



Elektronik I, Foliensatz 3

1.4 Schaltungen mit Bipolartransistoren

G. Kemnitz

Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal
19. November 2014



1. Bipolartransistoren

Bipolartransistoren

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

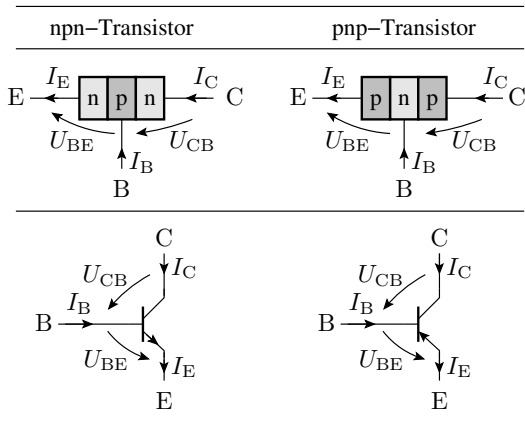


Bipolartransistoren



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 Arbeitsbereiche:

BC-Übergang BE-Übergang	aus aus	ein ein	aus ein	ein aus	fast ein ein
Arbeitsbereich	Ausschaltbereich	zwei leitende Dioden	Normalbereich	Inversbereich	Übersteuerung

- 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.

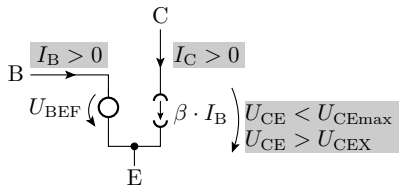


Normalbereich

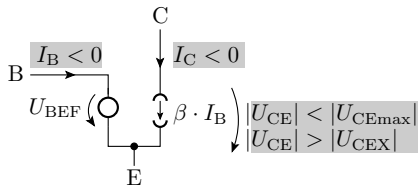
In fast allen Schaltungen (außer Digitalschaltungen) nutzen als Betriebsart den Normalbereich des Transistors:

- 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.



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

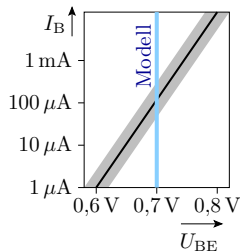
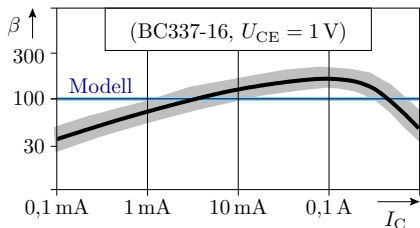
U_{CEmax} Spannungsfestigkeit zwischen Kollektor und Emitter

P_{max} maximale Verlustleistung



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.



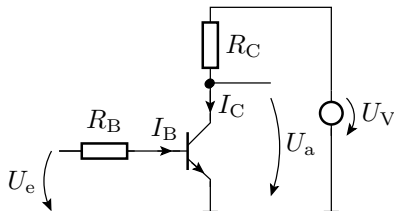
- Schaltungen so entwerfen, dass sie funktionieren, solange die Parameter aller Bauteile in ihren Toleranzbereichen liegen!



Spannungsverstärker

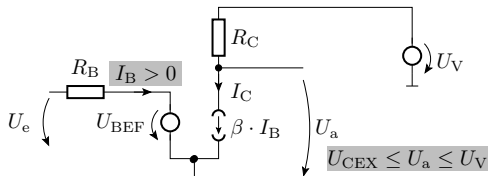
Einfacher Spannungsverstärker

- 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

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

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

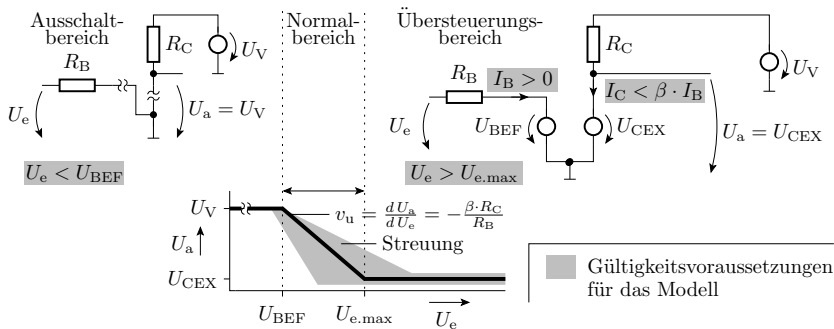
$$U_a = U_V - R_C \cdot I_C$$

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

Zulässiger Eingangsspannungsbereich:

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

Übertragungsfunktion mit allen Arbeitsbereichen



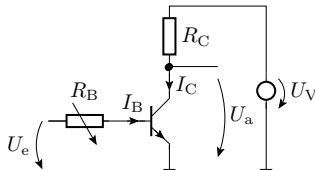
Problem Parameterstreuungen:

- 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 :

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

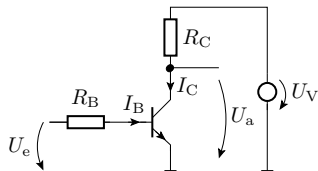


- In einer integrierten Schaltung müsste man den R_B nach dem Test mit einem Laser trimmen. Sehr fertigungsaufwändig!

Fakt 1

Man muss Verstärker so bauen, dass v_u fast nicht von β abhängt.

Beispielrechnung zum einfachen Spannungsverstärker

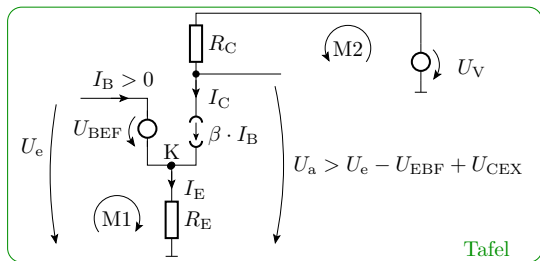
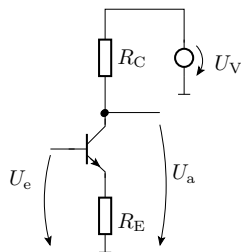


Für die Verstärkerschaltung sei folgendes vorgegeben :

- der Wert des Kollektorwiderstands: $R_C = 1 \text{ k}\Omega$
- die Transistorparameter: $100 \leq \beta \leq 250$; $U_{\text{BEF}} \approx 0,7 \text{ V}$;
 $U_{\text{CEX}} \approx 0,5 \text{ V}$
- die Versorgungsspannung: $U_V = 5 \text{ V}$
- die gewünschte Verstärkung: $v_u = -10$.

Welchen Einstellbereich muss der Widerstand R_B besitzen? In welchem Bereich darf die Eingangsspannung U_e liegen? Wie groß muss die zulässige Verlustleistung des Transistor sein?

Verbesserter Spannungsverstärker



Knotengleichung für K:

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

Maschengleichung für M1:

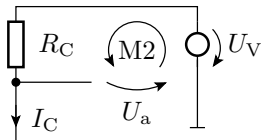
$$U_e = U_{BEFF} + U_{RE} = U_{BEFF} + R_E \cdot (1 + \beta) \cdot I_B$$

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

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?

Fakt 2

Die Spannungsverstärkung

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

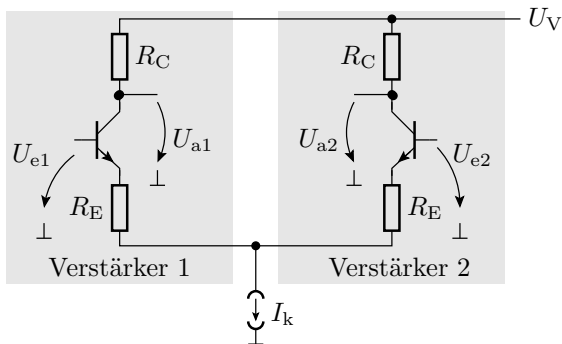
wird fast ausschließlich durch die beiden Widerstände R_E und R_C bestimmt.



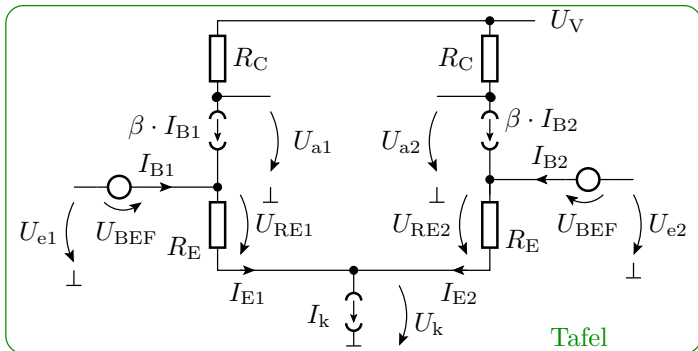
Differenzverstärker

Schaltung des Differenzverstärkers

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



Ersatzschaltung





Für die Emittterströme 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:

$$\begin{aligned} I_k &= I_{E,1} + I_{E,2} \\ I_k &= \frac{U_{e1} + U_{e2} - 2 \cdot (U_{BEF} + U_k)}{R_E} \\ U_k &= \frac{U_{e1} + U_{e2} - R_E \cdot I_k}{2} - U_{BEF} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} I_{E,1} &= \frac{U_{e1} - U_{e2}}{2 \cdot R_E} + \frac{I_k}{2} \\ I_{E,2} &= \frac{U_{e2} - U_{e1}}{2 \cdot R_E} + \frac{I_k}{2} \end{aligned}$$



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:

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

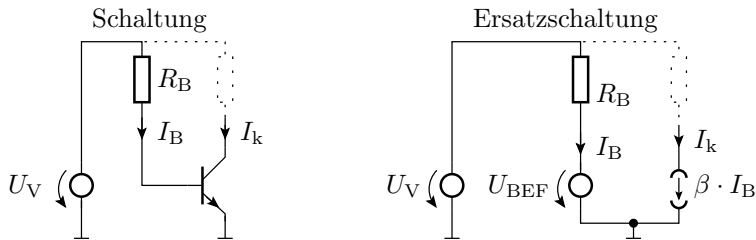
Die Flussspannungen der Basis-Emitter-Übergänge sind aus der Übertragungsfunktion herausgefallen.



Stromquellen

Transistor als Konstantstromquelle

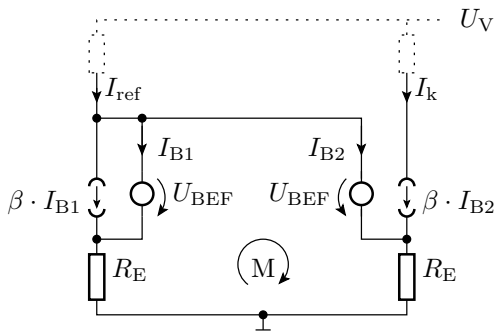
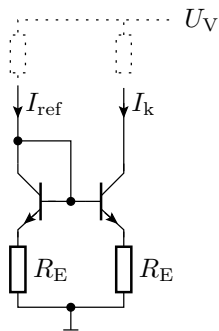
Der Differenzverstärker benötigt eine Konstantstromquelle.
Einfachste Lösung ist ein Transistor mit konstantem Basisstrom:



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

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.

linker Widerstand:

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

rechter Widerstand:

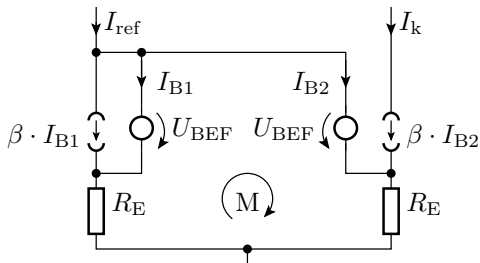
$$U_{RE} = R_E \cdot (I_k + I_{B2})$$

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} , ...) ¹ ist der Ausgabestrom fast gleich dem Vorgabestrom I_{ref} .

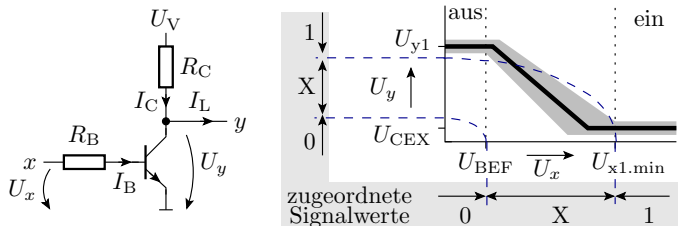
¹Erreichbar mit integrierten geometrisch identischen benachbarten Transistoren. Die richtigen Simulationsmodelle haben zehnmal so viele Parameter. Aber auch da fallen die Parameter nahezu komplett aus der Rechnung heraus.





Transistorinverter

Einfacher Transistorinverter (Verstärker Folie 10)



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

max. Eingangsspannung für 0: $U_{x0.max} = U_{BEF.min}$

min. Eingangsspannung für 1 $U_{x1.min} = f(\beta_{min}, U_{BEF.max}, \dots)$

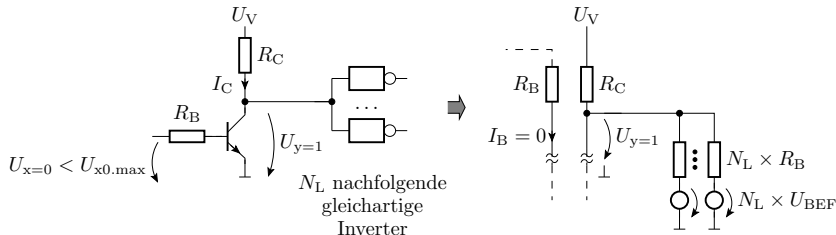
Ausgangsspannung für 0: $U_{y=0} = U_{CEX} < U_{x0.max}^*$

Ausgangsspannung für 1: $U_{y=1} = f(U_V, I_L) > U_{x1.min}^*$

* Voraussetzung für die Hintereinanderschaltung mehrerer Inverter.

Ersatzschaltung mit Transistor im Ausschaltbereich

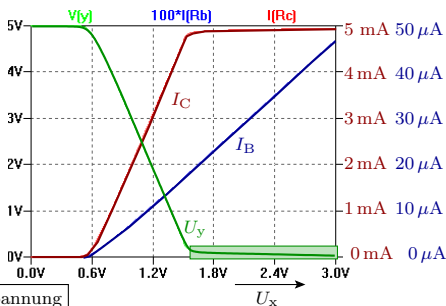
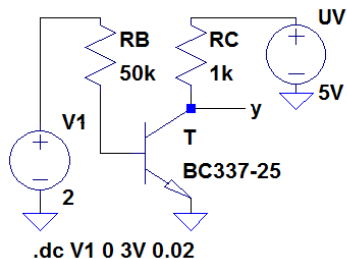
- Eingangsspannung so klein, dass der Transistor ausschaltet.
- Der Ausgang steuert N_L (Lastanzahl) gleichartige Inverter an.



- max. Eingangsspannung für 0: $U_{x0.max} = U_{BEF.min}$
- Ausgangsspannung:

$$U_{y1} = U_{BEF} + (U_V - U_{BEF}) \cdot \frac{R_B/N_L}{R_B/N_L + R_C}$$

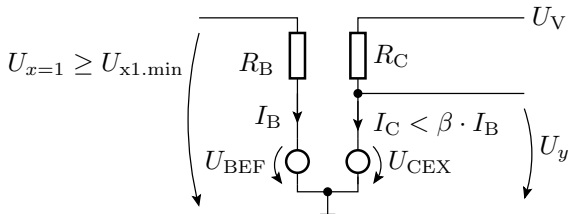
Übersteuerungsbereich



Für $U_y \rightarrow 0$ kann mit einer weiteren Zunahme des Basisstroms nicht mehr Strom am Kollektor abfließen.



Die Ausgangsspannung bleibt etwa konstant. Modellierung der Kollektor-Emitter-Strecke als Konstantspannungsquelle.



Die minimale Eingangsspannung $U_{x1.min}$, ab der der Transistor übersteuert:

$$U_{x1.min} = \frac{R_B \cdot (U_V - U_{CEX})}{\beta_{min} \cdot R_C} + U_{BEF}$$

Maximaler Basiswiderstand:

$$R_B \leq \beta_{min} \cdot R_C \cdot \frac{U_{x1.min} - U_{BEF}}{U_V - U_{CEX}}$$

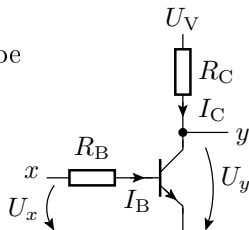
Beispielrechnung Transistorinverter

Für den Transistorinverter sei folgendes vorgegeben:

- Kollektorwiderstand: $R_C = 1 \text{ k}\Omega$
- Transistorparameter: $100 \leq \beta \leq 250$, $U_{\text{BEF}} \approx 0,7 \text{ V}$ und $U_{\text{CEX}} \approx 0,2 \text{ V}$
- Versorgungsspannung: $U_V = 5 \text{ V}$
- Kleinste Spannung, die als 1 interpretiert werden soll:
 $U_{x1.\text{min}} = 1,4 \text{ V}$

Fragen:

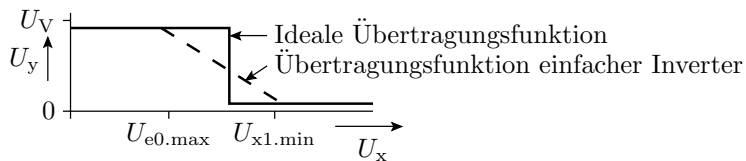
- 1 Bis zu welcher Spannung wird die Eingabe garantiert als 0 interpretiert?
- 2 Welche Spannung wird als 0 und welche Spannung wird als 1 ausgegeben?
- 3 Wie groß darf der Widerstand R_B maximal sein?



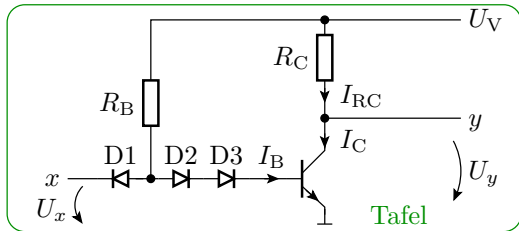


DT-Gatter

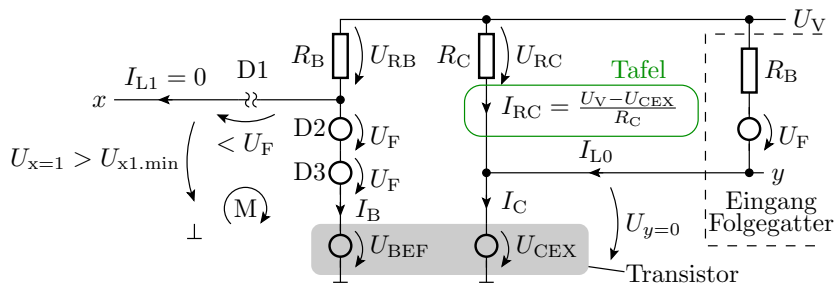
Dioden-Transistor-Inverter



Der DT-Inverter hat fast diese ideale Übertragungsfunktion



Ersatzschaltung für $y = 0$ (Transistor übersteuert)



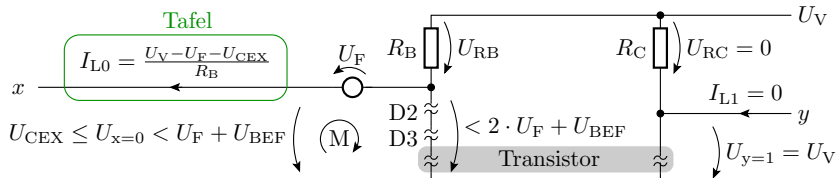
Bedingung für die Übersteuerung des Transistors:

$$I_B = \frac{U_V - 2 \cdot U_F - U_{BEF}}{R_B} > \frac{I_{RC} + I_{L0}}{\beta_{min}} = \frac{\frac{U_V - U_{CEX}}{R_C} + \frac{U_V - U_{CEX} - U_F}{R_B}}{\beta_{min}}$$

Mindestspannung für eine 1 am Eingang:

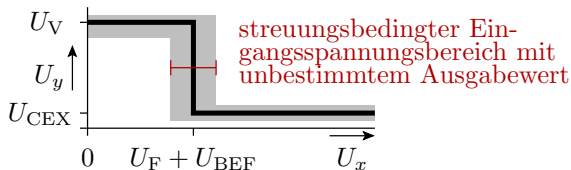
$$U_{x1.min} = 2 \cdot U_{F.max} - U_{F.min} + U_{BEF.max}$$

Ersatzschaltung für $y = 1$ (Transistor aus)



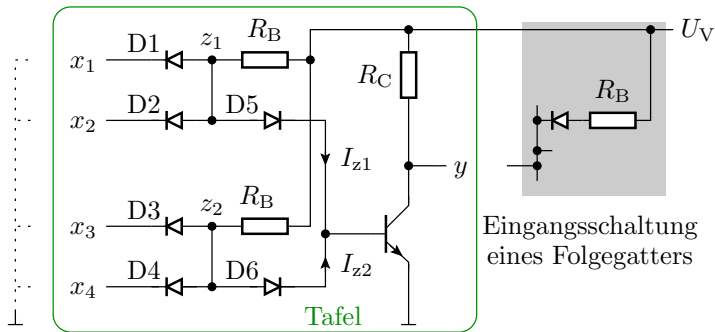
Die Schaltung hat die nahezu perfekte Übertragungsfunktion:

$$U_y = \begin{cases} U_V & \text{für } U_x < U_F + U_{BEF} \\ U_{CEX} & \text{für } U_x > U_F + U_{BEF} \end{cases}$$



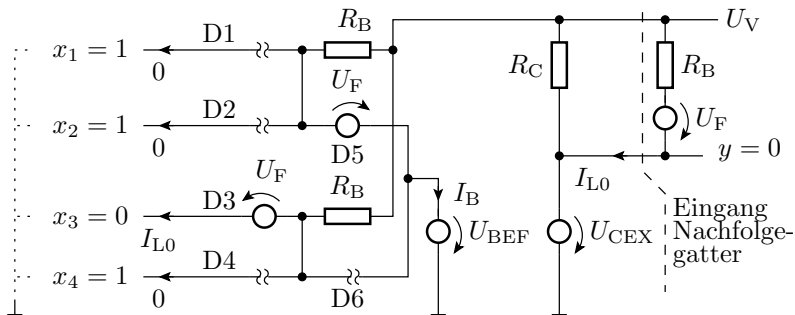
DT-Gatter mit mehreren Eingängen

Kombination aus Dioden-UND-ODER-Gatter und Transistorinverter



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

Ersatzschaltung für $y = 0$



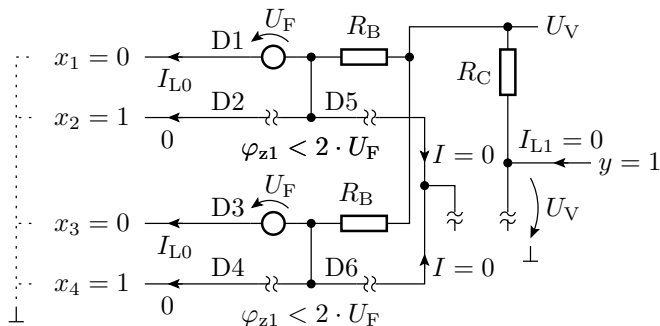
- Potential an x_1 und x_2 oder an x_3 und x_4 größer:

$$U_{x1.min} = U_{F.max} - U_{F.min} + U_{BEf.max}$$

- Damit der Transistor sicher übersteuert:

$$\beta_{min} \cdot I_{B.min} > \frac{U_V - U_{CEX}}{R_C} + \frac{U_V - U_F - U_{CEX}}{R_B}$$

Ersatzschaltung für $y = 1$

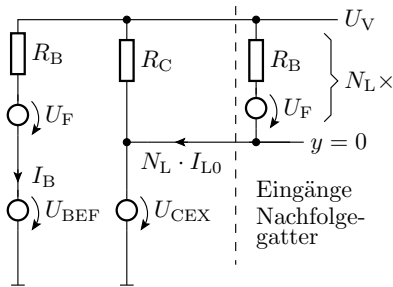


- Potential an x_1 oder x_2 und x_3 oder x_4 kleiner:

$$U_{x0.\max} = 2 \cdot U_{F.\min} - U_{F.\max} + U_{BEF.\min}$$

Mehrere Nachfolgegatter

Bei N_L nachfolgenden Logikgattern muss der Transistor bei Ausgabe einer 0 die N_L Eingangsströme aufnehmen können, ohne den Übersteuerungsbereich zu verlassen:



$$\beta_{\min} \cdot I_{B.\min} > \frac{U_V - U_{CEX}}{R_C} + N_L \cdot \frac{U_V - U_F - U_{CEX}}{R_B}$$

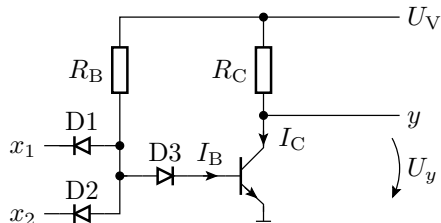
mit

$$I_{B.\min} = \frac{U_V - 2 \cdot U_{F.\max} - U_{BEF.\max}}{R_B}$$

Daraus ergibt sich, wie viele DT-Gattereingänge maximal an den Ausgang eines DT-Gatters angeschlossen werden dürfen.

Beispielrechnung DT-Gatter

Gegeben sei folgende DT-Gatterschaltung:



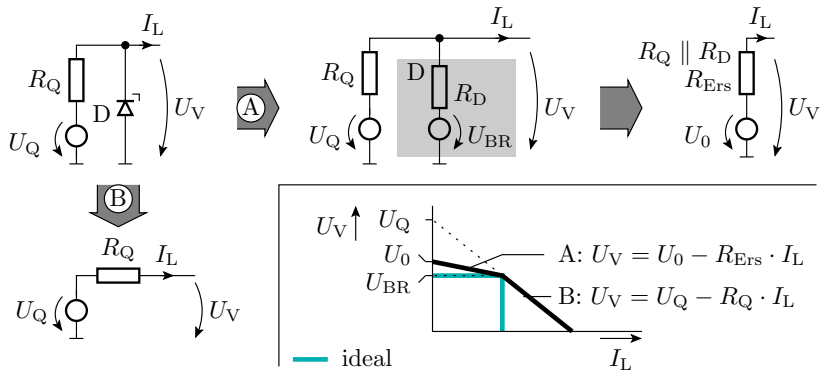
$$\begin{aligned}
 U_V &= 3,1 \text{ V} \dots 3,4 \text{ V} \\
 R_B &= R_C = 10 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 20 \dots 50 \\
 U_F &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{BEF} &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{ECX} &= 0,1 \dots 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

- Wie lautet die logische Funktion?
- Maximale Eingangsspannung für eine 0?
- Minimale Eingangsspannung für eine 1?
- Maximale Lastanzahl?
- Wie unterscheidet sich der Umgang mit den Parametersteu-
erungen der Bauteile bei Logikschaltungen und Verstärkern?



Spannungsstabilisierung

Behandelte Schaltung mit Z-Diode

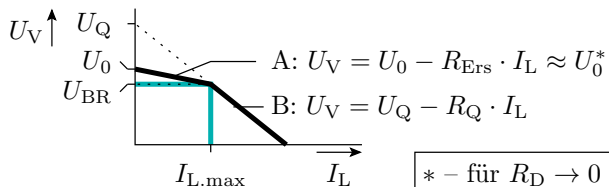


A: Ersatzschaltung für den Arbeitsbereich zur Spannungsstabilisierung

B: Ersatzschaltung für den Arbeitsbereich zur Strombegrenzung

Eine ideale Spannungsversorgung sollte im Stabilisierungsbereich keinen Abfall ($R_{Ers} \rightarrow 0$ d.h. $R_D \rightarrow 0$) und zur Strombegrenzung einen senkrechten Abfall ($U_Q \rightarrow \infty$ und $R_Q \rightarrow \infty$).

Verlustleistung der Bauteile



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

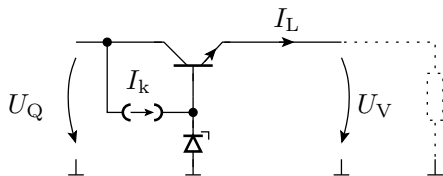
$$P_{RQ.\text{max}} = \frac{U_Q^2}{R_Q} U_Q \text{ mit } I_{L.\text{max}} = \frac{U_Q - U_0}{R_Q}$$

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

$$P_{ZD.\text{max}} = U_0 \cdot I_{L.\text{max}}$$

Bsp.: $U_0 = 10 \text{ V}$, $U_Q = 100 \text{ V}$ $R_Q = 90 \Omega$. $P_{RQ.\text{max}}?$, $P_{ZD.\text{max}}?$.

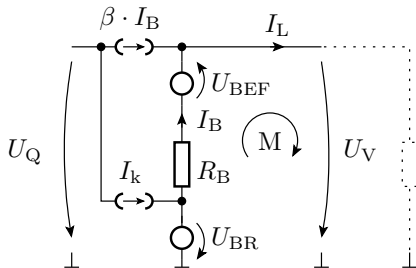
Längsregler



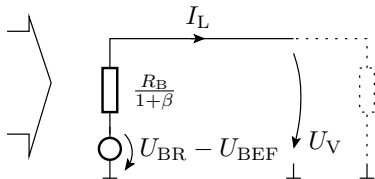
Prinzip:

Bipolartransistor mit konstantem Basispotential, z.B. erzeugt mit einer Z-Diode im Durchbruchbereich.

■ Ersatzschaltung mit Z-Diode im Durchbruchbereich

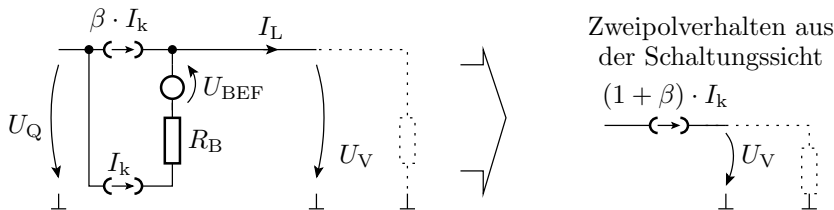


Zweipolverhalten aus der Schaltungssicht



Strombegrenzungsmodus

- Der gesamte Strom I_k fließt in die Basis

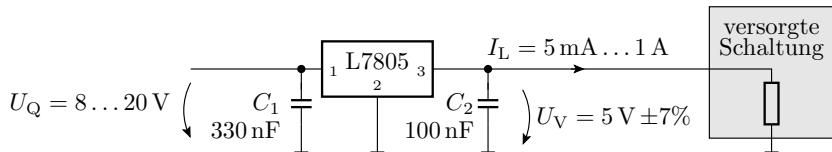


- Laut Ersatzschaltung ideale Stromquelle.
- Begrenzungsstrom streut, da proportional zu β .
- Stabilisierte Spannung übernimmt die Streuungen von U_{BEF} des Transistors und von U_{BR} der Z-Diode.
- Praktische Längsregler haben mehr Bauteile und kleinere Toleranzen.

Längsregler als Standardschaltkreis

Verbesserte Schaltung aus mehreren Transistoren mit

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

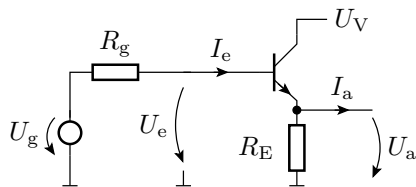


- Die Kapazitäten C_1 und C_2 sind wichtig für das dynamische Verhalten (Ausgleich schneller Eingangsspannungs- und Laststromänderungen).



Aufgaben

Kollektorschaltung

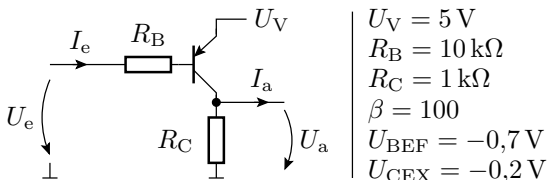


$$\begin{aligned}
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 R_E &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_g &= 100 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 200 \\
 U_{\text{BEF}} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{\text{CEX}} &= 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Gesucht sind:

- Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbetrieb.
- Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- Eingangswiderstand: $R_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- Ausgangswiderstand: $R_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

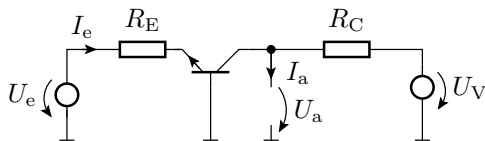
Verstärker mit pnp-Transistor



Gesucht sind:

- Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbetrieb.
- Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- Eingangswiderstand: $R_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- Ausgangswiderstand: $R_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

Basisschaltung

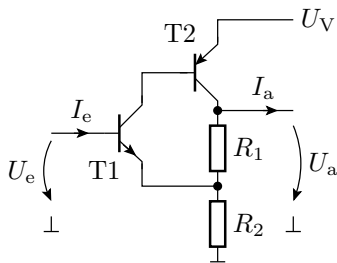


$$\begin{aligned}
 R_E &= 100 \Omega \\
 R_C &= 1 \text{ k}\Omega \\
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 \beta &= 100 \\
 U_{\text{BEF}} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{\text{CEX}} &= 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Gesucht sind:

- Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbetrieb.
- Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- Eingangswiderstand: $R_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- Ausgangswiderstand: $R_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

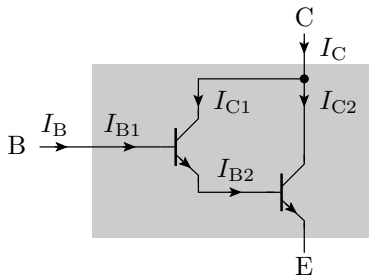
2-Transistor-Verstärker



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

- Ersatzschaltung mit dem Transistor im Normalbetrieb.
- Übertragungsfunktion: $U_a = f(U_e)$
- Eingangsspannungsbereich, in dem das Modell gültig ist.
- Eingangswiderstand: $R_e = \frac{dU_e}{dI_e}$
- Ausgangswiderstand: $R_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

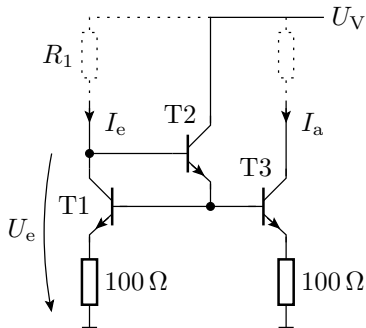
Darlington-Transistor



Gesucht sind:

- Ersatzschaltung mit beiden Transistoren im Normalbetrieb.
- Bedingungen, unter denen das Modell gilt.
- Transformierte Ersatzschaltung mit nur einer Spannungs- und einer Stromquelle.

Verbesserter Stromspiegel



Gesucht sind:

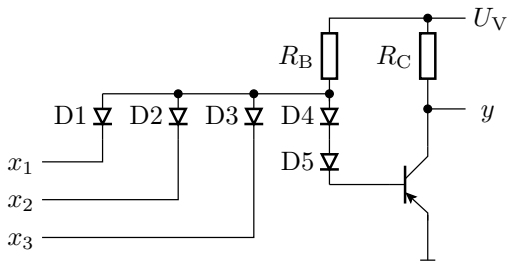
- Ersatzschaltung mit allen Transistoren im Normalbetrieb.
- Das Stromspiegelverhältnis $I_a = f(I_e)$.
- Die Eingangsspannung als Funktion des Eingangsstroms:

$$U_e = f(I_e)$$

- Den Eingangsstrom I_e für einen Vorwiderstand $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $U_V = 5 \text{ V}$.

DT-Gatter

Gegeben sei folgende DT-Gatterschaltung:



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

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

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

$$\beta = 100 \dots 250$$

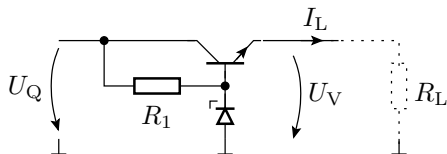
$$U_F = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

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

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

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

Längsregler



$$\begin{aligned}
 U_Q &= 8 \text{ V} \\
 R_1 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 \text{Z-Diode:} \\
 U_{BR} &= 6 \text{ V} \\
 \text{Transistor:} \\
 U_{BEF} \\
 \beta &= 100
 \end{aligned}$$

Bestimmen Sie die linearen Ersatzschaltungen für die Arbeitsbereiche mit dem Transistor im Normalbetrieb und

- 1 der Z-Diode im Durchbruchbereich
- 2 der Z-Diode im Sperrbereich.

Wie verhält sich die Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Laststrom I_L in den Bereichen, in den die Ausgangsspannung und der Laststrom ≥ 0 sind?