Aufgabe 4.1

Berechnen Sie für die in Bild 4.1 dargestellte Logikschaltung die Ausgangspegel (U_A) für alle möglichen Schalterstellungen von S_1. Tragen Sie die logischen Zustände von E_1 und U_A in eine Zustandstabelle ein und bestimmen Sie so die logische Funktion des durch die Schaltung realisierten Gatters. Vergleichen Sie die für die einzelnen Logikzustände errechneten Spannungspegel und bestimmen Sie daraus die Spannungsniveaus für den H-Pegel, den L-Pegel, sowie das verbotene Band.
Zur Berechnung der Schaltzustände wird angenommen, dass die Flussspannung der Basis-Emitter-Diode des Transistors T_1 (d.h. die Spannung bei der die Diode vom Sperrzustand in den Durchgangszustand übergeht) bei U_{BE} = 0,7 V liegt. Der Übergang vom Sperr- in den Durchlasszustand wird dabei als ideal abrupt angenommen. Im Durchlassfall fällt über der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors T_1 eine Sättigungsspannung von U_{CES} = 0,1 V ab. Für die Stromverstärkung des Transistors T_1 wird ein Wert von B = 100 angenommen.

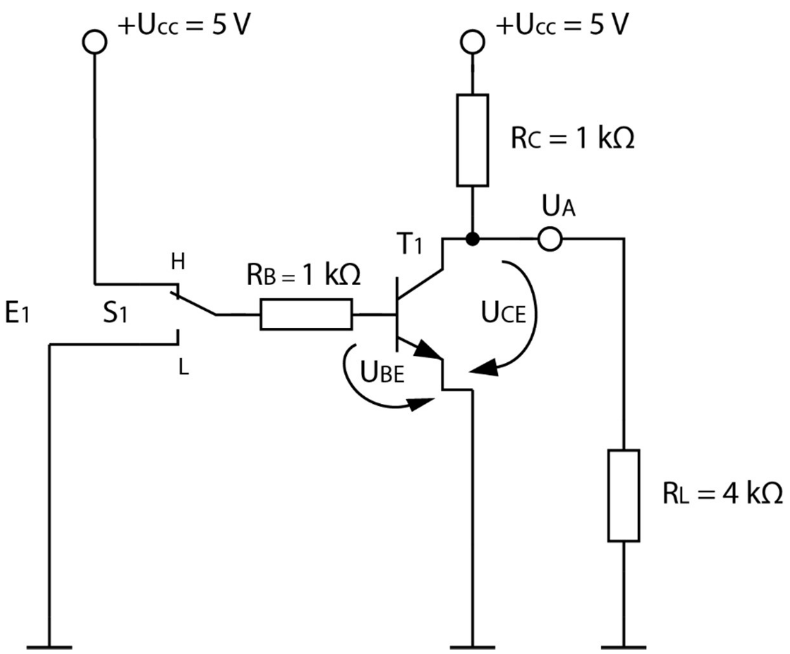


Bild 4.1: Schaltung für ein mit Transistoren realisiertes Logikgatter

Lösung:

Fall E_1 = H => Transistor schaltet und

$$U_A = U_{CES} = 0.1\,V$$

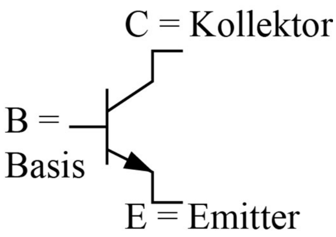
Fall E_1 = L => Transistor sperrt und

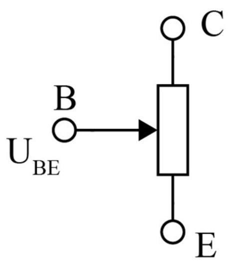
$$U_A = U_{CC} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} = 4\,V$$

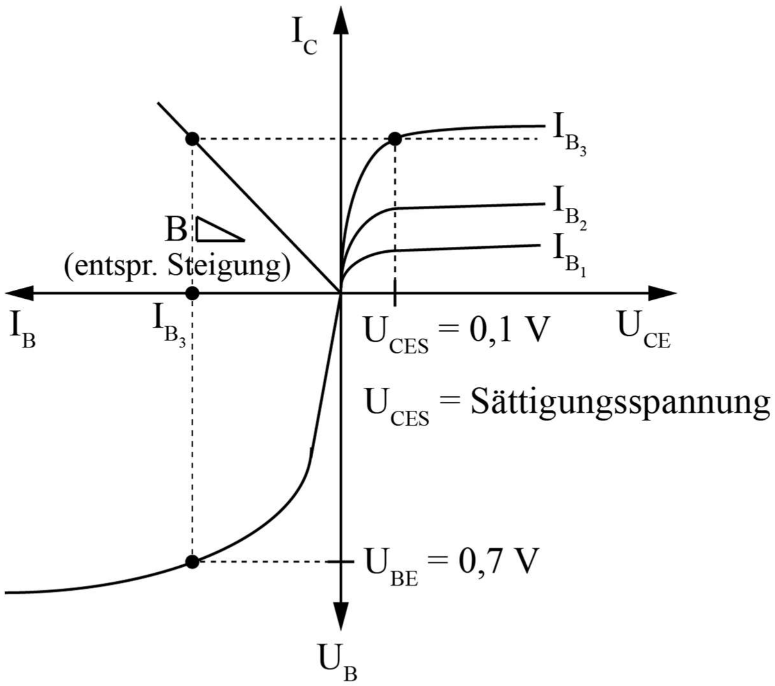
Logische Funktion: Inverter

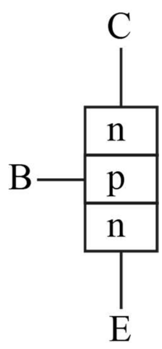
<u>Erläuterung:</u>

Transistor kann als steuerbarer Widerstand verstanden werden, daher der Name:
Transistor = transfer resistor.





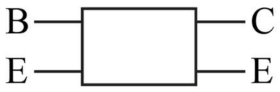




Im durchgesteuerten Fall fällt über C-E-Strecke wenigstens die Sättigungsspannung U_{CES} ab. Solange der Strom durch R_C kleiner ist, als der sich aus der Transferkennlinie ergebende Kollektorstrom, kann in einer 1. Näherung für den Spannungsabfall über der CE-Strecke die Sättigungsspannung U_{CES} angenommen werden.

Bei $U_{BE} = 0{,}7\ V$ wird vom Übergang vom gesperrten in den Durchlassfall ausgegangen (Näherung für Großsignalverhalten). $B = 100$

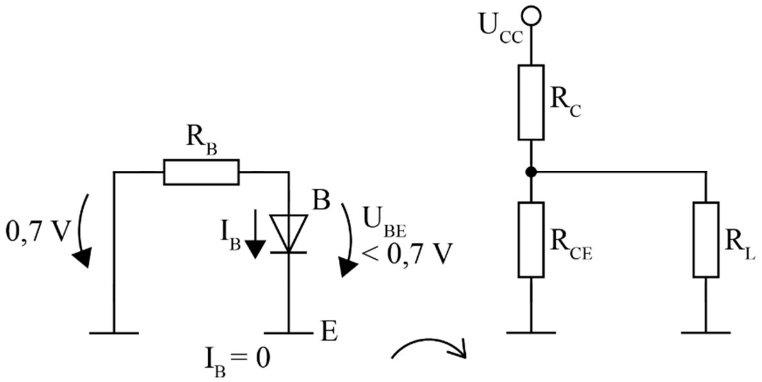
Emitterschaltung:



Der Transistor ist ein Vierpol. Der Eingang (BE-Strecke) ist getrennt vom Ausgang zu betrachten.

Fall E₁ = L

BE-Strecke CE-Strecke

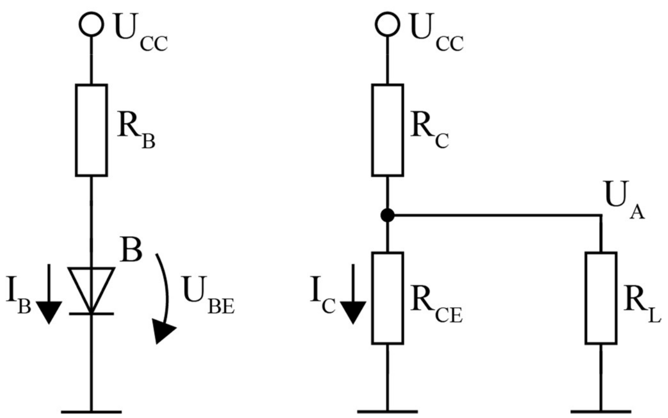


$$\Rightarrow U_{RL} = U_{CC} \cdot \frac{R_L}{R_C + R_L} = 4\,V$$

$R_{CE} \rightarrow \infty$

Fall E₁ = H:

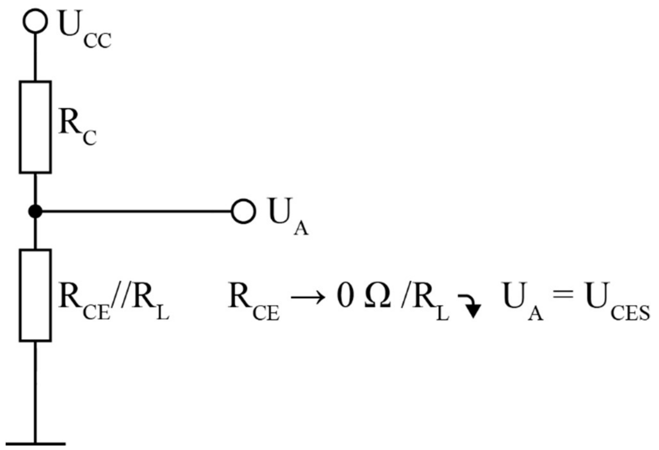
BE-Strecke: CE-Strecke:



$U_{CC} \gg U_{BE}$
$U_{BE} = 0{,}7\ V$

Der Basisstrom errechnet sich wie folgt:

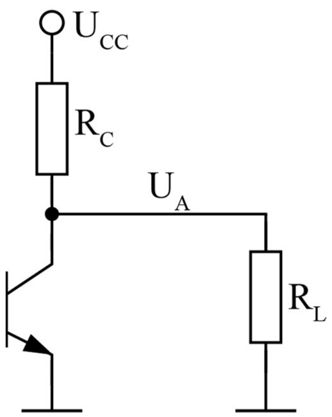
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = 4{,}3\ mA \qquad (fließt\ durch\ die\ Basis - Emitter - Schaltung)$$



Überprüfung der Annahme $R_{CE} \rightarrow 0\ \Omega$ im Durchlassfall:

Der maximal mögliche Kollektorstrom errechnet sich aus dem Basisstrom I_B und dem Stromverstärkungsfaktor B:

$$I_{C_{max}} = B \cdot I_B = 70\ mA$$



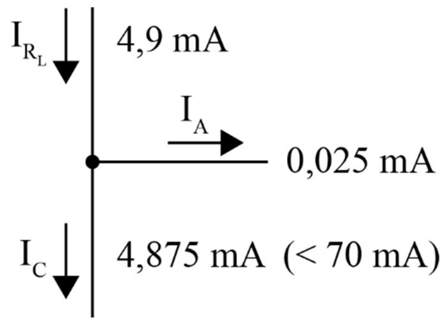
Der Ausgangsstrom wird wie folgt berechnet:

$$I_A = \frac{U_{CES}}{R_L} = 0{,}025\ mA$$

Der Strom, der durch den Widerstand R_C fließt, ergibt sich aus dem Spannungsunterschied zwischen U_{CC} und U_{CES}, sowie dem Widerstandswert R_C:

$$I_{RC} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = 4{,}9\ mA$$

Knoten A:



Zusammenfassung:

E	U_A	A
L	4 V	H
H	0,1 V	L

Aufgabe 4.2

Berechnen Sie für die in Bild 4.2 dargestellte Logikschaltung die Ausgangspegel (U_A) für alle möglichen Schalterstellungen von S_1 und S_2. Tragen Sie die logischen Zustände von E_1, E_2 und U_A in eine Zustandstabelle ein und bestimmen Sie so die logische Funktion des durch die Schaltung realisierten Gatters. Vergleichen Sie die für die einzelnen Logikzustände errechneten Spannungspegel und bestimmen Sie daraus die Spannungsniveaus für den H-Pegel, den L-Pegel sowie das verbotene Band.
Zur Berechnung der Schaltzustände wird angenommen, dass die Flussspannung der Basis-Emitter-Diode des Transistors T_1 sowie der Dioden D_1 und D_2 (d.h. die Spannung bei der die Diode vom Sperrzustand in den Durchgangszustand übergeht) bei U_{BE}, $U_F = 0{,}7$ V liegt. Der Übergang vom Sperr- in den Durchlasszustand wird dabei als ideal abrupt angenommen. Im Durchlassfall fällt über der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors T_1 eine Sättigungsspannung von $U_{CES} = 0{,}1$ V ab. Für die Stromverstärkung des Transistors T_1 wird ein Wert von $B = 100$ angenommen.

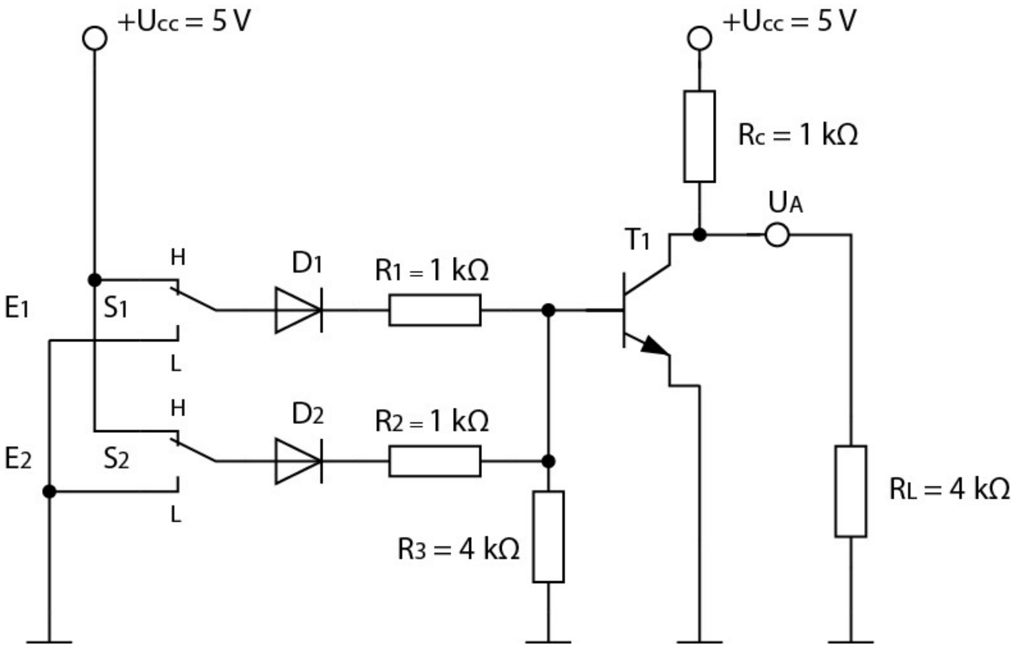
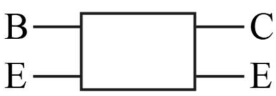
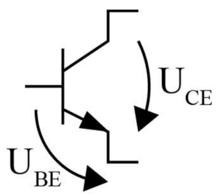


Bild 4.2: Schaltung für ein mit Dioden und Transistoren realisiertes Logikgatter

Lösung:

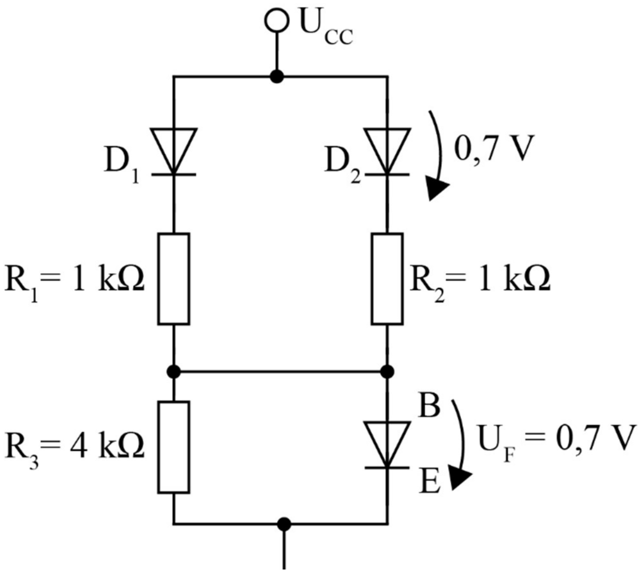
S1	S2	U_A	A
H	H		
L	H		
H	L		
L	L		



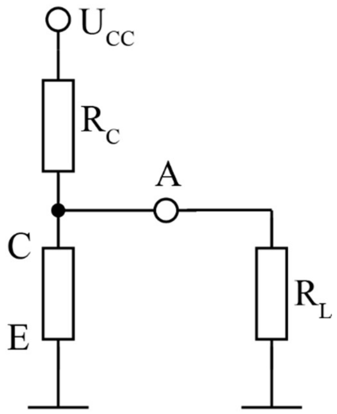


Fall 1: S_1 = H, S_2 = H

Eingangskreis

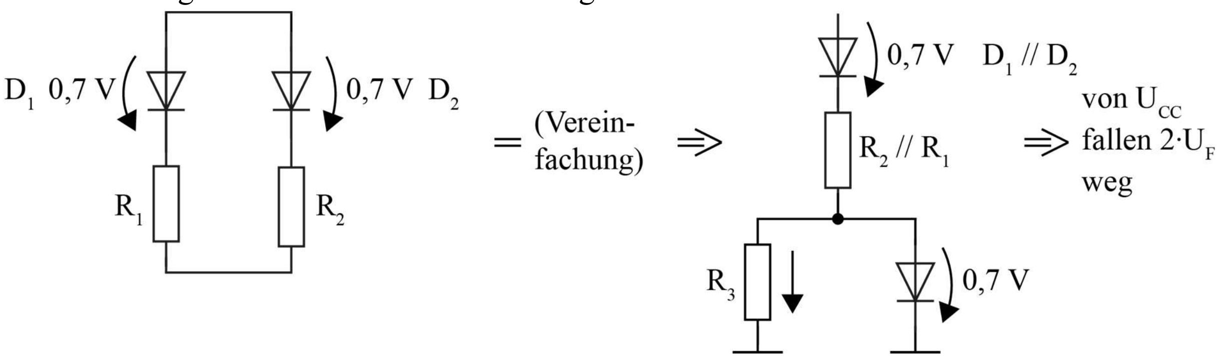


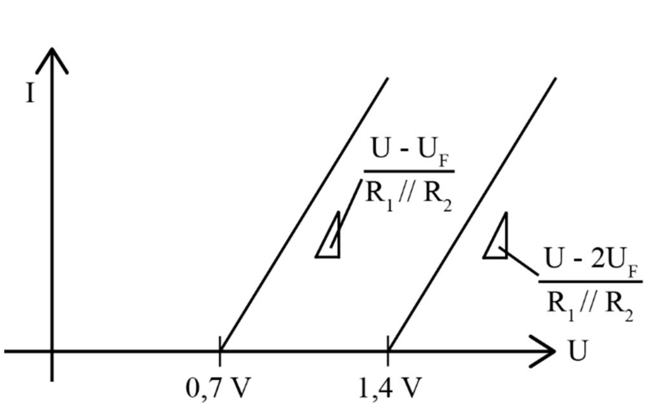
Ausgangskreis

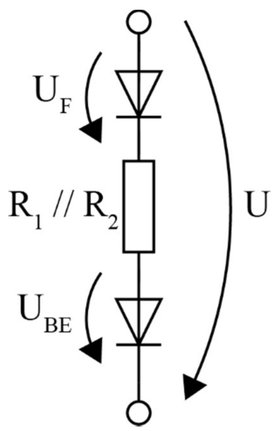


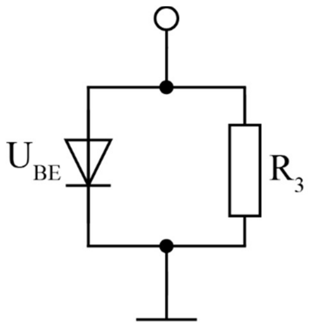
<u>Einschub:</u>

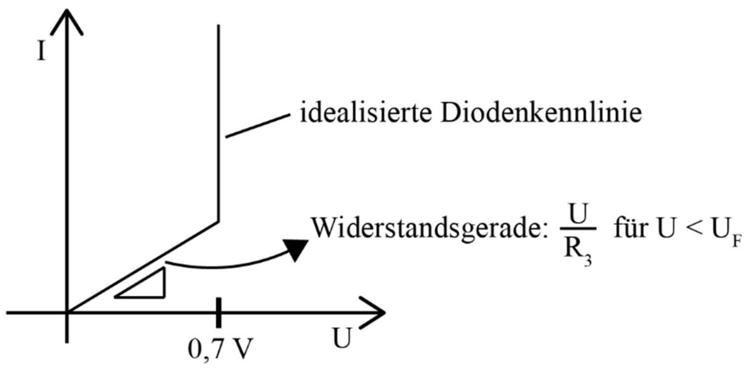
Vereinfachung von 2 identischen Dioden möglich.



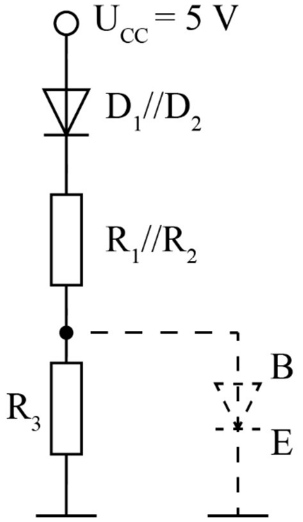








Betrachtung des Eingangskreises:



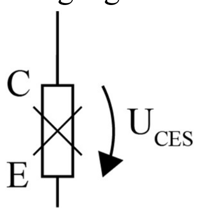
Annahme $D_1//D_2$
→ Durchlassfall

$$U_{R_3} = U_{CC} - U_F \cdot \frac{R_3}{R_1//R_2 + R_3}$$

$$= 4{,}3\ V \cdot \frac{4\ k\Omega}{0{,}5\ k\Omega + 4\ k\Omega} = 3{,}8\ V >> U_{BE} = U_F$$

T_1 → Durchlass

Ausgang:



$U_A = U_{CES} = 0{,}1\ V$

Überprüfung der Stromverstärkung:

$$I_B = \frac{U_{CC} - 2U_F}{R_1//R_2} - \frac{U_F}{R_3} = \frac{3{,}6\ V}{0{,}5\ k\Omega} - \frac{0{,}7\ V}{4\ k\Omega} = 7{,}2\ mA - 0{,}175\ mA = 7{,}025\ mA$$

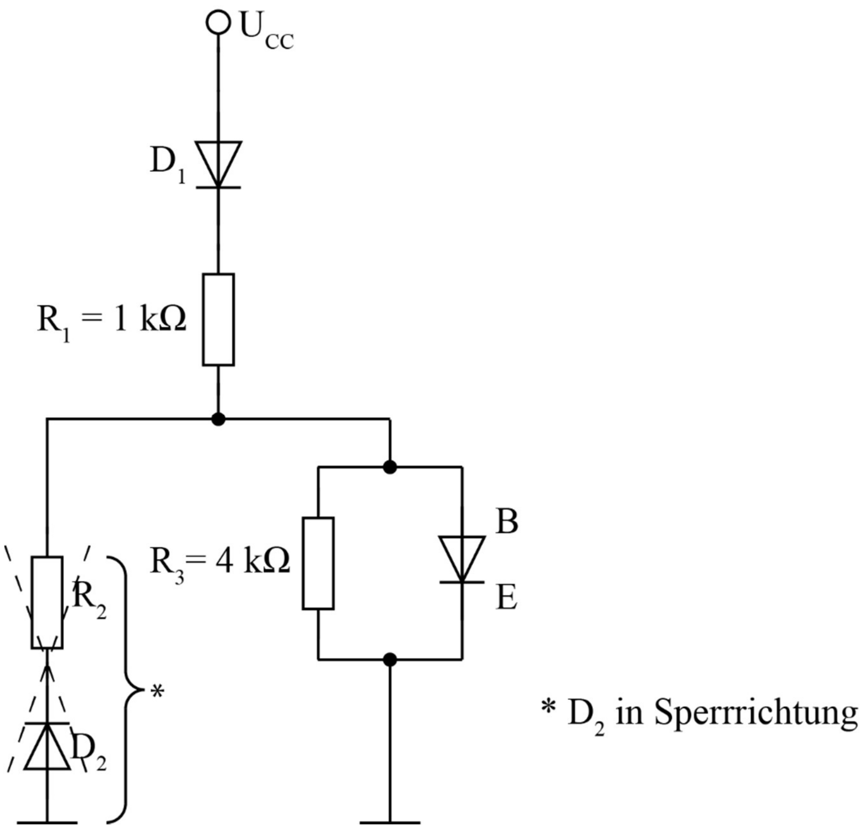
T_1 ist in der Lage einen $I_C = B \cdot I_B$ zu liefern.

$$I_C = 100 \cdot 7\ mA = 700\ mA$$

Tatsächlich fließen

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} - \frac{U_{CES}}{R_L} = \frac{4{,}9\ V}{1\ k\Omega} - \frac{0{,}1\ V}{4\ k\Omega} = 4{,}9\ mA - 0{,}025\ mA$$

Fall 2: S_1 = H, S_2 = L (identisch zu Fall 3: S_1 = L, S_2 = H)



Wenn BE-Strecke gesperrt ist, dann gilt:

$$\Longrightarrow\ U_{R_3} = U_{CC} - U_F \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 4{,}3\ V \cdot \frac{4\ k\Omega}{1\ k\Omega + 4\ k\Omega} = 3{,}44\ V \gg U_{BE} = U_F$$

$\Longrightarrow\ T_1 \longrightarrow$ Durchlass

$$I_C = B \cdot I_B = B \cdot \left(I_{R_1} - I_{R_3}\right) = B \cdot \left(\frac{U_{CC} - 2U_F}{R_1} - \frac{U_F}{R_3}\right) = 100 \cdot \left(\frac{3{,}6\ V}{1\ k\Omega} - \frac{0{,}7\ V}{4\ k\Omega}\right)$$

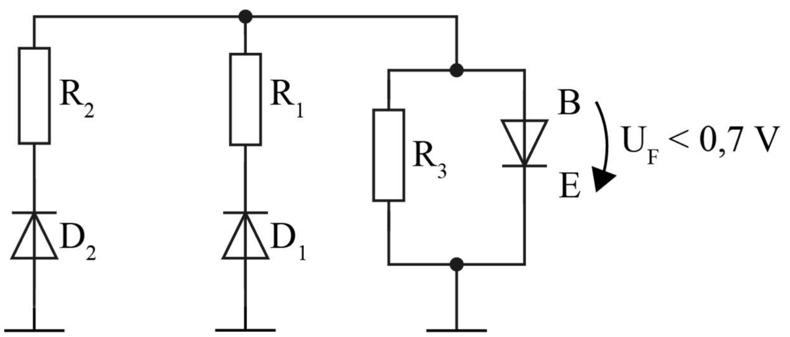
$$= 100 \cdot 3{,}425\ mA = 342{,}5\ mA \gg I_{R_1}$$ $\curvearrowright$ Sättigungsannahme gerechtfertigt

Ausgang:

$U_A = U_{CES} = 0{,}1\ V$

Fall 4: $S_1 = L$, $S_2 = L$

Eingangskreis

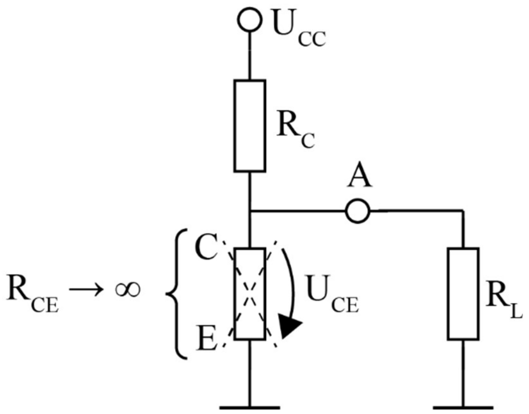


→ BE-Strecke gesperrt

$I_B \approx 0$ mA → $I_C \approx 0$ mA

Ausgangskreis

→ $I_B = 0$ mA
→ $T_1 \Rrightarrow$ gesperrt
→ $I_C = 0$ mA



$$U_A = U_{CC} \cdot \frac{R_L}{R_C + R_L} = 5\,V \cdot \frac{4\,k\Omega}{5\,k\Omega} = 4\,V$$

Zusammenfassung:

S1	S2	$\boldsymbol{U_A}$	A
H	H	0,1 V	L
L	H	0,1 V	L
H	L	0,1 V	L
L	L	4 V	H

⇨ NOR-Schaltung

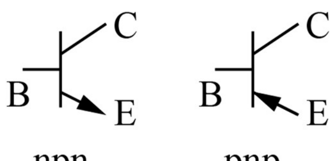
Aufgabe 4.3

Wodurch sind sind Bipolartransistoren gekennzeichnet?

- [x] p n p - Dotierungsabfolge
- [x] n p n - Dotierungsabfolge
- [ ] p^+ n p^+ - Dotierungsabfolge
- [ ] n^+ p n^+ - Dotierungsabfolge
- [x] Stromgesteuert
- [ ] Spannungsgesteuert
- [ ] Hochohmiges Si-Substrat
- [x] Niederohmiges Si-Substrat

Lösung:

Bipolartransistoren - Dotierungsabfolge: p n p ; n p n
Sie werden auf niederohmigen Substraten gefertigt.
Sie sind stromgesteuert.



npn pnp

Aufgabe 4.4

Welche Zusammenhänge werden durch die Eingangskennlinie beim Bipolartransistor beschrieben?

- [x] U – I – Kennlinie der BE - Diode
- [ ] U – I – Kennlinie der BC - Diode
- [ ] U – I – Kennlinie der CE - Strecke
- [ ] I_B – I_C – Kennlinie
- [ ] I_C – I_E – Kennlinie
- [ ] I_B – I_E – Kennlinie

Aufgabe 4.5

Welche Zusammenhänge werden durch die Transferkennlinie beim Bipolartransistor beschrieben?

- [ ] U – I – Kennlinie der BE - Diode
- [ ] U – I – Kennlinie der BC - Diode
- [ ] U – I – Kennlinie der CE - Strecke
- [x] I_B – I_C – Kennlinie
- [ ] I_C – I_E – Kennlinie
- [ ] I_B – I_E – Kennlinie

Aufgabe 4.6

Welche Zusammenhänge werden durch die Ausgangskennlinie beim Bipolartransistor beschrieben?

☐ U – I – Kennlinie der BE - Diode

☐ U – I – Kennlinie der BC - Diode

■ U – I – Kennlinie der CE - Strecke

☐ I_B – I_C – Kennlinie

☐ I_C – I_E – Kennlinie

☐ I_B – I_E – Kennlinie

Aufgabe 4.7

Für die Erregerwicklung einer elektrischen Maschine sind 2850 m Kupferdraht mit einem Durchmesser von 1,2 mm erforderlich. Bestimmen Sie:

a) den Widerstand der Wicklung bei $20\ °C$,
b) den Widerstand der Wicklung bei $75\ °C$,
c) den Widerstand der Wicklung bei $5\ °C$,
d) die Temperatur, bei der der Widerstand $58{,}5\ \Omega$ beträgt.

Bei $T = 20\ °C$ gilt:
$\alpha_{Cu} = 3{,}8 \cdot 10^{-3}/K$, $\rho_{Cu} = 0{,}0175\ \Omega \cdot mm^2/m$

Lösung:

a) Gegeben ist der spezifische Widerstand bei 20 °C: $\varrho_{20} = 0{,}0175\ \frac{\Omega mm^2}{m}$
Der Widerstand des Drahtes wird wie folgt berechnet:

$$R = \varrho_{20}\frac{L}{A} = \varrho_{20}\frac{L}{\frac{1}{4}\pi \cdot d^2} = 0{,}0175\frac{\Omega mm^2}{m} \cdot \frac{2850\ m}{\frac{1{,}2^2}{4}mm^2 \cdot \pi} = 44{,}1\Omega$$

b) Schritt 1: Zur Berechnung des Widerstandes bei 75 °C wird zunächst der spezifische Widerstand bei 75 °C berechnet:

$$\varrho_{75} = \varrho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta_{20})$$
$$= 0{,}0175 \frac{\Omega mm^2}{m} (1 + 0{,}0038\, K^{-1} \cdot 55\, K)$$
$$= 0{,}0212 \frac{\Omega mm^2}{m}$$

Schritt 2: Berechnung des Widerstandes bei 75 °C:

$$R_{75} = \varrho_{20} \frac{L}{A} = 0{,}0212 \frac{\Omega mm^2}{m} \cdot \frac{2850\, m}{\frac{1,2^2}{4} mm^2 \cdot \pi} = 53{,}3\, \Omega$$

ODER:

Da zwischen dem Widerstand R und dem spezifischen Widerstand ϱ ein linearer Zusammenhang besteht, lässt sich der Faktor $(1 + \alpha \cdot \Delta T)$ auch direkt auf den Widerstand R anwenden, sodass der Widerstand bei 75 °C wie folgt berechnet werden kann:

$$R_{75} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$
$$= 44{,}1\, \Omega \cdot (1 + 3{,}8 \cdot 10^{-3} K^{-1} \cdot 55\, K) = 53{,}3\, \Omega$$

- -

c) Für die Berechnung des Widerstands bei 5 °C werden die gleichen Rechenwege wie in b) verwendet:

$$\varrho_{5} = \varrho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta_{20})$$
$$= 0{,}0175 \frac{\Omega mm^2}{m} (1 - 0{,}0038\, K^{-1} \cdot 15\, K)$$
$$= 0{,}0165 \frac{\Omega mm^2}{m}$$
$$R_5 = 41{,}6\, \Omega$$

ODER:

$$R_5 = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 44{,}1\, \Omega \cdot (1 - 3{,}8 \cdot 10^{-3} K^{-1} \cdot 15\, K) = 41{,}6\, \Omega$$

d) Die wesentlichen Informationen für diese Aufgabenstellung sind:

$$\varrho = \varrho_{20}\,(1 + \alpha\Delta\vartheta_{20}) \qquad R_{20} = 44{,}1\, \Omega\ (Teil\ a)$$

Schritt 1: Die Formel $\varrho = \varrho_{20}\,(1 + \alpha\Delta\vartheta_{20})$ wird umgestellt und nach $\Delta\vartheta_{20}$ aufgelöst:

$$\Delta\vartheta_{20} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{\varrho}{\varrho_{20}} - 1\right)$$

Schritt 2: Da zwischen dem Widerstand R und dem spezifischen Widerstand ϱ ein linearer Zusammenhang besteht, kann der Faktor $\frac{\varrho}{\varrho_{20}}$ durch den Faktor $\frac{R}{R_{20}}$ ersetzt werden (d.h. diese beiden Faktoren sind identisch). Anschließend werden die Werte für α, $R = 58{,}5\ \Omega$ und R_{20} eingesetzt, um die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{20}$ zu berechnen. Um die Temperatur zu berechnen, bei der der Widerstand $58{,}5\ \Omega$ beträgt, ist lediglich noch die Referenztemperatur von 20 °C auf die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{20}$ aufzuaddieren:

$$\Delta\vartheta_{20} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{\varrho}{\varrho_{20}} - 1\right) = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{R}{R_{20}} - 1\right) = \frac{1}{0{,}0038\ K^{-1}} \cdot \left(\frac{58{,}5\ \Omega}{44{,}1\ \Omega} - 1\right)$$

$$= 85{,}9\ K \quad \Longrightarrow \quad \vartheta = 105{,}9\ °C$$

ODER:
Die Werte werden in die Beziehung $R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$ eingesetzt und die Gleichung nach ΔT aufgelöst. Durch Zuaddieren der Referenztemperatur von 20 °C erhält man somit ebenfalls die gesuchte Temperatur:

$$58{,}5\ \Omega = 44{,}1\ \Omega \cdot (1 + 0{,}0038\ K^{-1} \cdot \Delta T) = 44{,}1\ \Omega + 0{,}1676\ \Omega \cdot K^{-1} \cdot \Delta T$$

$$\curvearrowright 0{,}1676\ \Omega \cdot K^{-1} \cdot \Delta T = 14{,}4\ \Omega \ \curvearrowright \Delta T = 85{,}9\ K \ \Rightarrow T = 105{,}9\ °C$$

Aufgabe 4.8

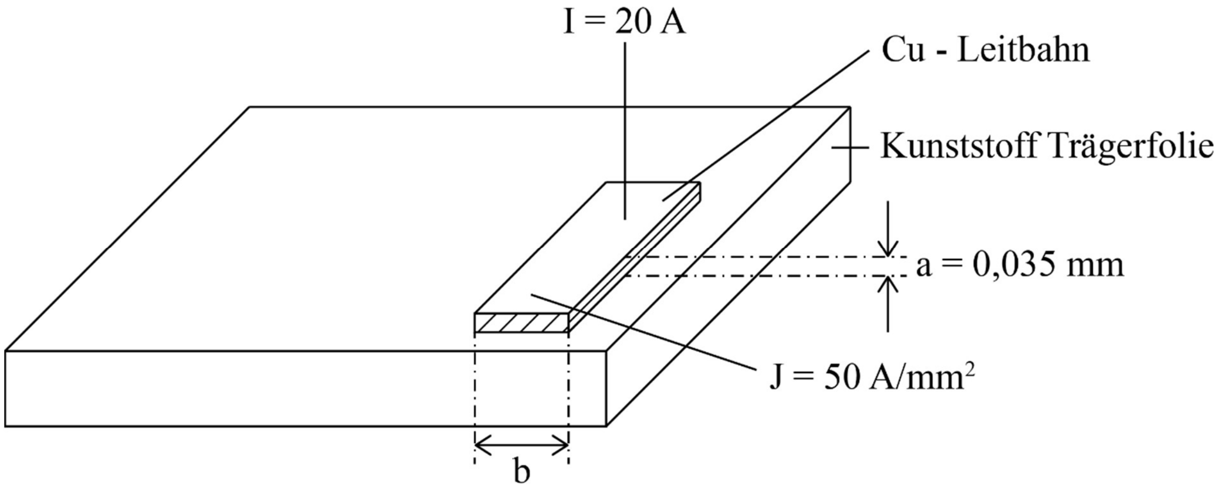
Die Stromdichte einer $35\ \mu m$ dicken Leiterbahn aus Kupfer soll $50\ A/mm^2$ nicht überschreiten. Die auf einer Kunststoff-Trägerfolie aufgebrachte Leiterbahn (flexible Leiterplatte) muss für eine Stromstärke von 20 A ausgelegt werden.

a) Ermitteln Sie die erforderliche Breite der Leiterbahn!
b) Berechnen Sie den Spannungsabfall pro Meter Leiterbahnlänge!

$\rho_{Cu} = 0{,}0175\ \Omega \cdot mm^2/m$

Lösung:

Zur Veranschaulichung betrachte man folgende Skizze:



a) Gegeben sind:

$$J = 50\ \frac{A}{mm^2}\ ;\quad I = 20\ A\ ;\quad a = 0{,}035\ mm$$

Die Stromdichte ist abhängig von der Stromstärke I und der Querschnittsfläche A. Diese setzt sich zusammen aus der Dicke a und der Breite b der Leiterbahn. Aus der Beziehung $J = \frac{I}{A}$ mit $A = a \cdot b$ lässt sich somit die erforderliche Breite der Leiterbahn berechnen:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{a\ \cdot b} \quad \Longrightarrow \quad b = \frac{I}{a\ \cdot J} = \frac{20\ A}{0{,}035\ mm\ \cdot 50\ A \cdot mm^{-2}} = 11{,}43\ mm$$

b) Zur Berechnung des Leistungsabfalls wird die Beziehung $U = R\ \cdot I$ verwendet.
Für R gilt:

$$R = \frac{\varrho\ \cdot L}{A}$$

Durch Einsetzen der Werte erhält man für den Leistungsabfall pro Meter Leiterbahnlänge:

$$U = \frac{\varrho\ \cdot L}{A} \cdot I = \frac{0{,}0175\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \cdot 1\ m}{0{,}035\ mm \cdot 11{,}43\ mm} \cdot 20\ A = 0{,}0437\ \Omega\ \cdot 20\ A = 0{,}875\ V$$

Aufgabe 4.9

Welche Widerstandsbauart hat den kleinsten thermischen Widerstand $\boldsymbol{R_{th}}$?

- ☐ Kohlenstoffkeramik-Komposit-Widerstand
- ☐ Metallschichtwiderstand
- ☐ Kohleschichtwiderstand
- ■ Drahtwiderstand

Lösung:

Aufgrund ihrer Bauform hat der thermische Widerstand R_{th} bei

- Kohlenstoffkeramik-Komposit-Widerständen einen Wert von etwa $R_{th} = 80\ K/W$
- Metallschichtwiderständen einen Wert von etwa $R_{th} = 90\ K/W$
- Kohleschichtwiderständen einen Wert von etwa $R_{th} = 27\ K/W$
- Drahtwiderständen (gewickelter Draht mit Kühlkörper) einen Wert von etwa $R_{th} = 0{,}3\ K/W$.

Somit ist der thermische Widerstand bei Drahtwiderständen am kleinsten.
Durch den veränderten Aufbau (gewickelter Draht auf Kühlkörper) kann der thermische Widerstand bei Drahtwiderständen bis auf einen Wert von $R_{th} = 0{,}3\ K/W$ sinken.