

Transistorschaltstufen

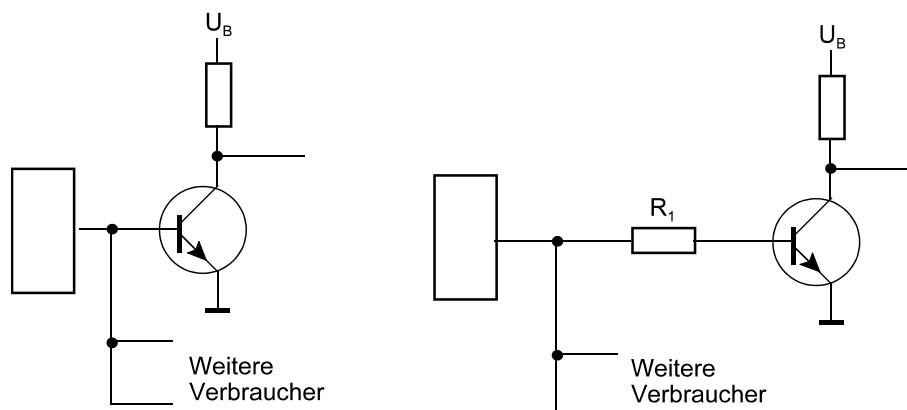
Faustregeln:

1. Transistor sicher aufgesteuert bei minimaler High-Eingangspegel $U_{E(1min)}$: Basisstrom = 1,5
• Wert gemäß Datenblatt/Kennlinie. Mit Speedup-Kondensator ggf. weniger (Versuch).
2. Basisspannung $U_{BE(1)}$ zum sicheren Aufsteuern (Kleinleistungstransistoren): wenigstens U_{BEsat} (typisch 0,7 V).
3. Transistor sicher gesperrt bei maximalem Low-Eingangspegel $U_{E(0max)}$. Basisstrom praktisch Null.
4. Basisspannung $U_{BE(0)}$ zum sicheren Sperren (Kleinleistungstransistoren): typisch 0,2 bis -0,5 V.

Schaltstufe mit Basisvorwiderstand

Die einfachste Lösung. Wozu ist der Basisvorwiderstand gut?

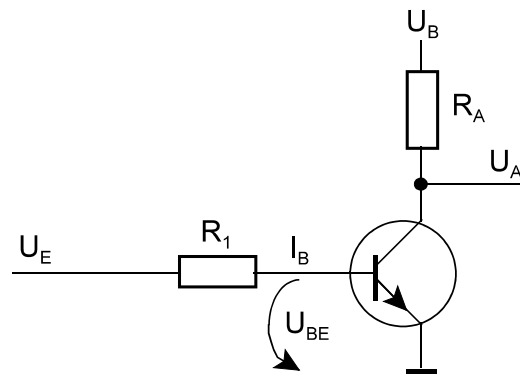
- Er begrenzt den Basisstrom.
- Er begrenzt die Basis-Emitter-Spannung.
- Er verhindert, daß der Pegel des ansteuernden Signals auf die Basis-Emitter-Sättigungsspannung heruntergezogen wird.



Basisvorwiderstand oder Direktanschluß?

Die Basis kann unter folgenden Bedingungen direkt an den Ausgang der jeweiligen Treiberstufe (z. B. eines Logikschaltkreises) angeschlossen werden:

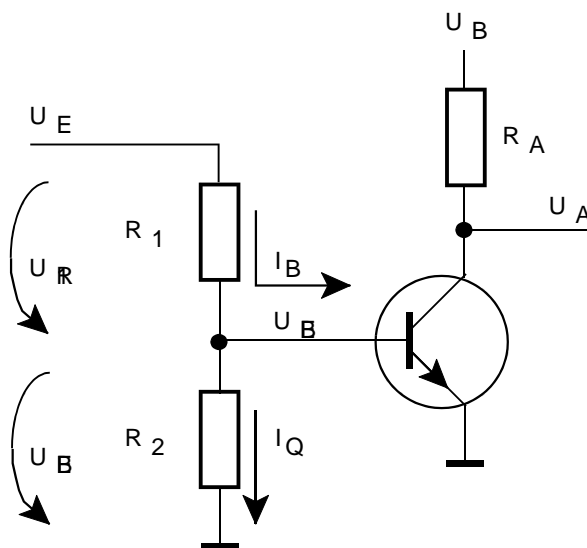
- Der Pegel im Aus-Zustand ist niedrig genug (z. B. $< 0,2$ V). Ggf. Anhebung des Massepegels (Ground Shift) beachten.
- Im Ein-Zustand werden die Grenzwerte des Transistors nicht überschritten (maximaler Basisstrom, maximale Emitter-Basis-Spannung). Typischerweise vom Innenwiderstand der Quelle abhängig.
- Es hängen keine weiteren Verbraucher an der Quelle. Wenn die Basis direkt angeschlossen ist, zieht sie die Quelle (den High-Pegel) auf etwa 0,7.. 1 V herunter. Hängen dann noch andere Einrichtungen dran, bekommen diese keinen richtigen High-Pegel mehr zu sehen.



$$U_{E(1)} \geq U_{BE} + R_1 I_B$$

$$U_{BE} \approx 0,7V ; \text{ also } U_{E(1)} \approx R_1 \cdot I_B ; R_1 \approx \frac{U_{E(1)}}{I_B}$$

Schaltstufe mit Spannungsteiler



Wenn eingeschaltet (1):

$$U_{E(1)} = U_{R1} + U_{BE(1)} = R_1(I_B + I_{Q(1)}) + U_{BE(1)}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B + I_{Q(1)}} ; I_{Q1} = \frac{U_{BE(1)}}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B + \frac{U_{BE(1)}}{R_2}} = R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)}}$$

Wenn ausgeschaltet (0):

$$U_{E(0)} = U_{R1} + U_{BE(0)} = R_1 I_{Q(0)} + U_{BE(0)}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{I_{Q(0)}}; I_{Q(0)} = \frac{U_{BE(0)}}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{\frac{U_{BE(0)}}{R_2}} = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)}}$$

Beides gleichgesetzt und nach R2 aufgelöst:

$$R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)}} = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)}}$$

$$(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) \frac{U_{BE(0)}}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}} = I_B R_2 + U_{BE(1)}$$

$$R_2 = \frac{1}{I_B} \left\{ \frac{U_{BE(0)}(U_{E(1)} - U_{BE(1)})}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}} - U_{BE(1)} \right\}$$

$$R_2 = \frac{U_{BE(0)}(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) - U_{BE(1)}(U_{E(0)} - U_{BE(0)})}{I_B(U_{E(0)} - U_{BE(0)})}$$

Bedingungen für Lösung:

$$U_{BE(0)}(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) > U_{BE(1)}(U_{E(0)} - U_{BE(0)}); U_{E(0)} > U_{BE(0)}$$

$$\frac{U_{BE(1)}}{U_{BE(0)}} < \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}$$

Typische Praxiswerte ($U_{BE(1)} = 0,7 \text{ V}$; $U_{BE(0)} = 0,2 \text{ V}$):

$$\frac{U_{E(1)} - 0,7\text{V}}{U_{E(0)} - 0,2\text{V}} > 3,5$$

Die Dimensionierung wird kritisch, wenn zwischen $U_{E(0)}$ und $U_{E(1)}$ nicht genügend Abstand liegt (verbotener Bereich). Man kann dann keinen Spannungsteiler mehr bauen, der beide Anforderungen (für Low- und High-Pegel) erfüllt. Im Fall des Falles ($U_{BE(0)}$ zu nahe an $U_{BE(1)}$):

Schwellwertschaltung vorordnen, die bei $U_E \leq U_{E(0)}$ die Basisspannung absenkt (Z-Diode, Dioden in Flußrichtung o. ä.), Comparator einsetzen oder negative Hilfsspannung einführen.

Berechnung von R_1 gemäß einer der obigen Formeln.

$$R_1 = R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)}}; R_1 = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)}}$$

Beispiel:

- $U_{E(1)} = 3,3 \text{ V}$
- $I_{B(1)} = 1 \text{ mA}$
- $U_{BE(1)} = 0,7 \text{ V}$
- $U_{E(0)} = 0,4 \text{ V}$
- $U_{BE(0)} = 0,2 \text{ V}$

Kontrolle:

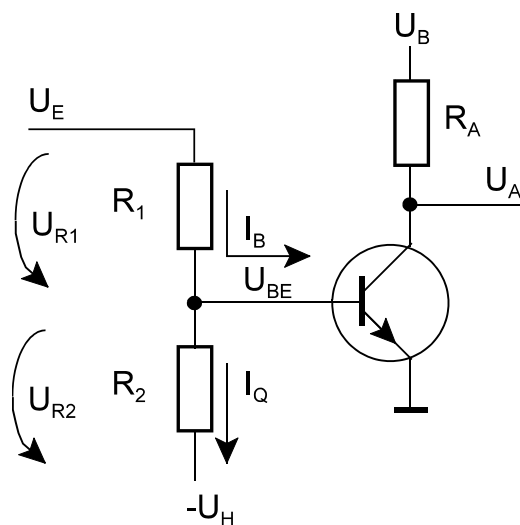
$$\frac{0,7 \text{ V}}{0,2 \text{ V}} < \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,4 \text{ V} - 0,2 \text{ V}}$$

(3,5 < 13; o.k.)

$$R_2 = \frac{1}{1 \text{ mA}} \left\{ \frac{0,2(3,3 - 0,7)}{0,4 - 0,2} - 0,7 \right\} = 1,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 1,9 \text{ k} \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ mA} \cdot 1,9 \text{ k} + 0,7 \text{ V}} = 1,9 \text{ k}\Omega; R_1 = 1,9 \text{ k} \frac{0,4 \text{ V} - 0,2 \text{ V}}{0,2 \text{ V}} = 1,9 \text{ k}\Omega$$

Ansteuerung über Spannungsteiler an negativer Hilfsspannung



Alle Spannungen vorzeichengerecht eingeben.

Wenn eingeschaltet (1):

$$U_{E(1)} = U_{R1} + U_{R2} = R_1(I_B + I_{Q(1)}) + U_{BE(1)} - U_H$$

$$R_1 = \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B + I_{Q(1)}}; I_{Q(1)} = \frac{U_{BE(1)} - U_H}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B + \frac{U_{BE(1)}}{R_2}} = R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)} - U_H}$$

Wenn ausgeschaltet (0):

$$U_{E(0)} = U_{R1} + U_{R2} = R_1 I_{Q(0)} + U_{BE(0)} - U_H$$

$$R_1 = \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{I_{Q(0)}}; I_{Q(0)} = \frac{U_{BE(0)} - U_H}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{\frac{U_{BE(0)} - U_H}{R_2}} = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)} - U_H}$$

Beides gleichgesetzt und nach R2 aufgelöst:

$$R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)} - U_H} = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)} - U_H}$$

$$(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) \frac{U_{BE(0)} - U_H}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}} = I_B R_2 + U_{BE(1)} - U_H$$

$$R_2 = \frac{1}{I_B} \left\{ \frac{(U_{BE(0)} - U_H)(U_{E(1)} - U_{BE(1)})}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}} - U_{BE(1)} + U_H \right\}$$

$$R_2 = \frac{(U_{BE(0)} - U_H)(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) - (U_{BE(1)} - U_H)(U_{E(0)} - U_{BE(0)})}{I_B(U_{E(0)} - U_{BE(0)})}$$

Bedingungen für Lösung:

$$(U_{BE(0)} - U_H)(U_{E(1)} - U_{BE(1)}) > (U_{BE(1)} - U_H)(U_{E(0)} - U_{BE(0)}); U_{E(0)} > U_{BE(0)}$$

$$\frac{U_{BE(1)} - U_H}{U_{BE(0)} - U_H} < \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}$$

Infolge der negativen Hilfsspannung U_H ist die Bedingung eher zu erfüllen, da der Nenner der linken Seite verhältnismäßig stärker zunimmt als der Zähler (vgl. das folgende Beispiel: statt $0,7 : 0,2 = 3,5$ $5,7 : 4,8 = 1,18$). Je größer der Betrag der Hilfsspannung U_H , desto mehr nähert sich die linke Seite dem Wert 1 ($U_{BE(1)}$, $U_{BE(0)}$ vernachlässigbar).

Berechnung von R_1 gemäß einer der obigen Formeln.

$$R_1 = R_2 \frac{U_{E(1)} - U_{BE(1)}}{I_B R_2 + U_{BE(1)} - U_H}; R_1 = R_2 \frac{U_{E(0)} - U_{BE(0)}}{U_{BE(0)} - U_H}$$

Beispiel:

- $U_{E1} = 2 \text{ V}$
- $I_{B1} = 0,7 \text{ mA}$
- $U_{BE1} = 0,7 \text{ V}$
- $U_{E0} = 0,8 \text{ V}$
- $U_{BE0} = -0,2 \text{ V}$
- $U_H = -5 \text{ V}$

Kontrolle:

$$\frac{0,7\text{V} + 5\text{V}}{-0,2\text{V} + 5\text{V}} < \frac{2\text{V} - 0,7\text{V}}{0,8\text{V} + 0,2\text{V}}$$

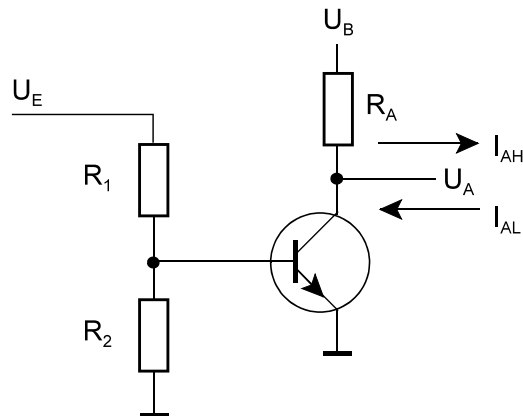
(1,18 < 1,3; o.k.)

$$R_2 = \frac{1}{0,7\text{mA}} \left\{ \frac{(-0,2\text{V} + 5\text{V})(2\text{V} - 0,7\text{V})}{0,8\text{V} + 0,2\text{V}} - 0,7\text{V} - 5\text{V} \right\} = 770 \Omega$$

$$R_1 = 770\Omega \frac{2\text{V} - 0,7\text{V}}{0,7\text{mA} \cdot 770\Omega + 0,7\text{V} + 5\text{V}} = 160 \Omega; R_1 = 770\Omega \frac{0,8\text{V} + 0,2\text{V}}{-0,2\text{V} + 5\text{V}} = 160 \Omega$$

Eingangswiderstand des Transistors:

$$R_{BE} = \frac{U_{BE}}{I_B} = \frac{\beta U_{BE}}{I_{Cmax}}; I_B \approx \frac{I_{Cmax}}{\beta}$$

Der Kollektorkreis:

R_A ist entweder der Arbeitswiderstand im eigentlichen Sinne oder die zu schaltende Last. I_{AH} , I_{AL} sind Ströme, die ggf. zu anderen Einrichtungen fließen oder von anderen Einrichtungen eingespeist werden (externe Lastströme).

Arbeitswiderstand R_A :

$$R_A \geq \frac{U_{Bmax}}{I_{Cmax} - I_{ALmax}}; \quad R_A \leq \frac{U_{Bmin} - U_{Hmin}}{I_{AHmax}}$$

Kollektorstrom I_C (Kennwert zum Aussuchen des Transistors):

$$I_C > I_{ALmax} + \frac{U_{Bmax}}{R_A}$$

Schnelle Schaltstufen

Anwendungsbeispiel: schnelle Pegelwandler

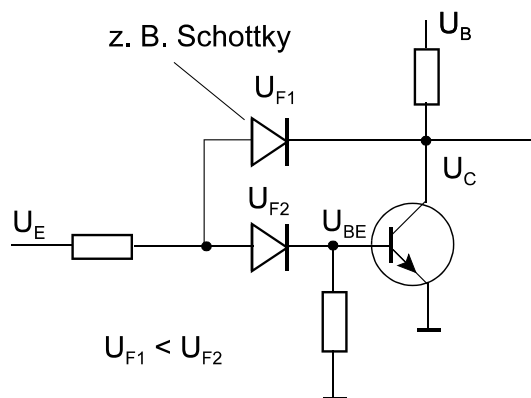
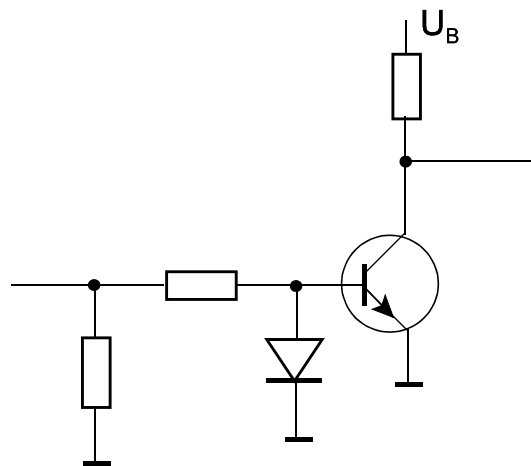
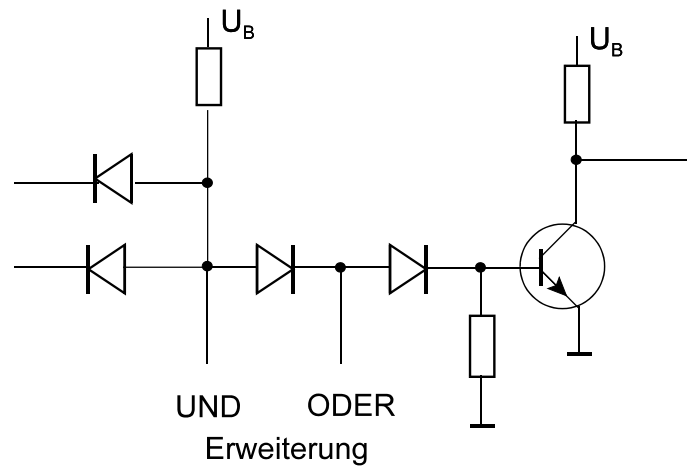
Transistor nicht allzu sehr übersteuern

1. Speedup-Kondensator (Richtwert für Versuch):

$$0,7 R_1 C < t_{pmin}; \quad C < \frac{t_{pmin}}{0,7 R_1}$$

2. Basisspannung nicht zu hoch werden lassen (DTL).

3. Basisspannung klammern (Baker Clamp).



Klammerschaltung nach Baker.

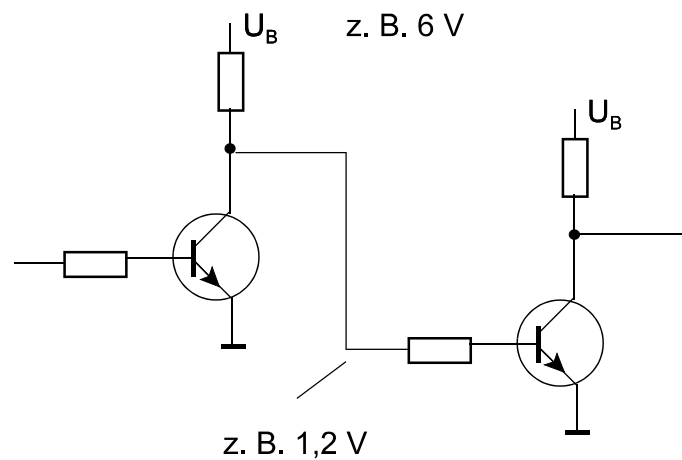
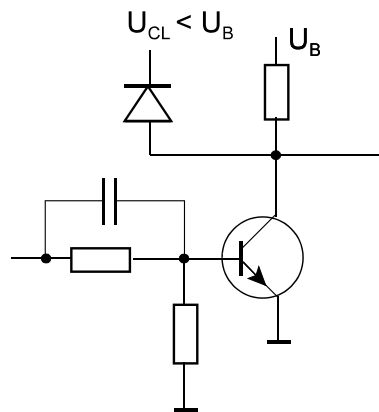
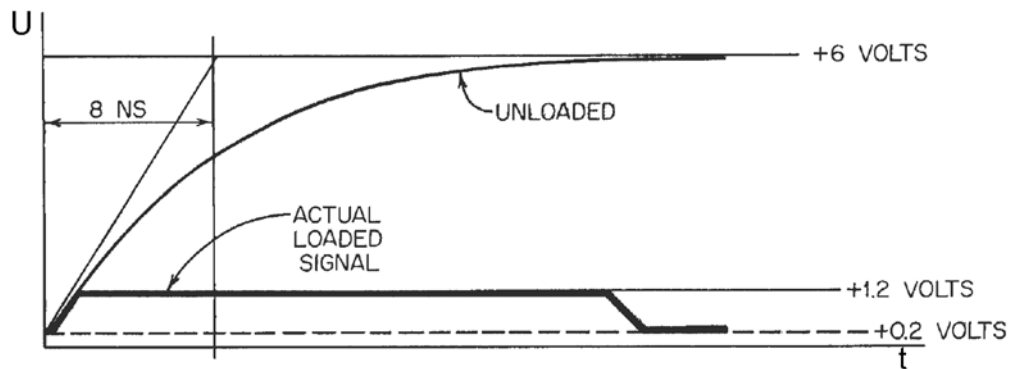
$$U_C = U_E - U_{F1}$$

$$U_{BE} = U_E - U_{F2}$$

Wenn $U_{F2} > U_{F1}$, dann $U_{BE} < U_C$. Somit kann der Transistor nicht in die Sättigung gelangen.

Ausgangseitigen Signalhub verringern

1. Ausgangsspannung klammern.
2. So belasten, daß Ausgangsspannung nicht allzu hoch wird (Direct Coupled Transistor Logic DCLT (z. B. Supercomputer CDC 6600)).

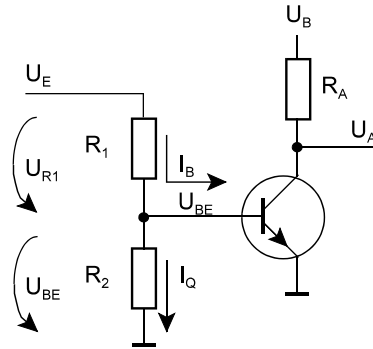


Basisstrom 1 mA. Ca. 0,5... 0,6 V über Basiswiderstand. Also rund 560...680R.

4,8 V bei 1 mA. Kollektorwiderstand also rund 4k7.

Transistoren mit eingebautem Basisspannungsteiler

Beispiele: die sog. digitalen Transistoren von Infineon und die Bias Resistor Transistors (BRTs) von ON Semiconductor. Der Spannungsteiler R1, R2 ist vorgegeben (s. Katalog/Datenblatt). Für welche Signalpegel ist er geeignet?



Wenn eingeschaltet (1):

$$U_{E(1)} = U_{R1} + U_{BE(1)} = R_1(I_B + I_{Q(1)}) + U_{BE(1)}; I_{Q1} = \frac{U_{BE(1)}}{R_2}$$

$$U_{E(1)} \geq R_1\left(I_B + \frac{U_{BE(1)}}{R_2}\right) + U_{BE(1)} = \frac{I_B R_1 R_2 + U_{BE(1)}(R_1 + R_2)}{R_2}$$

Wenn ausgeschaltet (0):

$$U_{E(0)} = U_{R1} + U_{BE(0)} = R_1 I_{Q(0)} + U_{BE(0)}; I_{Q(0)} = \frac{U_{BE(0)}}{R_2}$$

$$U_{E(0)} \leq R_1 \frac{U_{BE(0)}}{R_2} + U_{BE(0)} = \frac{U_{BE(0)}(R_1 + R_2)}{R_2}$$

Typische Werte:

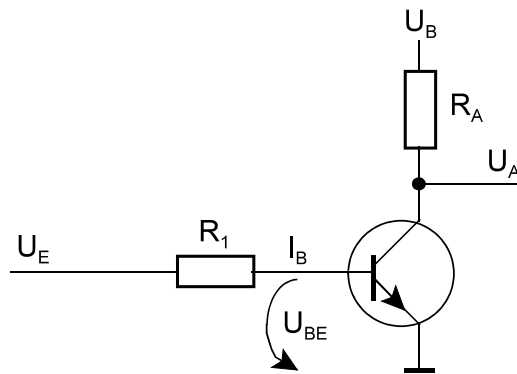
$$U_{E(1)} \geq \frac{1\text{mA} \cdot R_1 R_2 + 0,7\text{V} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2}$$

$$U_{E(0)} \leq \frac{0,2\text{V} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2}$$

Beispiele:

R1	R2	U_{E(1)min}	U_{E(0)max}
1k	1k	2,4 V	0,4 V
1k	10k	1,8 V	0,22 V
2k2	2k2	3,6 V	0,4 V
2k2	10k	3 V	0,25 V
2k2	47k	3 V	0,21 V
4k7	4k7	6,1 V	0,4 V
4k7	10k	5,8 V	0,3 V
4k7	47k	5,5 V	0,22 V
10k	10k	12 V	0,4 V
10k	47k	11 V	0,25 V
22k	22k	24 V	0,4 V
22k	47k	24 V	0,3 V
47k	22k	50 V	0,63 V
47k	47k	48V	0,4 V

Weitere Typen haben keinen Spannungsteiler, sondern lediglich einen Basisvorwiderstand.



$$U_{E(1)} \geq U_{BE} + R_1 I_B$$

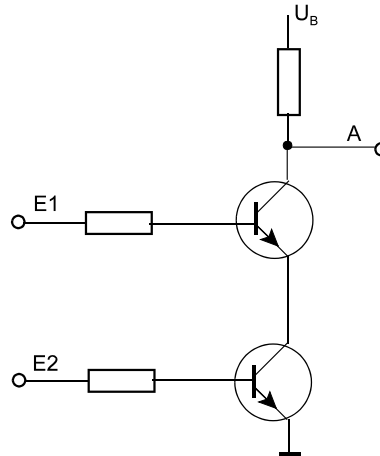
Beispiele ($U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $I_B = 1 \text{ mA}$)

R1	U_{E(1)min}	R1	U_{E(1)min}
1k	1,7 V	22k	23 V
10k	11 V	47k	48 V

Gatterschaltungen mit Transistoren

NAND:

Reihenschaltung von Transistoren.

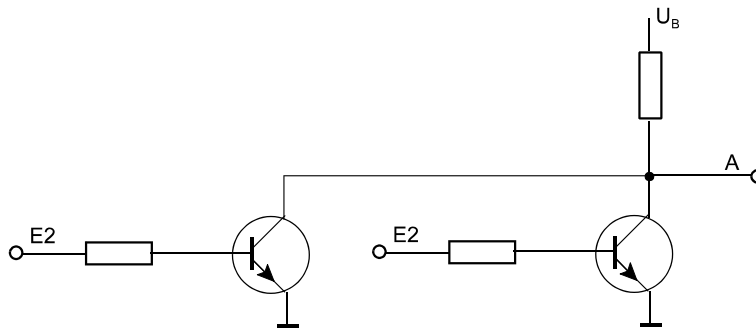


$$A = \overline{E1 \cdot E2}$$

Problem: Je mehr Transistoren in Reihe, desto höher der ausgangsseitige Low-Pegel ($n \cdot U_{CEsat}$)

NOR:

Parallelschaltung von Transistoren

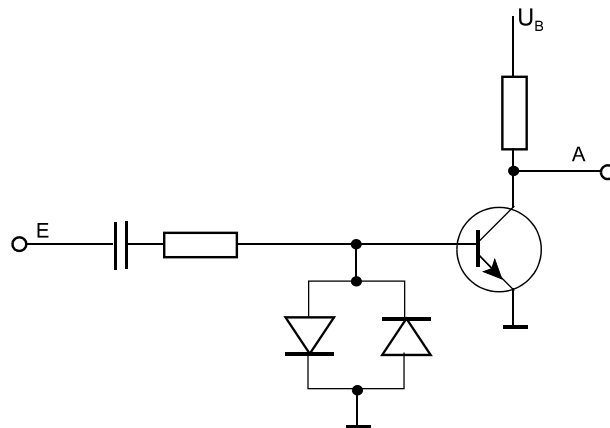


$$A = \overline{E1 \vee E2}$$

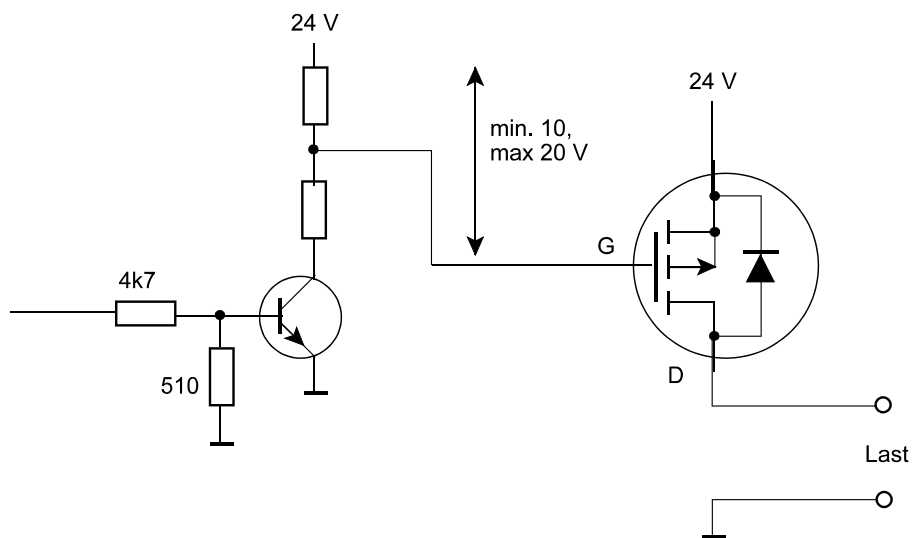
Da die Emittter alle Transistoren mit Masse verbunden sind, hängt der ausgangsseitige Low-Pegel nicht von der Anzahl der Eingänge ab.

Begrenzer mit Transistorstufe:

Wandelt x-beliebige Signalverläufe in Impulse.



Aufgabe: Relaisreiber für High Side Drive mit P-Kanal-FET



Netzspannung 210...250 V

Steuertransformator: 10 % Spannungszunahme (Regulation)

Ausgangsspannung nach Gleichrichtung ist maximal = Spitzenspannung.

Annahme: 21 V bis 35 V (250 V Netz + 2,5 V Spannungszunahme) * 1,4.

Bei 21 V mind. 10 V Abfall.

Bei 35 V max. 20 V Abfall.

Strom: gemäß Gateladung.

Datenblatt: IRF 9620.

Typische Logikpegel 24 V:

	min.	typ.	max.
Low-Pegel	- 0,5 V		1,5 V
Schwellspannung		6,0 V	
High-Pegel	15 V		35 V

Dimensionierung von Schaltstufen

So ansteuern, dass der Lastkreis richtig durchschaltet – und nicht nur irgendwie Strom durchfließt, der die Last notfalls zum Ansprechen bringt.

Beim Bipolartransistor und IGBT: U_{CEsat} .

Beim MOSFET: Minimaler R_{DSon} .

Der Bipolartransistor muß genügend Basisstrom bekommen, der IGBT und MOSFET genügend Gatespannung.

Stufen mit Bipolartransistor dimensionieren für sicheres Schalten bei maximaler Last und geringster Stromverstärkung.

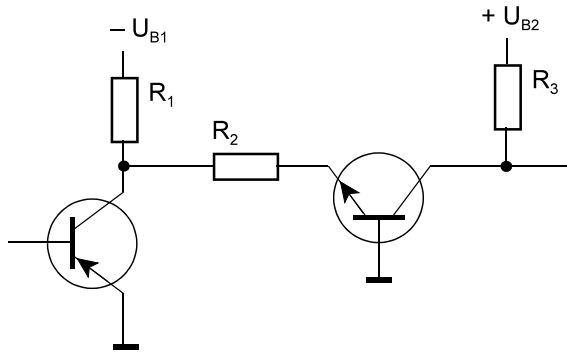
Der Betriebsfall minimale Last und maximale Stromverstärkung ergibt dann eine starke Übersteuerung. Manchmal kann man damit leben. Sonst: Klammerung (damit die Übersteuerung nicht vorkommt) oder Hilfsstromweg (damit beim Ausschalten die Ladungsträger aus der Basiszone abfließen können).

Alternative: FET auch in der Vorstufe. Ansteuerung muß genügend hohen Pegel bringen.

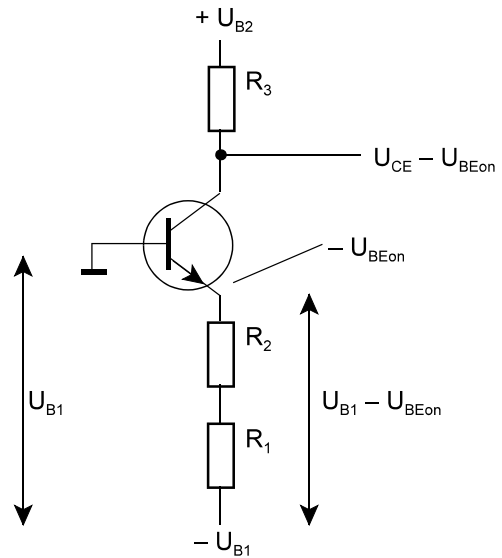
Pegelwandlung

Wandlung negativ => positiv

Transistor in Basisschaltung

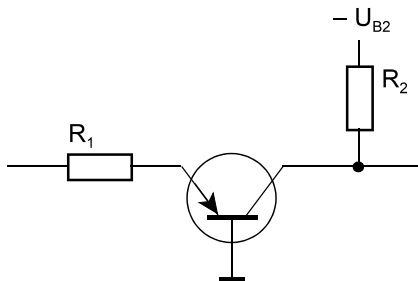


Ersatzschaltung bei Low-Pegel

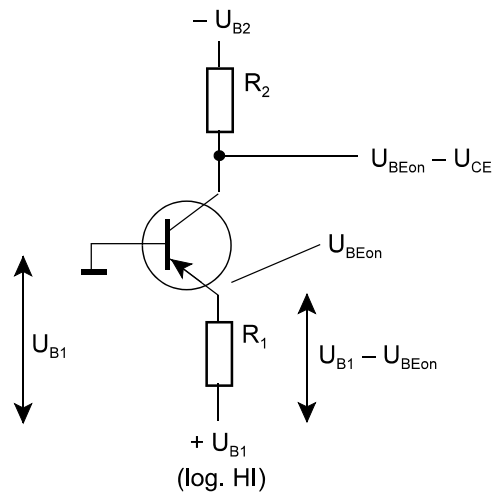


Wandlung positiv => negativ

Transistor in Basisschaltung



Ersatzschaltung bei HighPegel



Bidirektionale Wandlung zwischen verschiedenen positiven Signalpegeln

