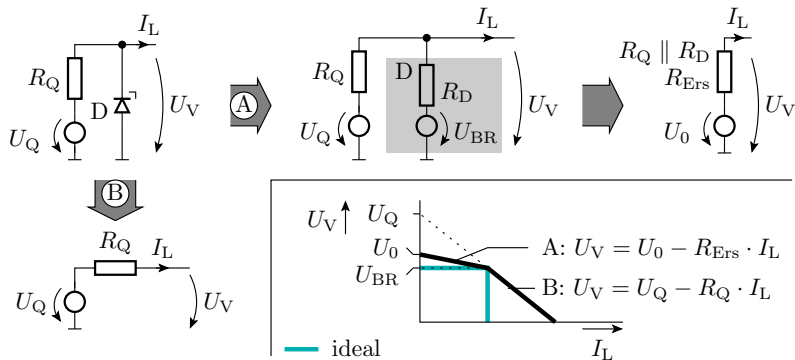
- 4 Maximale Lastanzahl:

$$N_L < \frac{\beta_{min} \cdot (U_V - U_F - U_{BEF})_{min} - \frac{R_B}{R_C} \cdot (U_V - U_{CEX})_{max}}{(U_V - U_{CEX} - U_F)_{max}} = \frac{20 \cdot 1,5 \text{ V} - 3,3 \text{ V}}{1,7 \text{ V}} = 15,7$$



Spannungsstabilisierung

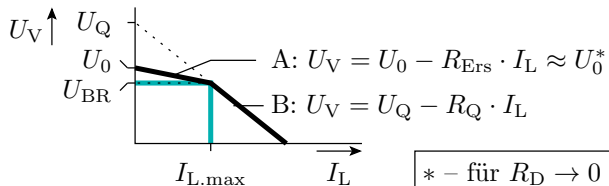
Behandelte Schaltung mit Z-Diode



- A: Ersatzschaltung für den Arbeitsbereich zur Spannungsstabilisierung
 B: Ersatzschaltung für den Arbeitsbereich zur Strombegrenzung

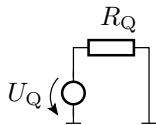
Eine ideale Spannungsversorgung sollte im Stabilisierungsbereich keinen Widerstand ($R_{Ers} \approx R_D \rightarrow 0$) und zur Strombegrenzung einen senkrechten Abfall ($I_L = \text{konst.}, R_Q \rightarrow \infty$) haben.

Problem großer Leistungsumsatz



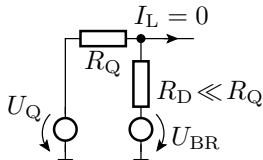
- Der Leistungsumsatz in R_Q hat sein Maximum bei einem Kurzschluss am Ausgang:

$$P_{R_Q, \max} = \frac{U_Q^2}{R_Q}$$



- Der Leistungsumsatz in der Z-Diode hat bei $I_L = 0$ sein Maximum:

$$P_{ZD, \max} \approx U_{BR} \cdot \frac{U_Q - U_{BR}}{R_Q}$$

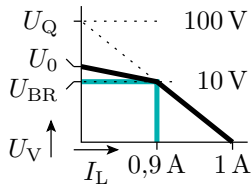




Beispielabschätzung

Quellspannung $U_Q = 100 \text{ V}$, Leerlaufspannung $U_0 = 10 \text{ V}$ und Kurzschlussstrom am Ausgang $I_K = 1 \text{ A}$. Wie groß sind

- 1 Wie groß ist muss der Vorwiderstand R_Q sein?
- 2 Maximaler Leistungsumsatz im Vorwiderstand?
- 3 Maximaler Leistungsumsatz in der Z-Diode?



Lösung:

- 1 Vorwiderstand:

$$R_Q = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 100 \Omega$$

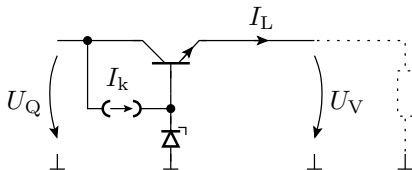
- 2 Maximaler Leistungsumsatz im Vorwiderstand:

$$P_{R_Q, \max} = \frac{U_Q^2}{R_Q} = \frac{(100 \text{ V})^2}{100 \Omega} = 100 \text{ W}$$

- 3 Maximaler Leistungsumsatz in der Z-Diode:

$$P_{ZD, \max} = U_0 \cdot \frac{U_Q - U_0}{R_Q} = 10 \text{ V} \cdot \frac{100 \text{ V} - 10 \text{ V}}{100 \Omega} = 9 \text{ W}$$

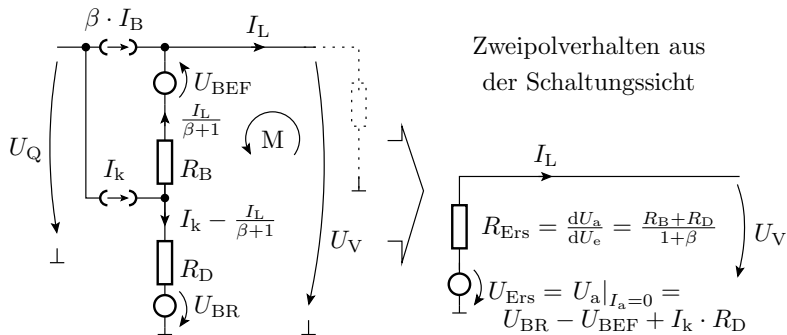
Längsregler



- Bipolartransistor mit konstantem Basispotential, z.B. erzeugt mit einer Z-Diode im Durchbruchbereich.
- Der Leistungsumsatz im Transistor (unter Vernachlässigung von I_k) ist etwa nur:

$$P_{Tr} \approx (U_Q - U_V) \cdot I_L$$

Ersatzschaltung Z-Diode im Durchbruchbereich

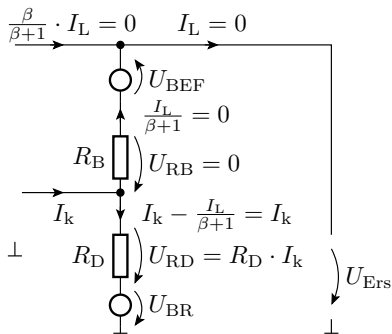


Maschengleichung für M:

$$\begin{aligned}
 U_V &= U_{\text{BR}} + R_D \cdot \left(I_k - \frac{I_L}{1 + \beta} \right) - U_{\text{BEF}} - R_B \cdot \frac{I_L}{1 + \beta} \\
 &= \underbrace{U_{\text{BR}} + R_D \cdot I_k - U_{\text{BEF}}}_{U_{\text{Ers}}} - \frac{R_D + R_B}{1 + \beta} \cdot I_L
 \end{aligned}$$

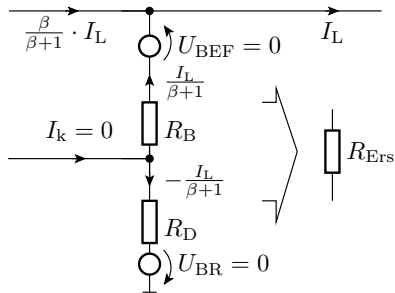
Herleitung über Zweipolvereinfachung

Ersatzschaltung $I_L = 0$



$$U_{Ers} = U_{BR} - U_{BEF} + I_k \cdot R_D$$

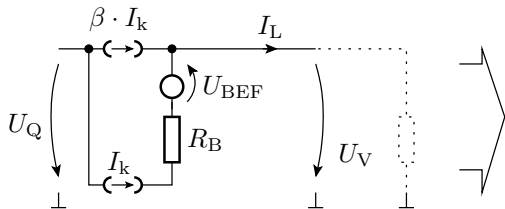
Ersatzschaltung "konstante Quellen" gleich null



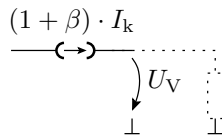
$$R_{Ers} = \frac{dU_a}{dU_e} = \frac{R_B + R_D}{1 + \beta}$$

Strombegrenzungsmodus

- Der gesamte Strom I_k fließt in die Basis



Zweipolverhalten aus der Schaltungssicht

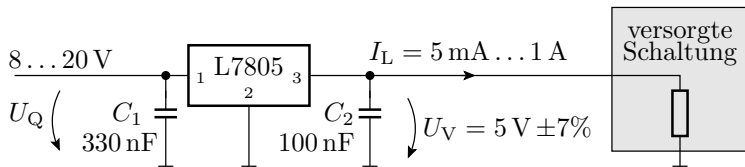


- Laut Ersatzschaltung ideale Stromquelle.
- Begrenzungsstrom streut, da proportional zu β .
- Stabilisierte Spannung übernimmt die Streuungen von U_{BEf} des Transistors und von U_{BR} der Z-Diode.
- Praktische Längsregler haben mehr Bauteile und kleinere Toleranzen.

Längsregler als Standardschaltkreis

Verbesserte Schaltung aus mehreren Transistoren mit

- geringerer Streuung der Ausgangsspannung und der Strombegrenzung,
- thermischem Überlastschutz, ...:



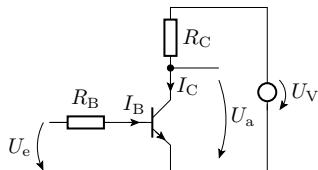
- Die Kapazitäten C_1 und C_2 dienen zum Ausgleich schneller Eingangsspannungs- und Laststromänderungen und verhindern ein Schwingen der Spannungsreglung.



Aufgaben

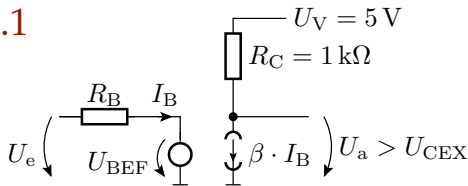
Aufgabe 3.1: Einfacher Spannungsverstärker

Für die Verstärkerschaltung rechts sei folgendes vorgegeben:



- Kollektorwiderstand: $R_C = 1 \text{ k}\Omega$
 - Transistorparameter: $100 \leq \beta \leq 250$, $U_{\text{BEF}} \approx 0,7 \text{ V}$, $U_{\text{CEX}} \approx 0,5 \text{ V}$
 - Versorgungsspannung: $U_V = 5 \text{ V}$
 - gewünschte Verstärkung: $v_u = -10$.
- 1 Welchen Einstellbereich muss der Widerstand R_B zur Einstellung der Verstärkung $v_u = -10$ besitzen, wenn der Wert von R_C bis um zu $\pm 5\%$ vom Sollwert abweichen kann?
 - 2 In welchem Bereich darf die Eingangsspannung U_e liegen?
 - 3 Wie groß muss die zulässige Verlustleistung des Transistor sein?

Lösung zu Aufgabe 3.1



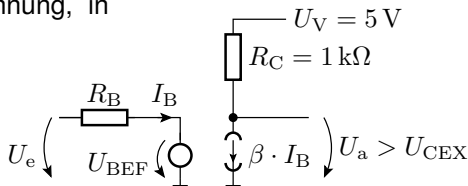
- 1 Erforderlicher Einstellbereich für R_B für $v_u = -10$:
Ausgehend von Gl. 1

$$v_u = -\frac{\beta \cdot R_C}{R_B}; \quad R_B = -\frac{\beta \cdot R_C}{v_u}$$

$$R_{B.\min} = -\frac{\beta_{\min} \cdot R_{C.\min}}{v_u} = \frac{100 \cdot 950\ \Omega}{10} = 9,5\text{ k}\Omega$$

$$R_{B.\max} = -\frac{\beta_{\max} \cdot R_{C.\max}}{v_u} = \frac{250 \cdot 1050\ \Omega}{10} = 26,5\text{ k}\Omega$$

- 2 Bereich der Eingangsspannung, in dem das Modell gilt:



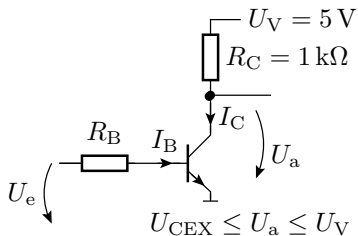
$$I_B = \frac{U_e - U_{BEFF}}{R_B} \geq 0$$

$$U_e \geq U_{BEFF}$$

$$U_a = U_V - 10 \cdot (U_e - U_{BEFF}) \geq U_{CEX}$$

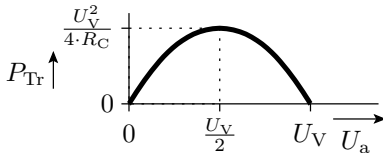
$$U_e \leq U_{BEFF} + \frac{U_V - U_{CEX}}{10} = 1,15 \text{ V}$$

- 3 max. Verlustleistung Transistor:

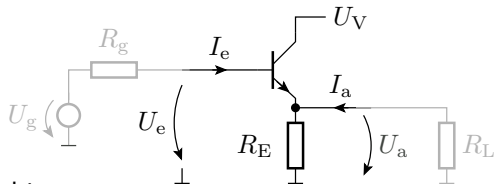


$$P_{Tr} \approx \frac{U_V - U_a}{R_C} \cdot U_a$$

$$P_{Tr,max} = \frac{U_V^2}{4 \cdot R_C} = \frac{(5 \text{ V})^2}{4 \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 6,25 \text{ mW}$$



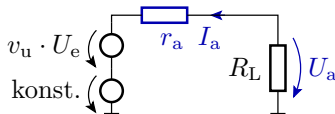
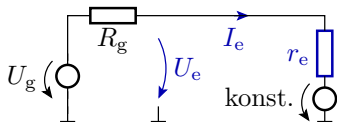
Aufgabe 3.2: Kollektorschaltung



$$\begin{aligned}
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 R_E &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_g &= 100 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 200 \\
 U_{BEF} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{CEX} &= 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

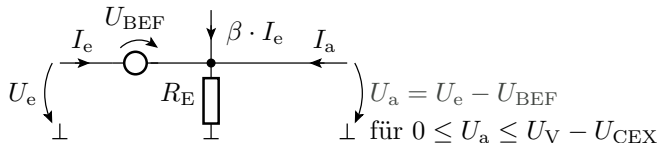
Gesucht:

- 1 Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbereich.
- 2 $U_a = f(U_e)$ ohne R_g und R_L . Bereich von U_e , in dem Modell gilt.
- 3 Spannungsverstärkung: $v_u = \frac{dU_a}{dU_e}$ ohne R_g und R_L
- 4 Eingangswiderstand: $r_e = \frac{dU_e}{dI_e}$ mit R_L und ohne R_g
- 5 Ausgangswiderstand: $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$ mit R_g ohne R_L



Lösung zu Aufgabe 3.2

- 1 Ersatzschaltung, Übertragungsfunktion:



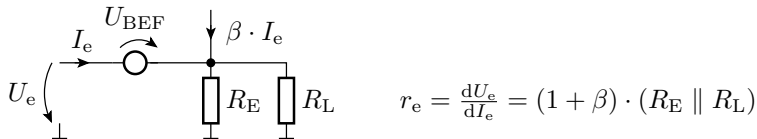
Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist:

$$U_{BEF} \leq U_e \leq U_V + U_{BEF} - U_{CEX}$$

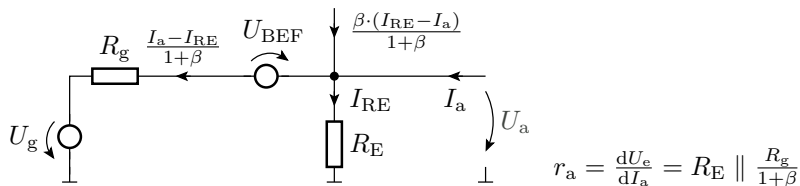
- 2 Spannungsverstärkung:

$$v_u = \frac{dU_a}{dU_e} = 1$$

- 3 Eingangswiderstand:



5 Ausgangswiderstand:



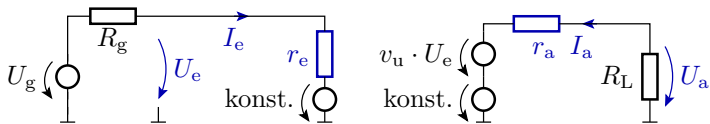
$$U_a = U_g + R_g \cdot \frac{I_a - I_{RE}}{1 + \beta} - U_{BEF} \text{ mit } I_{RE} = \frac{U_a}{R_E}$$

$$I_a = \frac{U_a}{R_E} + \frac{1 + \beta}{R_g} \cdot (U_a - U_g + U_{BEF})$$

$$\frac{1}{r_a} = \frac{dI_a}{dU_a} = \frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{R_g}$$

$$r_a = R_E \parallel \frac{R_g}{1 + \beta}$$

Zusammenfassung



Spannungsverstärkung:

$$v_u = \frac{dU_a}{dU_e} = 1$$

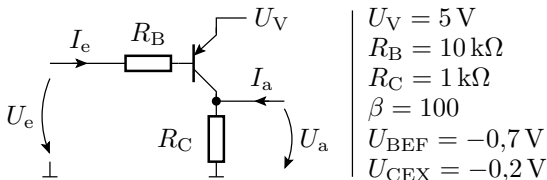
Eingangswiderstand:

$$r_e = \frac{dU_e}{dI_e} = (1 + \beta) \cdot (R_E \parallel R_L)$$

Ausgangswiderstand:

$$r_a = \frac{dU_a}{dI_a} = R_E \parallel \frac{R_g}{1 + \beta}$$

Aufgabe 3.3: Verstärker mit pnp-Transistor

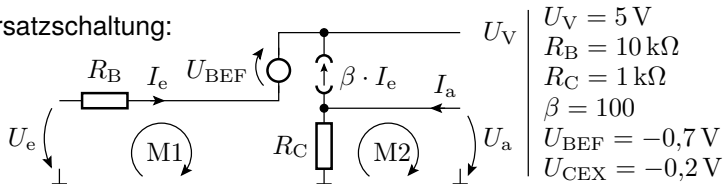


Gesucht sind:

- 1 Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbereich.
- 2 Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- 3 Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- 4 Eingangswiderstand: $r_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- 5 Ausgangswiderstand: $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

Lösung zu Aufgabe 3.3

1 Ersatzschaltung:



2 Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$

$$\text{M1: } I_e = \frac{U_e - U_{\text{BEFF}} - U_V}{R_B}$$

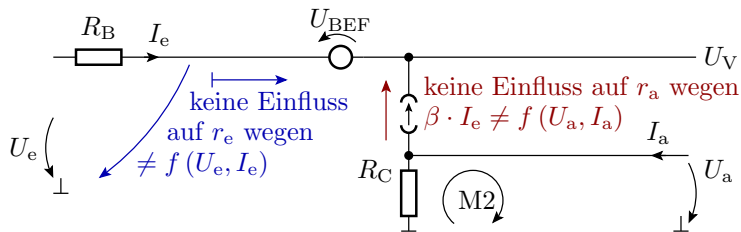
$$\text{M2: } U_a = R_C \cdot (I_a - \beta \cdot I_e) = R_C \cdot \left(I_a + \beta \cdot \frac{U_V + U_{\text{BEFF}} - U_e}{R_B} \right)$$

3 Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist:

$$U_e < U_V + U_{\text{BEFF}}$$

$$U_V + U_{\text{CEX}} < R_C \cdot \left(I_a + \beta \cdot \frac{U_V + U_{\text{BEFF}} - U_e}{R_B} \right)$$

$$U_e > U_V + U_{\text{BEFF}} - \frac{R_B}{\beta} \cdot \left(\frac{U_V + U_{\text{CEX}}}{R_C} - I_a \right)$$



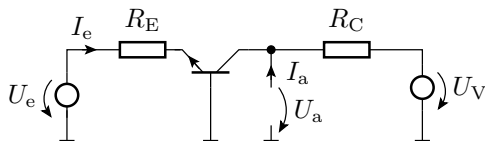
4 Eingangswiderstand:

$$\frac{1}{r_e} = \frac{dI_e}{dU_e} = \frac{d \left(\frac{U_e - U_{BEF} - U_V}{R_B} \right)}{dI_e} = \frac{1}{R_B}; \quad r_e = R_B$$

5 Ausgangswiderstand:

$$r_a = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{d \left(R_C \cdot \left(I_a + \beta \cdot \frac{U_V + U_{BEF} - U_e}{R_B} \right) \right)}{dI_a} = R_C$$

Aufgabe 3.4: Basisschaltung



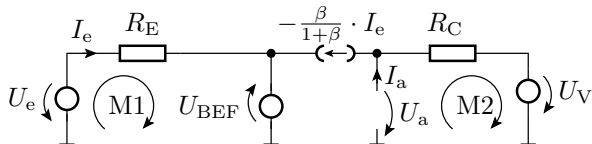
$$\begin{aligned}
 R_E &= 100 \, \Omega \\
 R_C &= 1 \, \text{k}\Omega \\
 U_V &= 5 \, \text{V} \\
 \beta &= 100 \\
 U_{\text{BEF}} &= 0,7 \, \text{V} \\
 U_{\text{CEX}} &= 0,2 \, \text{V}
 \end{aligned}$$

Gesucht sind:

- 1 Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbereich.
- 2 Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- 3 Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- 4 Eingangswiderstand: $r_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- 5 Ausgangswiderstand: $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

Lösung zu Aufgabe 3.4

- 1 Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbereich.



$$R_E = 100 \Omega$$

$$R_C = 1 \text{ k}\Omega$$

$$U_V = 5 \text{ V}$$

$$\beta = 100$$

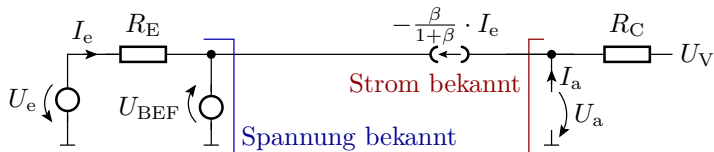
$$U_{\text{BEFF}} = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{\text{CEX}} = 0,2 \text{ V}$$

- 2 Übertragungsfunktion $U_a = f(U_e)$:

$$\text{M1: } I_e = \frac{U_e + U_{\text{BEFF}}}{R_E} < 0$$

$$\text{M2: } U_a = U_V + \frac{R_C \cdot \beta}{R_E \cdot (1 + \beta)} \cdot (U_e + U_{\text{BEFF}}) + I_a \cdot R_C$$



- 3 Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist:

$$U_e < -U_{BEF}$$

$$U_{CEX} - U_{BEF} > U_a = U_V + \frac{R_C \cdot \beta}{R_E \cdot (1 + \beta)} \cdot (U_e + U_{BEF}) + I_a \cdot R_C$$

$$U_e > \frac{R_E \cdot (1 + \beta) \cdot (U_{CEX} - U_{BEF} - U_V + I_a \cdot R_C)}{R_C \cdot \beta} - U_{BEF}$$

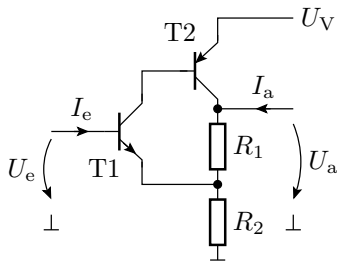
- 4 Eingangswiderstand:

$$\frac{1}{r_e} = \frac{dI_e}{dU_e} = \frac{d\left(\frac{U_e + U_{BEF}}{R_E}\right)}{dI_e} = \frac{1}{R_E}; \quad r_e = R_E$$

- 5 Ausgangswiderstand:

$$r_a = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{d\left(U_V + \frac{R_C \cdot \beta}{R_E \cdot (1 + \beta)} \cdot (U_e + U_{BEF}) + I_a \cdot R_C\right)}{dI_a} = R_C$$

Aufgabe 3.5: 2-Transistor-Verstärker

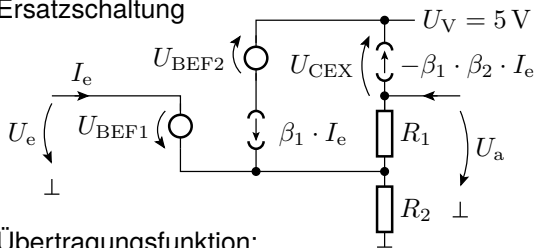


$$\begin{aligned}
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 R_1 &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 100 \Omega \\
 \beta_1 &= 200 \\
 \beta_2 &= 100 \\
 U_{\text{BEF}1} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{\text{BEF}2} &= -0,7 \text{ V} \\
 U_{\text{CEX}1} &= 0,2 \text{ V} \\
 U_{\text{CEX}2} &= -0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

- 1 Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbereich.
- 2 Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- 3 Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- 4 Eingangswiderstand: $r_e = \frac{dU_e}{dI_e}$

Lösung zu Aufgabe 3.5

1 Ersatzschaltung



$$R_1 = 1\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100\ \Omega$$

$$\beta_1 = 200$$

$$\beta_2 = 100$$

$$U_{BE1} = 0,7\text{ V}$$

$$U_{BE2} = -0,7\text{ V}$$

$$U_{CEX1} = 0,2\text{ V}$$

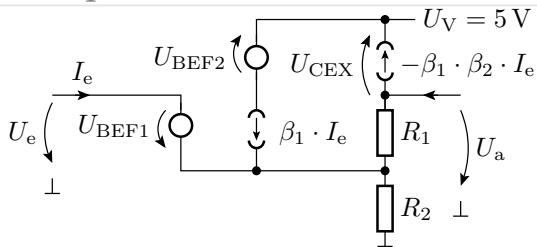
$$U_{CEX2} = -0,2\text{ V}$$

2 Übertragungsfunktion:

$$I_{R1} = I_e \cdot \beta_1 \beta_2 \approx I_{R2} = I_e \cdot (1 + \beta_1 + \beta_1 \beta_2)$$

$$\frac{U_e - U_{BE1}}{R_2} \approx \frac{U_a}{R_1 + R_2}$$

$$U_a \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot (U_e - U_{BE1})$$



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 100 \Omega \\
 \beta_1 &= 200 \\
 \beta_2 &= 100 \\
 U_{BEF1} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{BEF2} &= -0,7 \text{ V} \\
 U_{CEX1} &= 0,2 \text{ V} \\
 U_{CEX2} &= -0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

3 Eingangsspannungsbereich, für den das Modell gilt:

$$\begin{aligned}
 U_e &> U_{BEF1} \\
 \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot (U_e - U_{BEF1}) &< U_V + U_{CEX2} \\
 U_e &< U_{BEF1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (U_V + U_{CEX2})
 \end{aligned}$$

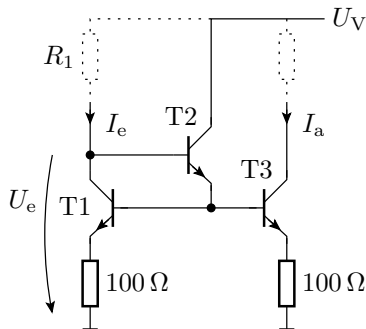
4 Eingangswiderstand:

$$\begin{aligned}
 U_e &= U_{BEF1} + (1 + \beta_1 + \beta_1\beta_2) \cdot R_2 \cdot I_e \\
 r_e = \frac{dU_e}{dI_e} &= (1 + \beta_1 + \beta_1\beta_2) \cdot R_2
 \end{aligned}$$

Aufgabe 3.6: Verbessertes Stromspiegel

$$\beta_1 = \beta_3 = \beta$$

$$U_{BEF1} = U_{BEF3} = U_{BEF}$$



Gesucht sind:

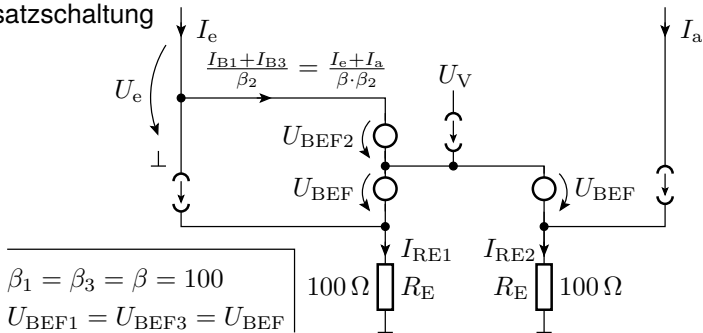
- 1 Ersatzschaltung mit allen Transistoren im Normalbereich.
- 2 Das Stromspiegelverhältnis $I_a = f(I_e)$.
- 3 Die Eingangsspannung als Funktion des Eingangsstroms:

$$U_e = f(I_e)$$

- 4 Der Eingangsstrom I_e für einen Vorwiderstand $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $U_V = 5 \text{ V}$ ($U_{BEF} = 0,7 \text{ V}$, $\beta = 100$).

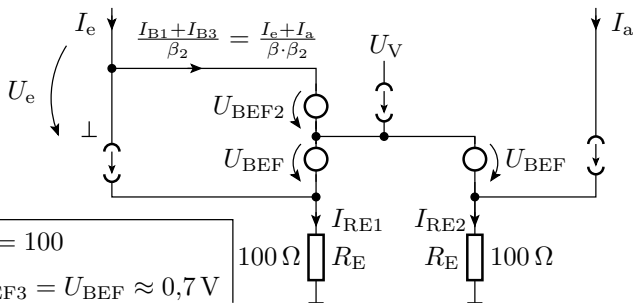
Lösung zu Aufgabe 3.6

1 Ersatzschaltung



2 Stromspiegelverhältnis:

$$I_a \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \beta_2}\right) = I_e \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta \cdot \beta_2}\right)$$



3 Eingangsspannung:

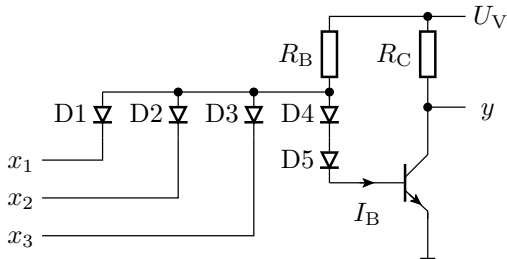
$$U_e = U_{BEF2} + U_{BEF} + 100 \Omega \cdot I_e \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

4 I_e für einen Vorwiderstand $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $U_V = 5 \text{ V}$ mit $I_e \approx I_{RE1}$ und $U_{BEF} \approx 0,7 \text{ V}$:

$$I_e = \frac{U_V - U_{BEF2} - U_{BEF}}{R_1 + R_E} = \frac{3,6 \text{ V}}{1,1 \text{ k}\Omega}$$

Aufgabe 3.7: DT-Gatter

Gegeben sei folgende DT-Gatterschaltung:



$$U_V = 4,75 \dots 5,25 \text{ V}$$

$$R_B = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 1 \text{ k}\Omega$$

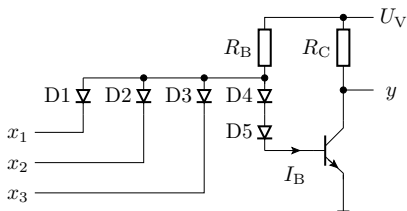
$$\beta = 100 \dots 250$$

$$U_F = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

$$U_{BEF} = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

$$U_{ECX} = 0,1 \dots 0,3 \text{ V}$$

- 1 Welche Funktion hat das Gatter?
- 2 Maximale Eingangsspannung für eine 0?
- 3 Minimale Eingangsspannung für eine 1?
- 4 Maximale Lastanzahl?



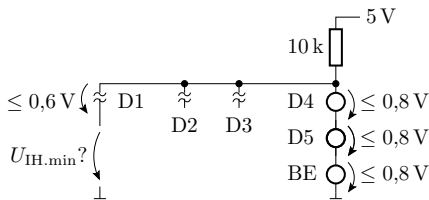
$$\begin{aligned}
 U_V &= 4,75 \dots 5,25 \text{ V} \\
 R_B &= 10 \text{ k}\Omega \\
 R_C &= 1 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 100 \dots 250 \\
 U_F &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{BEF} &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{ECX} &= 0,1 \dots 0,3 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Logische Funktion:

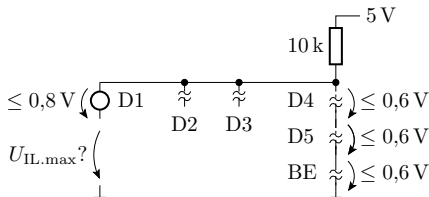
■ Strom $I_B > 0$ verlangt für \mathbf{x} : x_1 x_2 x_3 und bewirkt $y =$

■ Strom $I_B = 0$ verlangt für \mathbf{x} : x_1 x_2 x_3 und bewirkt $y =$

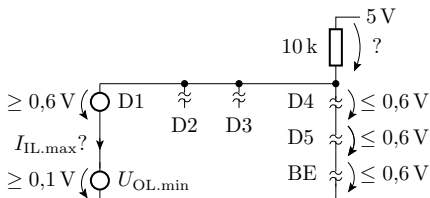
$$y = x_1 \ x_2 \ x_3$$



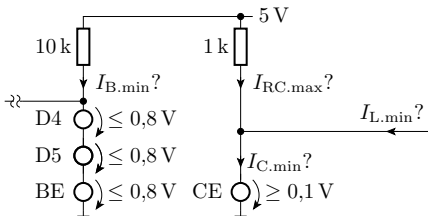
Min. Eingangspotential für $x_i = 1$: $U_{IH.min} =$



Max. Eingangspotential für $x_i = 0$: $U_{IL.max} =$



Maximaler Eingangsstrom für $x_i = 0$: $I_{IL.max} =$



Minimaler Ausgangslaststrom für $y = 0$: $I_{L.min} =$

Max. Lastanzahl: $N_{L.max} =$