

Der Transistor

Die amerikanischen Forscher John Bardeen (1908-1992), Walter H. Brattain (1902-1987) und William B. Shockley (1910-1989) entwickelten im Jahre 1948 in den Bell-Laboratories den Transistor. 1956 erhielten sie dafür den Nobelpreis. Der Transistor ist heute das meist hergestellte technische Bauteil. Ein Intel Core i5 (Ivy Bridge) enthält 1.4 Milliarden Transistoren. In Abb. 1 sieht man ein Nachbau des ersten Transistors. Bipolare Transistoren bestehen (meistens) aus Silizium. In Einzel-fällen gibt es den Transistor auch aus Germanium. Jeder bipolare Transistor besteht aus drei dünnen Halbleiterschichten, welche übereinander gelegen sind. Die mittlere Schicht ist sehr dünn im Vergleich zu den beiden anderen Schichten. Die einzelnen Schichten sind mit metallischen Anschlüssen versehen, welche nach aussen führen.

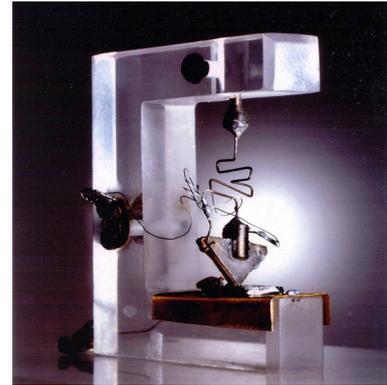


Abb. 1: Erster Transistor

Je nach Schichtaufbau spricht man von einem NPN- oder PNP-Transistor. Das Schaltzeichen mit den beiden Dioden wird gerne verwendet um den Prinzipaufbau des Transistors zu erklären. In der Realität stimmt dieses Bild nicht ganz. Das veränderte Verhalten liegt an der sehr dünnen Basis-Schicht.

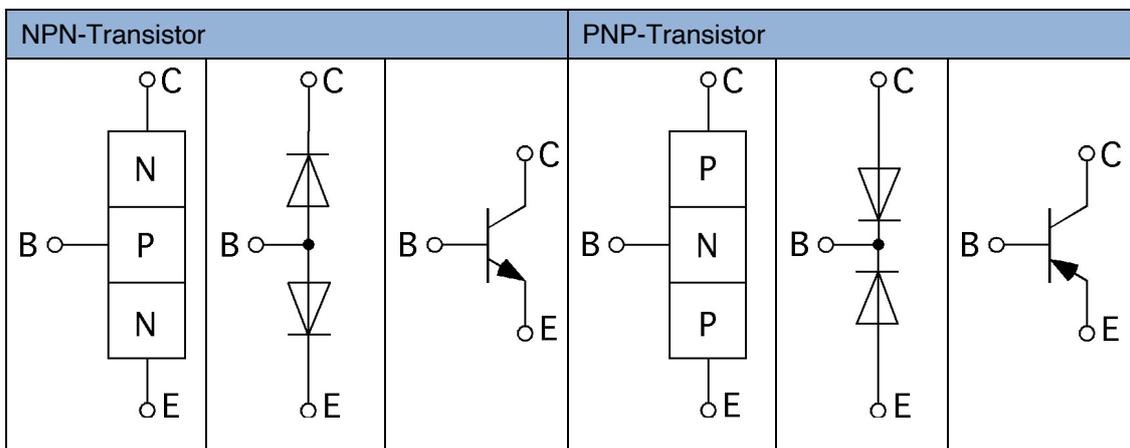


Abb. 2: NPN-Transistor

Abb. 3: PNP-Transistor

Die beiden Transistor-Arten sind sehr ähnlich. Sie werden auch häufig zusammen in einer Schaltung verwendet (z.B. HiFi-Endstufe). Da wir den NPN-Transistor viel öfter gebrauchen werden, soll hier vor allem dieser Typ erklärt werden. Für den PNP-Transistor gilt dasselbe, ausser dass dort die verwendeten Spannungen negativ sind.

Der NPN-Transistor:

Wird über einen Widerstand eine positive Spannung ($>0.7V$) an die Basis angelegt, so leitet die Diode zwischen Basis und Emitter. Es fliesst ein kleiner Strom I_B von der Basis zum Emitter. Die Emitterschicht ist viel stärker dotiert als die Basisschicht. Die Basisschicht ist sehr dünn (einige μm). Somit können nur ein geringer Teil der Elektronen mit den Löchern in der Basis rekombinieren. Die meisten Ladungsträger werden in den Collector getrieben. Es kann ein Strom I_{CE} zwischen Collector und dem Emitter fließen. Der Strom I_{CE} ist proportional zum Basisstrom I_B .

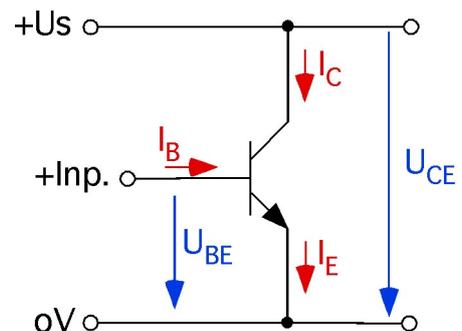
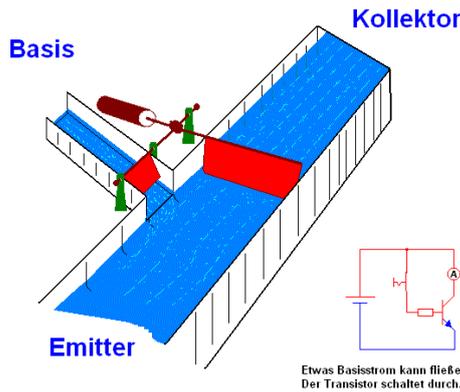


Abb. 4: Spannungen und Ströme



Der Kollektorstrom I_C ist um ein Vielfaches (20...10'000) grösser als der Basisstrom I_B . Der Transistor ist ein Stromverstärker.

Die Stromverstärkung $\beta = \frac{I_C}{I_B}$.

Ist die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} kleiner als der Schwellwert von ca. 0.4 V, dann sperrt der Transistor. Es fliesst ein verschwinden kleiner Leckstrom I_B . Ab einer Spannung U_{BE} von 0.6 V fliesst ein Strom I_B . Der Transistor wird leitend und es kann ein grosser Strom I_C fließen.

Abb. 5: Illustration Transistor

$I_E = I_C + I_B$;
da I_B sehr klein ist: $I_E = I_C$

Ein kleiner Basisstrom I_B steuert einen grossen Emitterstrom I_E .

Die Transistoren werden in folgenden Anwendungen gebraucht:

- Transistor als Schalter
- Transistor als Pegelwandler
- Transistor als Wechselspannungsverstärker
- Transistor als Konstantstromquelle

NPN-Transistor als Schalter:

In dieser Anwendung wird ein Transistor als Schalter gebraucht. Ein kleiner Strom I_B schaltet ein grosser Strom I_E , z.B. ein Relay. Wichtig ist immer, dass die beiden Ströme I_B und I_E mit Widerständen begrenzt sind. Für das sichere Schalten, wird der Transistor in der Sättigung betrieben. Der Übersteuerungsfaktor \ddot{u} ist in der Praxis zwischen 2...5. Wichtig ist beim Schalten eines Relay eine Freilaufdiode um den Transistor zu schützen.

$$I_B = \ddot{u} \cdot \frac{I_C}{\beta_{\min}}$$

$$R_1 = \frac{(U_{Inp} - 0.7) \cdot \beta_{\min}}{\ddot{u} \cdot I_C}$$

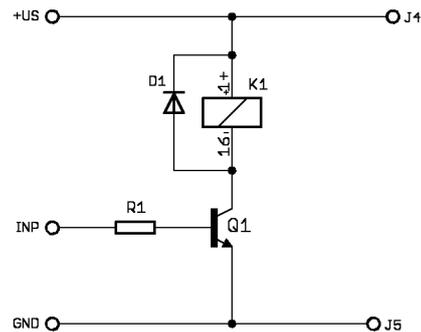


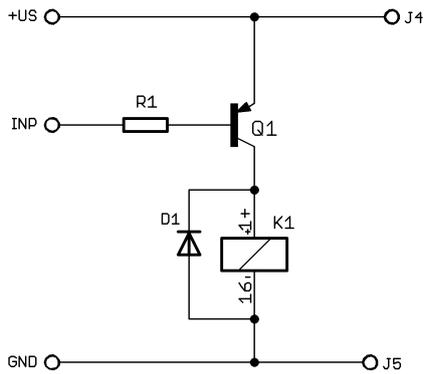
Abb. 6: Transistor als Schalter

Falls der Eingang (Inp.) nicht immer auf einem definierten Potential liegt, kann man von der Basis auf GND ein Widerstand R_2 legen. Mit diesem Widerstand ist die Basis immer auf einem definierten Potential.

Der Strom $I_{R2} = 0.1 \cdot I_B$

Der Transistor als Schalter hat zwei Zustände. Er leitet oder er sperrt.

PNP-Transistor als Schalter:



Der PNP-Transistor funktioniert ganz ähnlich wie der NPN. Beim PNP schaltet der Transistor, sofern die Spannung zwischen +Us und Inp. (Spannung U_{EB}) grösser 0.7 V beträgt. Mit dem PNP-Transistor kann man sehr einfach ein Signal invertieren. Soll das Relay eingeschaltet werden, falls an der Basis ein 0V-Signal anliegt, dann wird ein PNP-Transistor genommen.

Abb. 7: PNP als Schalter

Der PNP-Transistor invertiert das Eingangssignal.

Maximale Kenndaten des Transistors:

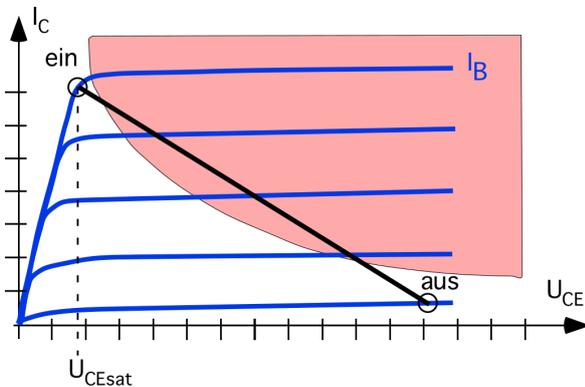
Die Ströme I_B und I_E müssen immer durch Widerstände begrenzt werden. U_{CE} und U_{BE} haben ebenfalls maximale Nennwerte. Diese Werte findet man im jeweiligen Datasheet. Für die Transistoren, welche im ELL an Lager sind, ist im Anhang eine Tabelle mit den Kennwerten. Eine gute Internetseite für diverse Datenblätter: <http://alldatasheet.com/>. Die Verlustleistung P_V eines Transistors wird wie folgt berechnet:

$$P_V = (I_B * U_{BE}) + (U_{CE} * I_C) = (I_B * 0.7) + (0.2 * I_C)$$

U_{CE} ist typischerweise 0.2V, sofern der Transistor in der Sättigung ist. Da I_B sehr klein ist, kann man den ersten Term weglassen. Somit berechnet sich die

$$P_V = (U_{CE} * I_C) = (0.2 * I_C)$$

Die maximale Verlustleistung P_V darf **nie** überschritten werden. Je nach Verlustleistung muss der Transistor mit einem Kühlkörper gekühlt werden. Für die Berechnung des Kühlkörpers lese in der Doku „Der Kühlkörper“ nach.



Schaltet der Transistor, so wechselt sein Arbeitspunkt im Kennlinienfeld. Kurzzeitig durchquert er den verbotenen, roten Bereich P_{Vmax} . Bräuchte der Transistor zulange, so würde er zerstört.

Abb. 8: Arbeitspunkt beim Schalten

NPN-Transistor als Verstärker:

Der Transistor als Verstärker soll hier nur ganz kurz erwähnt werden. Später lernen wir den Operationsverstärker kennen. Möchte man Wechselfspannungssignale (z.B. Für ein HiFi-Endverstärker) verstärken, so muss man den Arbeitspunkt verschieben, so dass die Wechselfspannungssignale in jedem Fall verstärkt werden. Der Arbeitspunkt wird mit den Widerständen R1 und R2 festgelegt. Der sogenannte Querstrom I_Q durch R2 sollte etwa $3 \cdot 10 \cdot I_B$ betragen.

$$\text{Der Basisstrom } I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

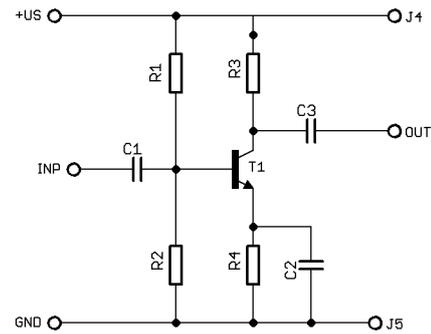


Abb. 9: Wechselfspannungsverstärker

Der Ausgang soll in der Hälfte der Versorgungsspannung liegen. Damit ist eine möglichst grosse Aussteuerbarkeit gegeben.

$$U_{R3} = U_C = 1/2 \cdot U_S$$

$$U_{R4} = U_E = \text{ca. } 1\text{V. } I_E = I_C = 1\text{mA.}$$

$$R_3 = \frac{0.5(U_S - U_E)}{I_E} = \frac{0.5(15 - 1)}{1\text{mA}} = \text{ca. } 6.8\text{k}\Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1\text{mA}}{200} = 5\mu\text{A}$$

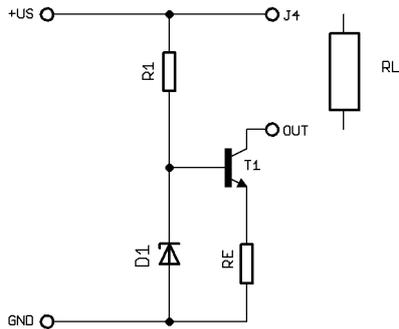
$$I_Q = (3 \cdot 10) \cdot I_B = 40\mu\text{A}$$

$$R_2 = \frac{U_E + 0.7}{I_Q} = \frac{1.7}{40\mu\text{A}} = \text{ca. } 10\text{k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_S - (U_E + 0.7)}{I_Q} = \frac{15 - 1.7}{40\mu\text{A}} = \text{ca. } 82\text{k}\Omega$$

Der Kondensator C1 koppelt die Gleichspannung vom Eingang ab. Er bildet mit R2 ein Hochpass-Filter. Je nach Grenzfrequenz dimensioniert man den Kondensator. Da für uns der Transistor als Wechselfspannungsverstärker nicht so wichtig ist, sei für eine detaillierte Beschreibung auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Der Transistor als Konstantstromquelle:



Für eine einfache Konstantstromquelle eignet sich der Transistor hervorragend. Zusätzlich braucht man noch eine Zener-Diode als stabile Referenzspannung.

Die Spannung $U_E = U_Z - 0.6 = 3.3V - 0.6V = 2.7V$

$$\text{Strom } I_{RL} = I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2.7}{270} = 10mA$$

Abb. 10: Konstantstromquelle

Der Laststrom I_L ist nur von U_E und R_E abhängig.

$$R_1 = \frac{U_s - U_z}{I_z} = \frac{15 - 3.3}{10mA} = 1.2k\Omega$$

Als R_L können LED, Pt100 oder ähnliches sein. Es wird ein konstanter Strom von 10mA fließen.

Der Phototransistor:

Der PN-Übergang an der Basis-Kollektor-Schicht ist beim Phototransistor optisch zugänglich. Durch das Licht kann ein Photostrom fließen, welcher proportional zur Lichtintensität ist. Der Photostrom ist von der Wellenlänge abhängig. Die maximale Empfindlichkeit liegt bei Si-Phototransistoren bei ca. 850 nm.

Referenzen & Links:

Elektrotechnik für berufsbildende Schulen (Horst Spanneberg, Günther Franz)

Elektrotechnik Grundbildung (Klaus Tkotz)

Grundkenntnisse Elektrotechnik (Dieter Baumann, Klaus Beuth)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Transistor>

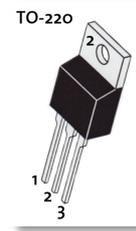
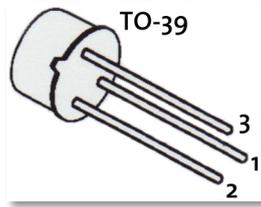
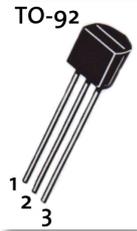
<http://www.elektronik-kompodium.de/>

Aufgaben:

1. Eine Notleuchte soll angehen, sobald am Eingang keine Spannung (0V) ist. Die Notleuchte benötigt 100mA. Zeichne und dimensioniere eine passende Schaltung.
2. Über einen digitalen Output (5V) möchtest du ein Relay schalten. Zeichne und dimensioniere eine mögliche Schaltung.
3. Für ein Pt100-Sensor benötigst du einen konstanten Strom von 1mA. Wie würdest du dies machen? Zeichne und dimensioniere deine Idee.
4. Wie berechnest du die maximale Verlustleistung P_V an einem Transistor?
5. Welche maximalen Kenndaten musst du bei einem Transistor beachten?
6. Muss ein Transistor gekühlt werden und falls ja ab wann?
7. Du möchtest ein Pegelwandler herstellen. Folgende Pegel soll die Schaltung erzeugen:

Input	Output
0V	+12V
+5V	0V

8. Was ist der Unterschied zwischen einem NPN- und PNP-Transistor?
9. Nenne 2 universelle NPN-Transistoren und ihre wichtigsten Kennwerte?
10. Was ist der Arbeitspunkt?
11. Wie sieht ein TO-220 Gehäuse aus?
12. Was ist die Stromverstärkung B und wie kann man sie messen?
13. Du sollst mit einem dünnen Draht eine Alarmanlage bauen. Der Draht wird hinter der Tür befestigt. Reisst er, soll eine Sirene (max. 1A) losheulen. Wie sieht deine Schaltung aus?
14. An deinem einstellbaren PowerSupply (5-15V) möchtest du eine LED, welche dir den Betrieb der Ausgangsspannung anzeigt. Die LED soll bei 5V wie auch bei 15 V gleich hell leuchten. Was machst du?
15. Was ist ein Phototransistor?
16. Was bedeutet BD237?

Anhang: Kennwerte der Transistoren im PLL


Bezeichnung	Typ	Gehäuse	h_{FE}	I_C [A]	U_{CE} [V]	P_V [W]	Anschluss			Preis
							1	2	3	
2N3904	N	TO-92	100...300	0.1	40	0.5	e	b	c	0.3
2N3906	P	TO-92	100...300	-0.1	-40	0.5	e	b	c	0.3
BC337-25	N	TO-92	160...250	0.8	45	0.625	c	b	e	0.2
BC327-25	P	TO-92	160...250	-0.8	-45	0.625	c	b	e	0.3
BC-141-16	N	TO-39	30...250	1	60	0.65	b	c	e	0.9
BC-161-16	P	TO-39	30...250	-1	-60	0.65	b	c	e	1.0
BD237	N	TO-126	40..250	2	80	25	e	c	b	1.8
BD238	P	TO-126	40..250	-2	-80	25	e	c	b	1.2
2N5191	N	TO-126	25..100	4	60	40	e	b	c	1.0
2N5194	P	TO-126	25..100	-4	-60	40	e	b	c	1.5
BD899A	N	TO-220	>750	8	80	70	b	c	e	1.6
BD900A	P	TO-220	>750	-8	-80	70	b	c	e	1.6
BD743B	N	TO-220	25	15	90	90	b	c	e	
BD744B	P	TO-220	25	-15	-90	90	b	c	e	
BD182	N	TO-220	20	15	60	150				2.0