



# Elektronik I, Foliensatz 3

## 1.4 Schaltungen mit Bipolartransistoren

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU-Clausthal (E1-F3)  
25. November 2015



# 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

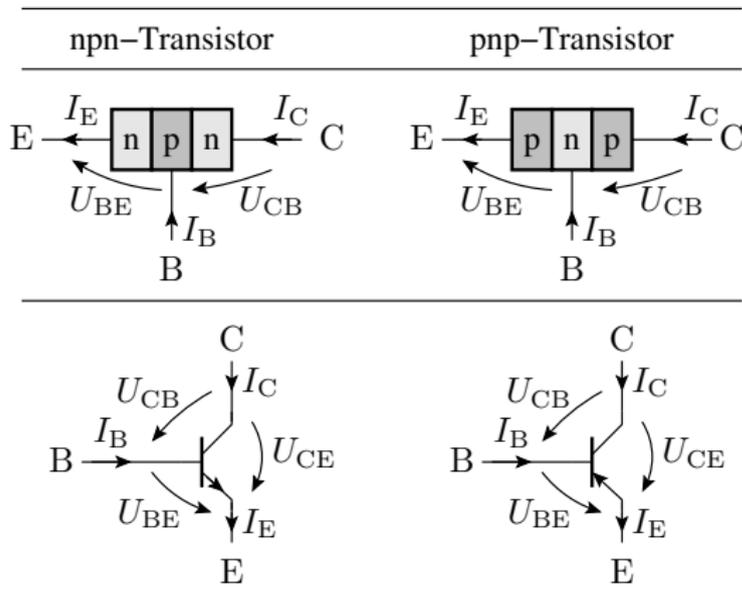


# Bipolartransistoren



# 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.

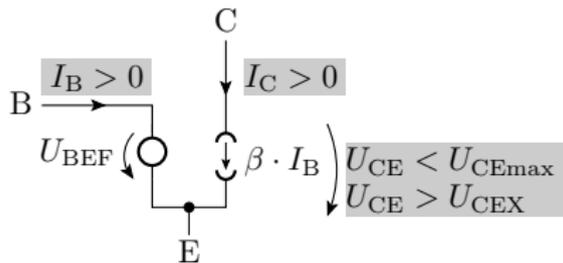


## Normalbereich

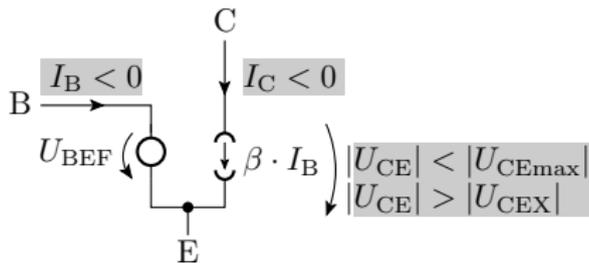
Fast alle Transistorschaltungen (außer Digitalschaltungen) nutzen den Normalbereich:

- 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.



## Modellparameter für zwei typische Transistoren

	$\beta$	$U_{\text{BEF}}$	$U_{\text{CEX}}$	$U_{\text{CEmax}}$	$P_{\text{max}}$
BC327-16 (pnp) -25 -40	100 -250 160-400 250-600	$\approx -0,9 \text{ V}$	$\approx -0,3 \text{ V}$	$-45 \text{ V}$	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

$U_{\text{BEF}}$  Basis-Emitter-Flussspannung

$\beta$  Stromverstärkung

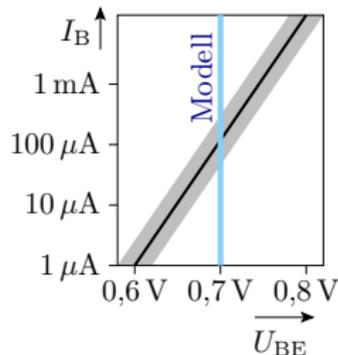
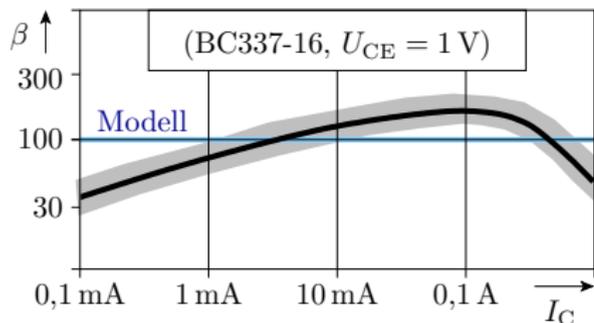
$U_{\text{CEX}}$  Kollektor-Emitter-Restspannung

$U_{\text{CEmax}}$  Spannungsfestigkeit zwischen Kollektor und Emitter

$P_{\text{max}}$  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.



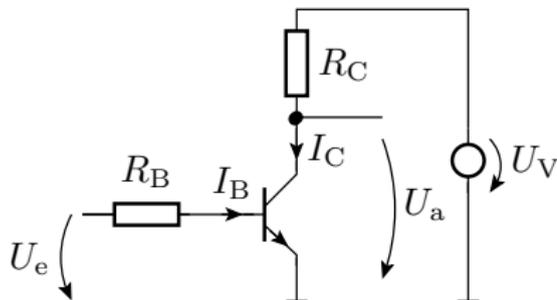
- Schaltungen so entwerfen, dass sie funktionieren, solange die Parameter aller Bauteile in ihren Toleranzbereichen liegen!



# Spannungsverstärker

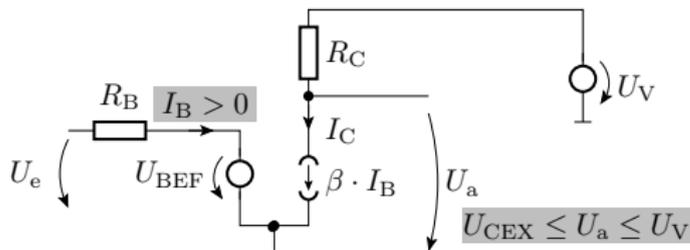
## Einfacher Spannungsverstärker

- $R_B$  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

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

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

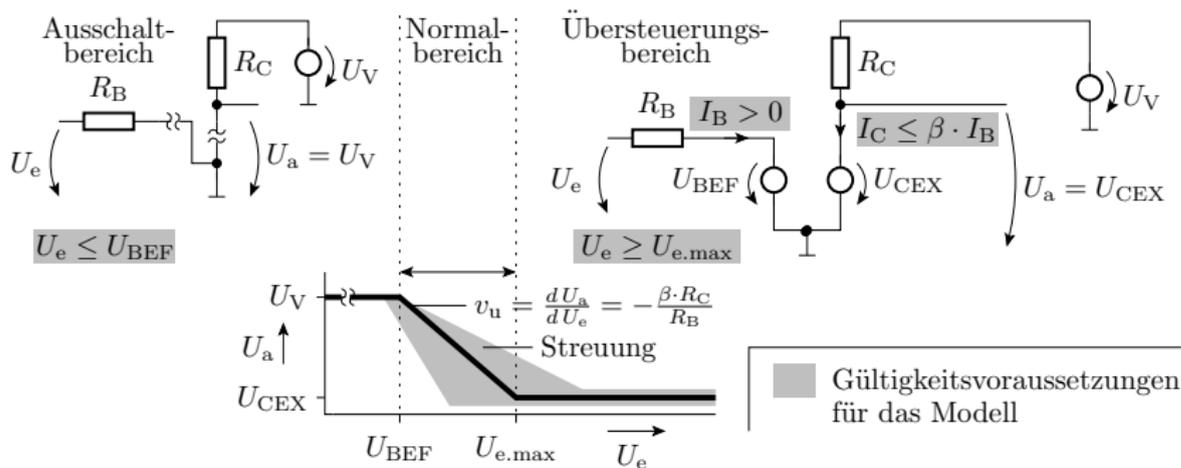
$$U_a = U_V - R_C \cdot I_C$$

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

Zulässiger Eingangsspannungsbereich:

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

# Übertragungsfunktion mit allen Arbeitsbereichen



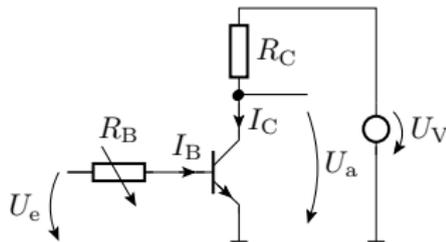
Problem Parameterstreuungen:

- $v_u$  und  $U_{e,max}$  hängen von der Verstärkung  $\beta$  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

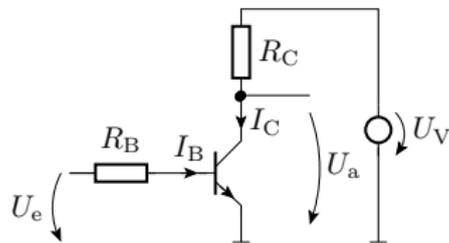
Man muss Verstärker so bauen, dass  $v_u$  fast nicht von  $\beta$  abhängt.

## Beispielrechnung zum einfachen Spannungsverstärker

Für die Verstärkerschaltung sei folgendes vorgegeben:

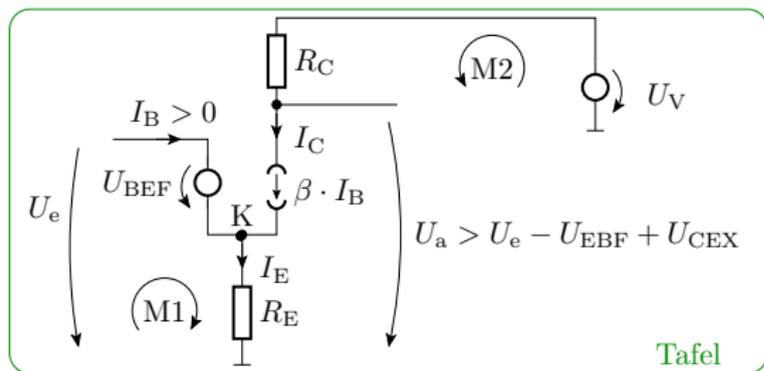
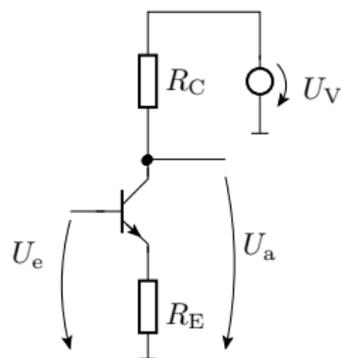
- Kollektorwiderstand  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$
- Transistorparameter:  $100 \leq \beta \leq 250$ ;  $U_{\text{BEF}} \approx 0,7 \text{ V}$ ;  
 $U_{\text{CEX}} \approx 0,5 \text{ V}$
- Versorgungsspannung  $U_V = 5 \text{ V}$
- gewünschte Verstärkung:  $v_u = -10$ .

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?



$$R_{B.\text{min}} = \frac{\beta_{\text{min}} \cdot R_{C.\text{min}}}{v_u}; \quad R_{B.\text{max}} = \frac{\beta_{\text{max}} \cdot R_{C.\text{max}}}{v_u}$$

## Verbesserter Spannungsverstärker



Knotengleichung für K:

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

Maschengleichung für M1:

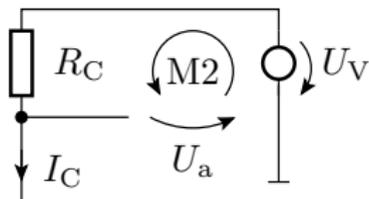
$$U_e = U_{BEFF} + U_{RE} = U_{BEFF} + R_E \cdot (1 + \beta) \cdot I_B$$

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

## 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

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

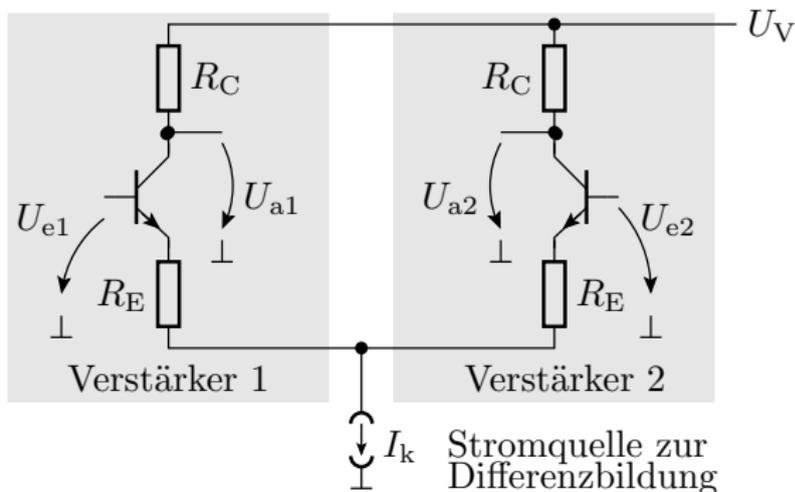
ist nahezu das Verhältnis  $R_C/R_E$ .



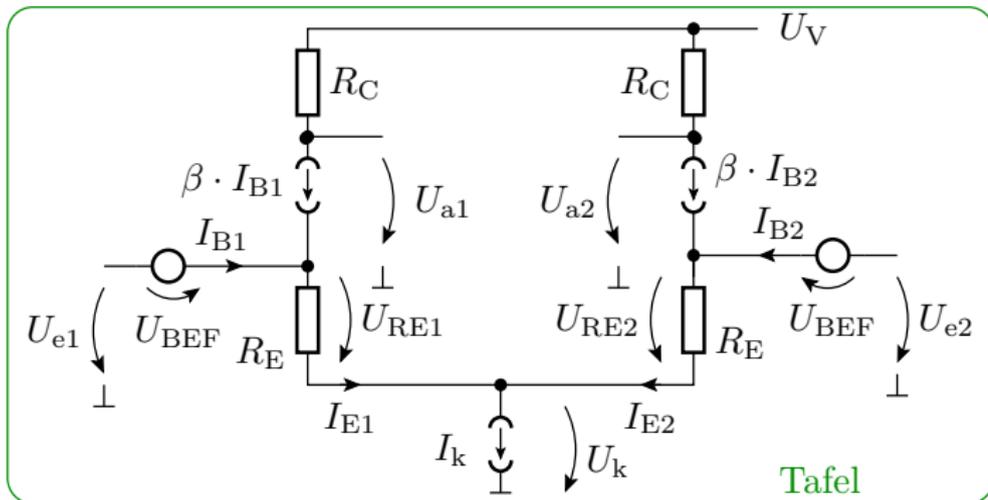
## Differenzverstärker

## 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:

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

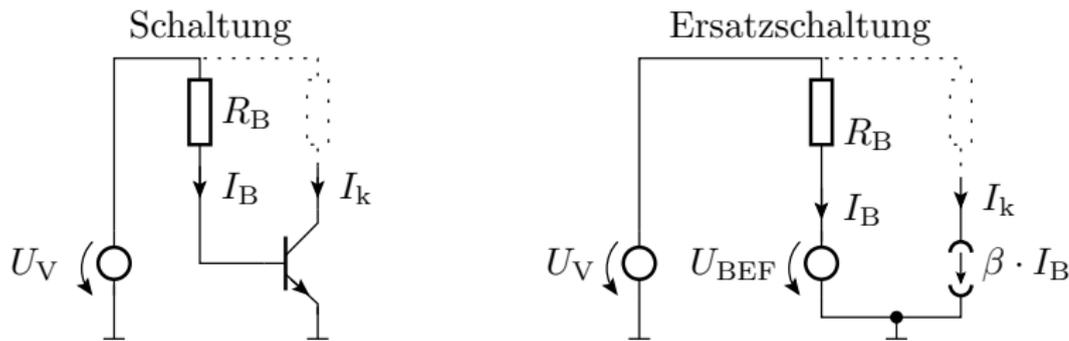
Die Flussspannungen der Basis-Emitter-Übergänge sind aus der Übertragungsfunktion herausgefallen.



## Stromquellen

## Transistor als Konstantstromquelle

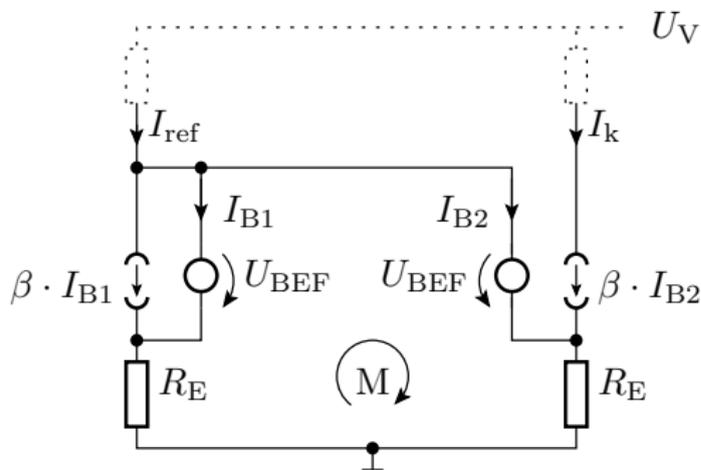
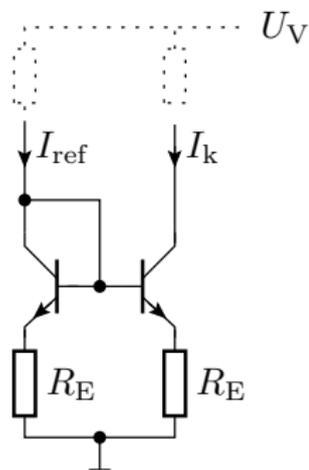
Der Differenzverstärker benötigt eine Konstantstromquelle.  
Einfachste Lösung ist ein Transistor mit konstantem Basisstrom:



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

Problem: Der erzeugte Konstantstrom  $I_k$  hängt erheblich von den streuungsbehafteten Transistorparametern  $\beta$  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:

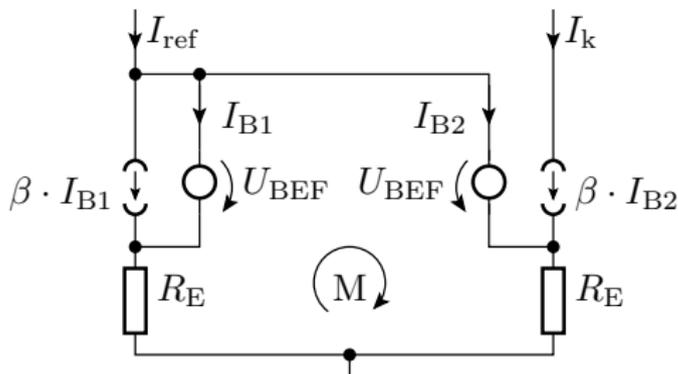
$$U_{RE} = R_E \cdot (I_k + I_{B2})$$

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 ( $\beta$  und  $U_{BEF}$ , ...) <sup>1</sup> ist der Ausgabestrom fast gleich dem Vorgabestrom  $I_{ref}$ .

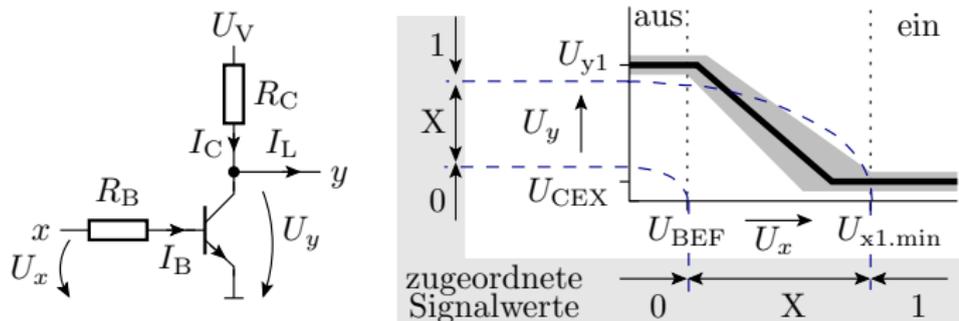
<sup>1</sup>Erreichbar mit integrierten geometrisch identischen benachbarten Transistoren. Die richtigen Simulationsmodelle haben zehnmal so viele Parameter. Aber auch da fallen die Parameter nahezu komplett aus der Rechnung heraus.





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

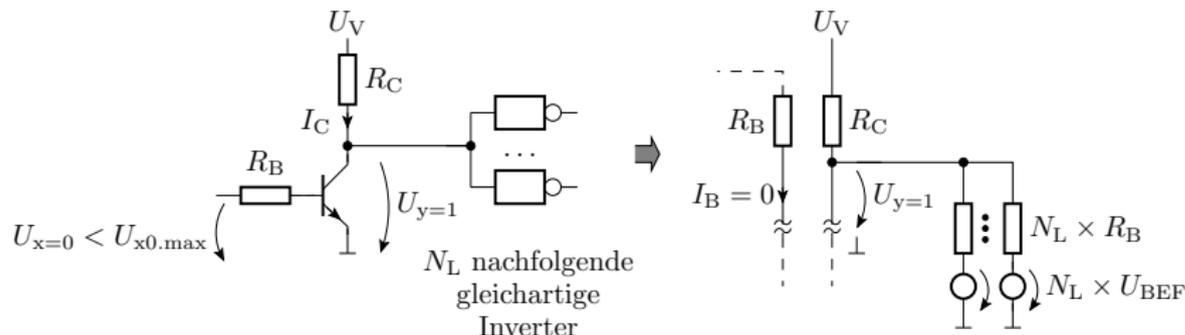
Ausgangsspannung für 0:  $U_{y=0} = U_{CEX} < U_{x0.max}^*$

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

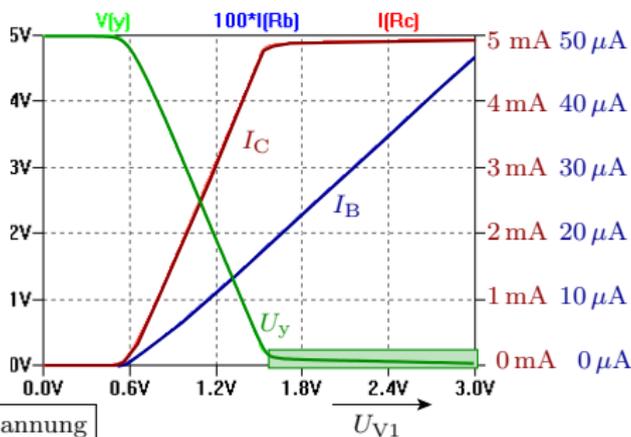
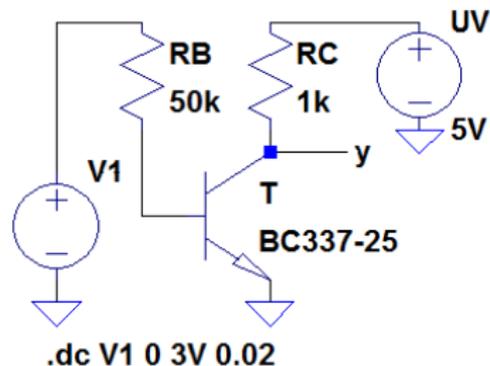
- Eingangsspannung so klein, dass der Transistor ausschaltet.
- Der Ausgang steuert  $N_L$  (Lastanzahl) gleichartige Inverter an.



- 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

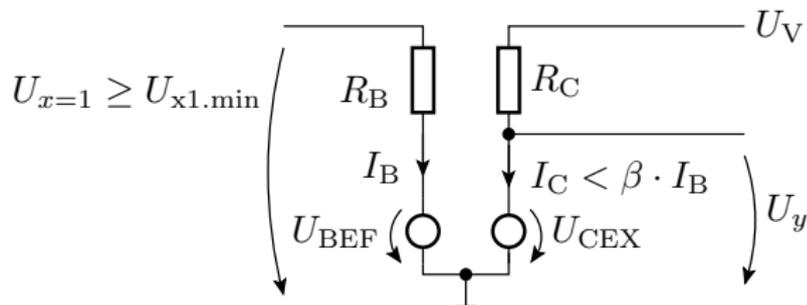


Annäherung durch eine konstante Spannung

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:

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

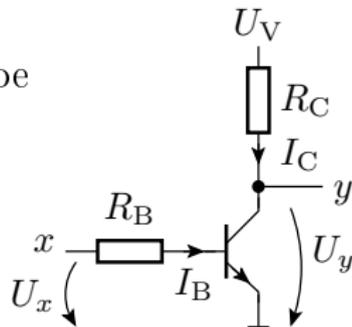
## Beispielrechnung Transistorinverter

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:

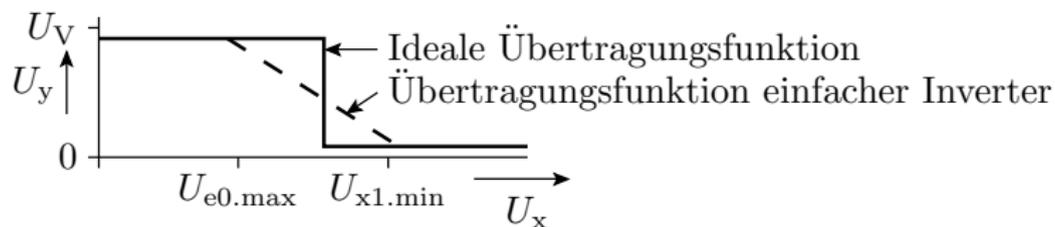
- 1 Bis zu welcher Spannung wird die Eingabe garantiert als 0 interpretiert?
- 2 Welche Spannung wird als 0 und welche Spannung wird als 1 ausgegeben?
- 3 Wie groß darf der Widerstand  $R_B$  maximal sein?



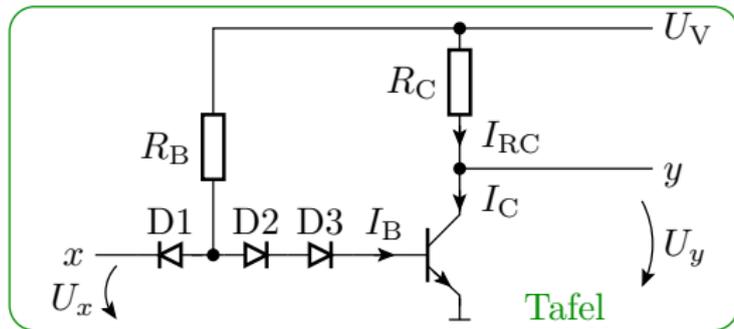


## DT-Gatter

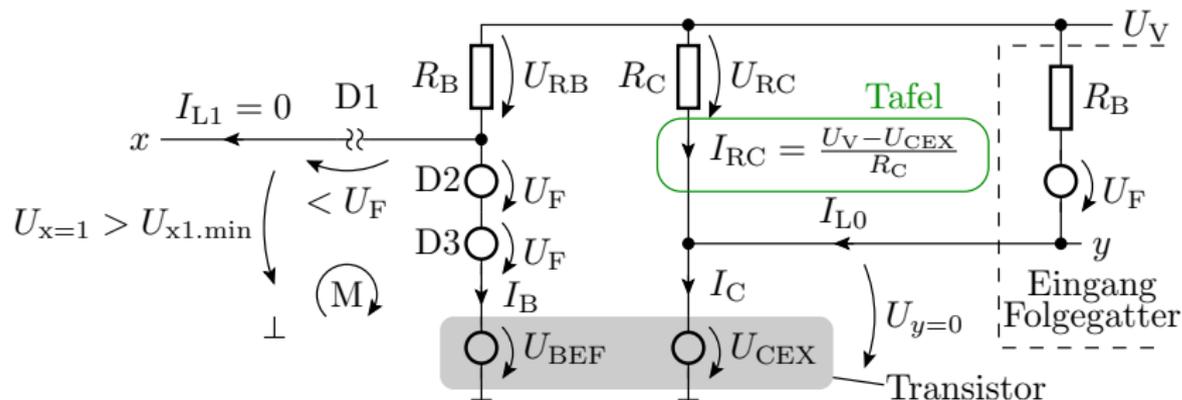
## Dioden-Transistor-Inverter



Der DT-Inverter hat fast diese ideale Übertragungsfunktion



## Ersatzschaltung für $y = 0$ (Transistor übersteuert)



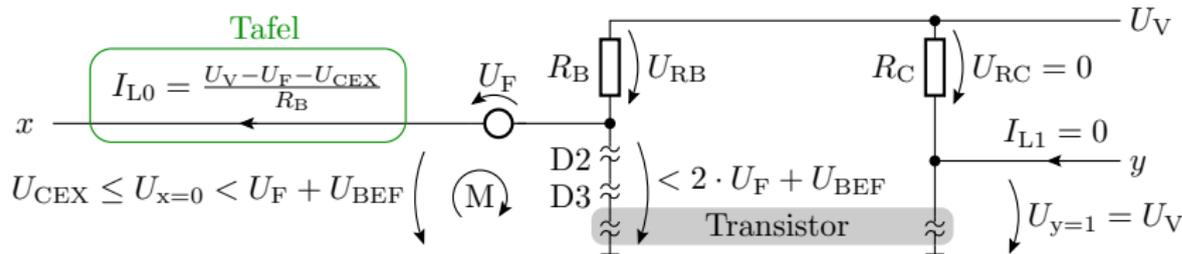
Bedingung für die Übersteuerung des Transistors:

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

Mindestspannung für eine 1 am Eingang:

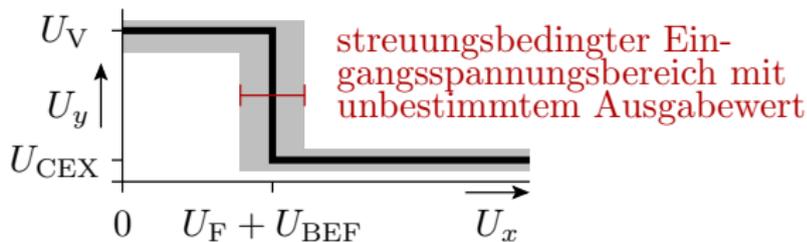
$$U_{x1.min} = 2 \cdot U_{F.max} - U_{F.min} + U_{BEF.max}$$

## Ersatzschaltung für $y = 1$ (Transistor aus)



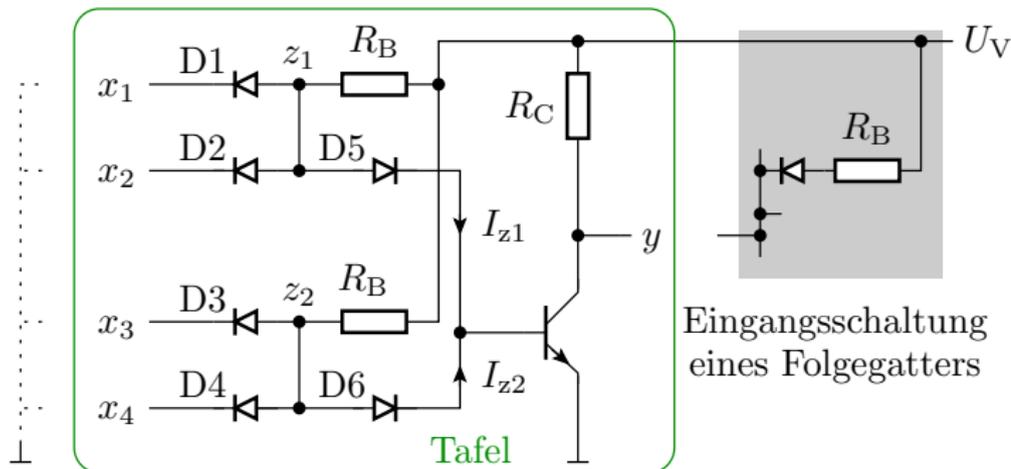
Die Schaltung hat die nahezu perfekte Übertragungsfunktion:

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



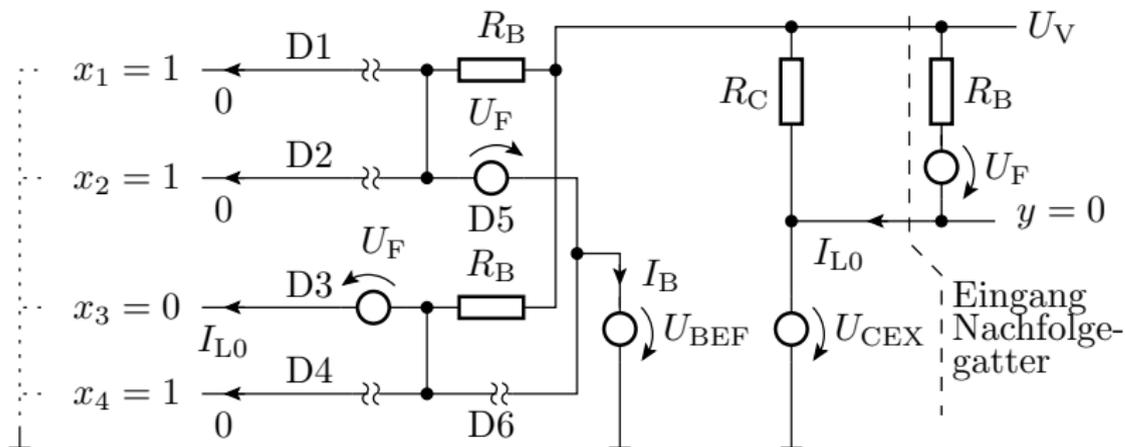
## DT-Gatter mit mehreren Eingängen

Kombination aus Dioden-UND-ODER-Gatter und Transistorinverter



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

## Ersatzschaltung für $y = 0$



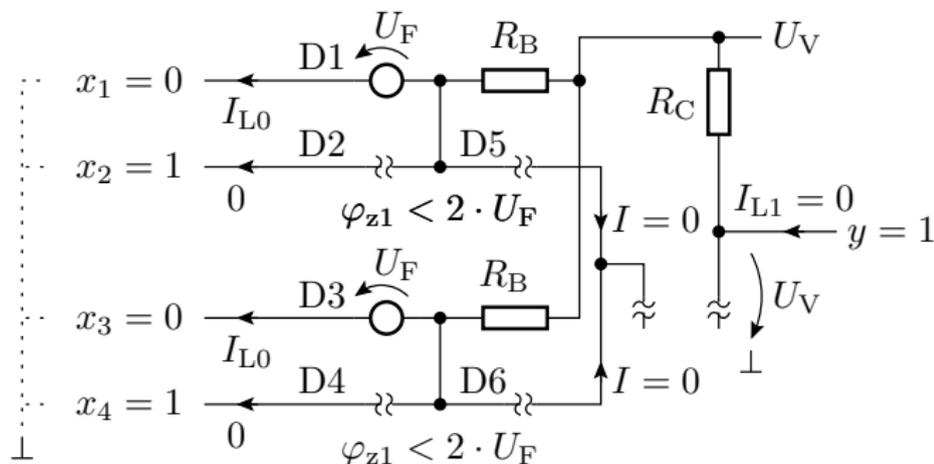
- Potential an  $x_1$  und  $x_2$  oder an  $x_3$  und  $x_4$  größer:

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

- 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 $y = 1$

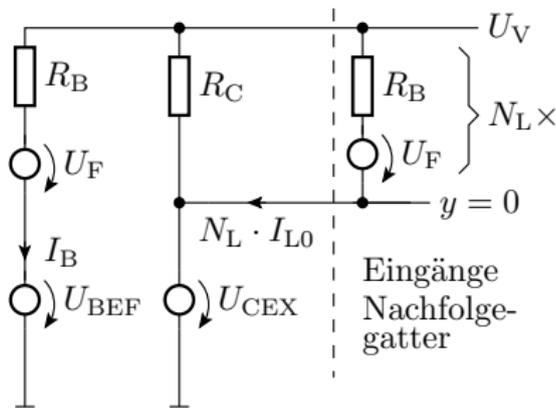


- Potential an  $x_1$  oder  $x_2$  und  $x_3$  oder  $x_4$  kleiner:

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

## 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:



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

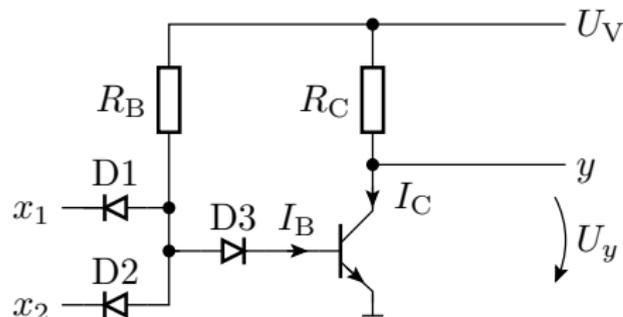
mit

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

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:



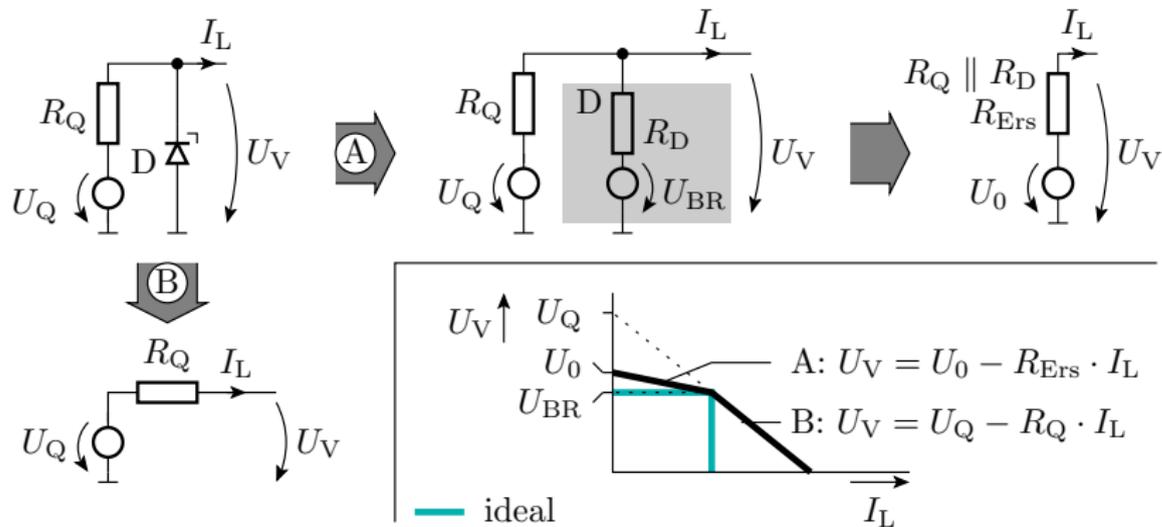
$$\begin{aligned}
 U_V &= 3,1 \text{ V} \dots 3,4 \text{ V} \\
 R_B &= R_C = 10 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 20 \dots 50 \\
 U_F &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{BEF} &= 0,6 \dots 0,8 \text{ V} \\
 U_{ECX} &= 0,1 \dots 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

- 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

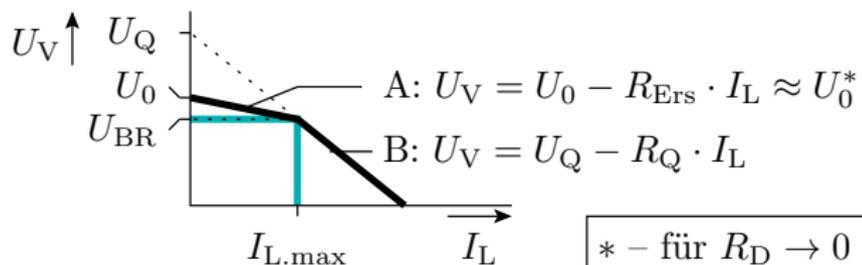


A: Ersatzschaltung für den Arbeitsbereich zur Spannungsstabilisierung

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



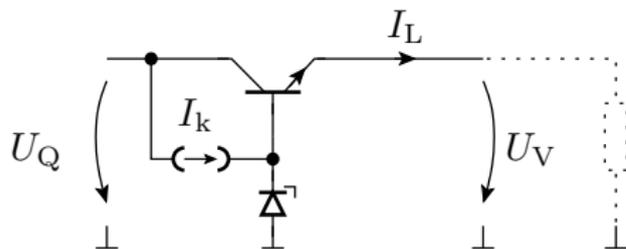
- Der Leistungsumsatz in  $R_Q$  hat sein Maximum bei einem Kurzschluss am Ausgang und beträgt:

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

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

$$P_{ZD,\text{max}} = U_0 \cdot I_{L,\text{max}} \quad \text{mit} \quad I_{L,\text{max}} = \frac{U_Q - U_0}{R_Q}$$

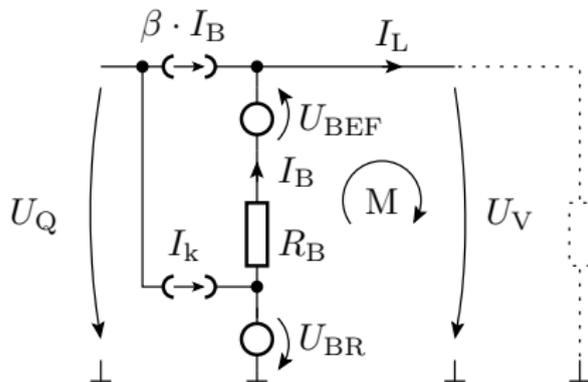
## Längsregler



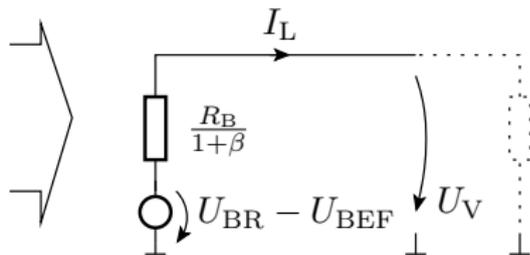
Prinzip:

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

### ■ Ersatzschaltung mit Z-Diode im Durchbruchbereich

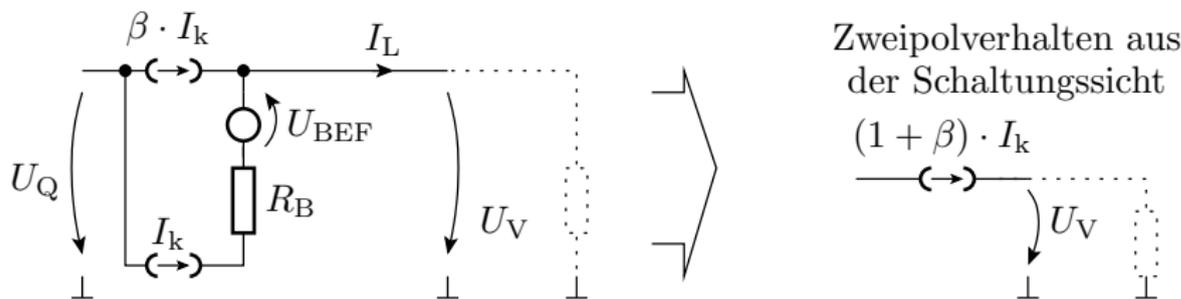


Zweipolverhalten aus der Schaltungssicht



## Strombegrenzungsmodus

- Der gesamte Strom  $I_k$  fließt in die Basis

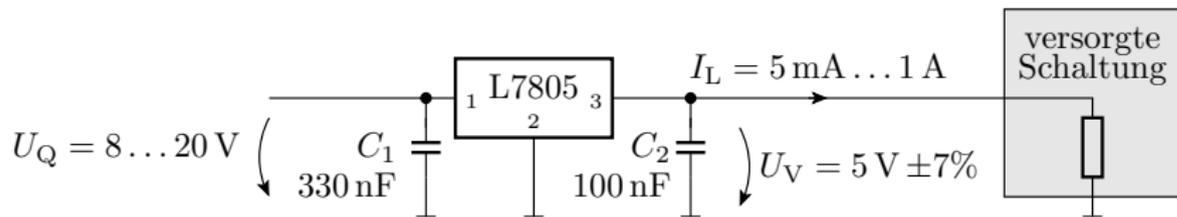


- Laut Ersatzschaltung ideale Stromquelle.
- Begrenzungsstrom streut, da proportional zu  $\beta$ .
- Stabilisierte Spannung übernimmt die Streuungen von  $U_{BEF}$  des Transistors und von  $U_{BR}$  der Z-Diode.
- Praktische Längsregler haben mehr Bauteile und kleinere Toleranzen.

## Längsregler als Standardschaltkreis

Verbesserte Schaltung aus mehreren Transistoren mit

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

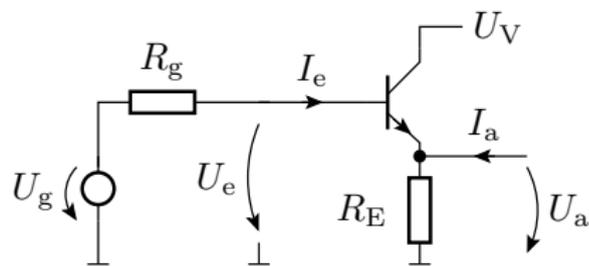


- Die Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  sind wichtig für das dynamische Verhalten (Ausgleich schneller Eingangsspannungs- und Laststromänderungen).



# Aufgaben

## Kollektorschaltung

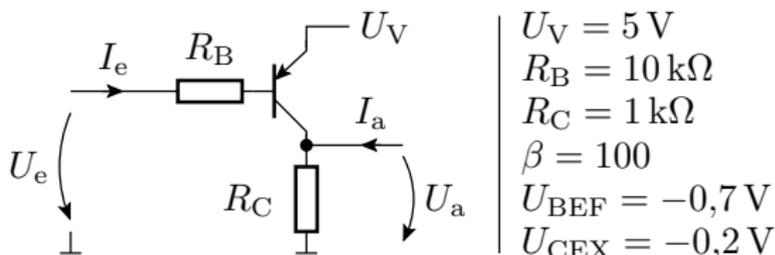


$$\begin{aligned}
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 R_E &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_g &= 100 \text{ k}\Omega \\
 \beta &= 200 \\
 U_{BEF} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{CEX} &= 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

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:  $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

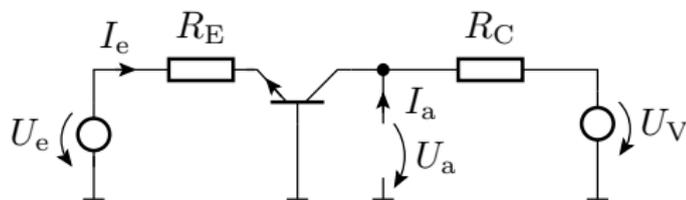
## Verstärker mit pnp-Transistor



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

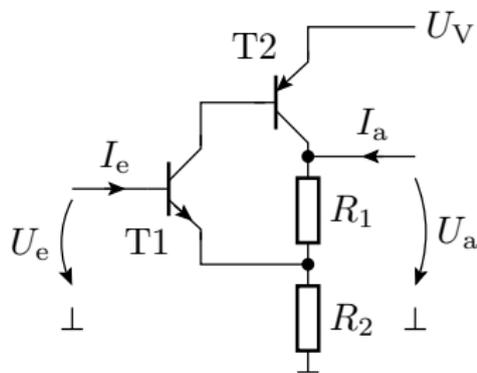


$$\begin{aligned}
 R_E &= 100 \Omega \\
 R_C &= 1 \text{ k}\Omega \\
 U_V &= 5 \text{ V} \\
 \beta &= 100 \\
 U_{\text{BEF}} &= 0,7 \text{ V} \\
 U_{\text{CEX}} &= 0,2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

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:  $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

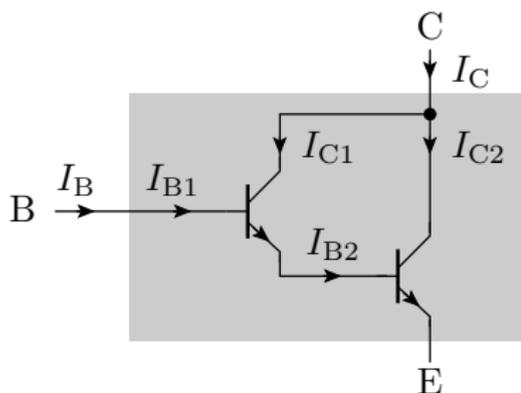
## 2-Transistor-Verstärker



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

- 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:  $r_a = \frac{dU_a}{dI_a}$

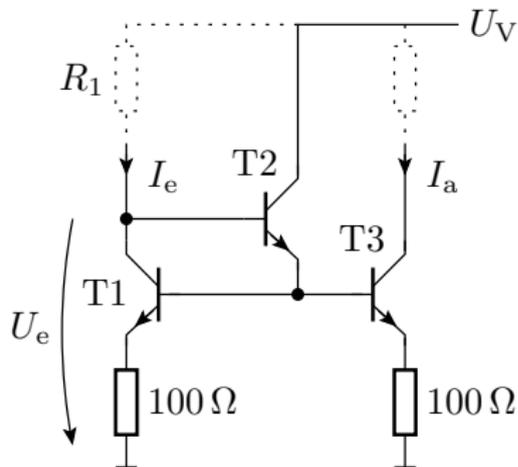
## Darlington-Transistor



Gesucht sind:

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

## Verbesserter Stromspiegel



Gesucht sind:

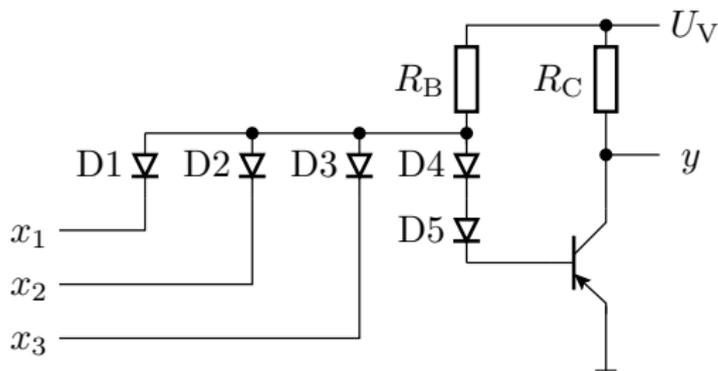
- Ersatzschaltung mit allen Transistoren im Normalbetrieb.
- Das Stromspiegelverhältnis  $I_a = f(I_e)$ .
- Die Eingangsspannung als Funktion des Eingangsstroms:

$$U_e = f(I_e)$$

- 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:



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

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

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

$$\beta = 100 \dots 250$$

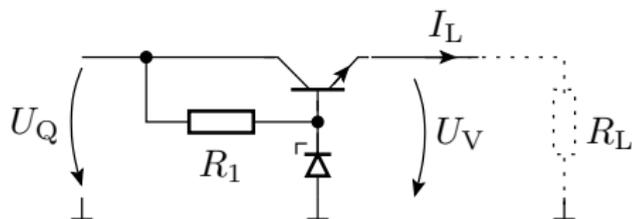
$$U_F = 0,6 \dots 0,8 \text{ V}$$

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

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

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

## Längsregler



$$\begin{aligned}
 U_Q &= 8 \text{ V} \\
 R_1 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 \text{Z-Diode:} \\
 U_{BR} &= 6 \text{ V} \\
 \text{Transistor:} \\
 U_{BEF} &= 0,7 \text{ V} \\
 \beta &= 100
 \end{aligned}$$

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  $\geq 0$  sind?