

10.8.5.2 Transistoren

Bei Transistoren ist zwischen zwei Kristalltypen (Ge, Si) und zwei Dotierungen (PNP, NPN) zu unterscheiden. Die Hauptunterschiede*, stark vereinfacht: NPN-Transistoren benötigen (in Emitterschaltung) eine positive Betriebsspannung, PNP-Transistoren eine negative; die typische Basis-Emitter-Spannung ist beim Ge-Transistor ca. 0.1 V, beim Si-Transistor ca. 0.6 V. Es gibt eine unüberschaubare Vielfalt unterschiedlichster Transistoren, in der man gleichwohl erstaunlich viele kompatible Äquivalenztypen findet. PNP vs. NPN ist aber inkompatibel, ebenso Ge vs. Si – auch wenn das im Einzelfall funktionieren mag. Ein OC44 kann problemlos gegen einen AC151 getauscht werden, ein AC187 ist aber inkompatibel zum AC188. Bei nicht allzu alten europäischen Transistoren spezifiziert der erste Buchstabe die Kristallart: A für Germanium, B für Silizium. Der zweite Buchstabe kennzeichnet die Anwendung: C für NF-Vorstufen, D für NF-Endstufen, F für HF-Stufen, S für Schalter. Die amerikanischen (2N) und japanischen (2S) Bezeichnungen ermöglichen keine derartige Trennung.

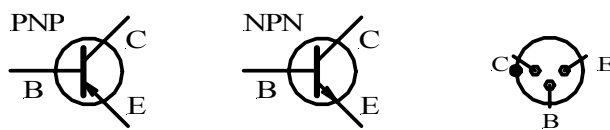


Abb. 10.8.28: Transistor-Schaltbilder, Anschlüsse.

In **Abb. 10.8.28** sind die Schaltbilder dargestellt, sowie die (von unten gesehene) Anschlussbelegung. Nicht alle Transistoren zeigen diese Belegung, im Zweifelsfall geben die Datenblätter der Hersteller Auskunft. Beim **NPN-Transistor** fließt der Strom zur Basis bzw. zum Kollektor bzw. aus dem Emitter (technische Stromrichtung), beim **PNP-Transistor** aus der Basis bzw. aus dem Kollektor bzw. zum Emitter. Die in Verzerrern üblichen Kollektorströme sind kleiner als 1 mA, der Basisstrom ist ca. 1% des Kollektorstroms. Der Quotient aus Kollektor- und Basisstrom, die **Stromverstärkung B** , ist aber sehr stark vom Herstellungsprozess und von der Temperatur abhängig, bei üblichen Transistoren findet man Werte von 40...300. Deshalb kann sich das Verhalten der Schaltung ändern, wenn man einen Transistor gegen einen (typgleichen!) anderen tauscht.

In Ruhe, d.h. ohne Signal, beträgt der Kollektorstrom ca. 0.1...1mA. Das ist natürlich abhängig von der speziellen Schaltung, als Beispiel seien hier 0.2 mA angenommen. Für $B = 100$ ergibt sich der Basisstrom dann zu 2 μ A. Den Eingang, also das von Basis und Emitter gebildete "Tor", beschreibt man als eine in Flussrichtung betriebene Diode – als Si-Diode beim Si-Transistor, als Ge-Diode beim Ge-Transistor. Zu einem Flussstrom von 2 μ A gehört bei der Ge-Diode eine Flussspannung von ca. 0.1 V, bei der Si-Diode ca. 0.5 V. Als erster Richtwert, denn je nach Herstellungsverfahren sind auch etwas größere oder kleinere Werte möglich. Ist beim NPN-Transistor die Basisspannung aber um mehr als 1 V größer als die Emitterspannung, ist der Transistor kaputt. Ist beim NPN-Transistor U_{BE} negativ, sperrt der Transistor, d.h. der Kollektorstrom ist praktisch null. Entsprechendes gilt beim PNP-Transistor für positive Basis-Emitter-Spannung. Exakt null wird der Kollektorstrom allerdings nicht, weil ein **Reststrom** anzusetzen ist, der insbesondere bei Ge-Transistoren ganz schön groß sein kann. So nennt beispielsweise das Siemens-Datenbuch für den AC188 als Reststrom bei gesperrter Emitterdiode maximal 200 μ A – das entspräche im obigen Beispiel dem Strom im Arbeitspunkt! Und dann hat der Reststrom auch noch die unangenehme Eigenschaft, mit steigender Temperatur exponentiell zuzunehmen, was speziell Ge-Transistoren den Ruf eingebracht hat, schwierig zu handhabende Einzelgänger zu sein.

* Für praxisorientierte Details siehe z.B. Tietze/Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer.

In **Abb. 10.8.29** wird ein PNP-Transistor in Emitterschaltung betrieben, d.h. mit auf Masse liegendem Emitter. Sperrt der Transistor, fließt (idealisiert) kein Kollektorstrom, dann ist die Kollektorspannung -9 V (linkes Bild). Steuert der Transistor voll durch, liegt am Kollektor nur noch die kleine Restspannung, z.B. -0.2 V . Für eine erste Dimensionierung würde man den Arbeitspunkt in die Mitte der Kennlinie legen, die Kollektorspannung also auf -4.6 V einstellen. Am Kollektorwiderstand fallen dann 4.4 V ab, was bei $10\text{ k}\Omega$ einen Kollektorstrom von -0.44 mA ergibt*. Als Basisspannung würde sich in diesem Beispiel ca. -0.1 V ergeben.

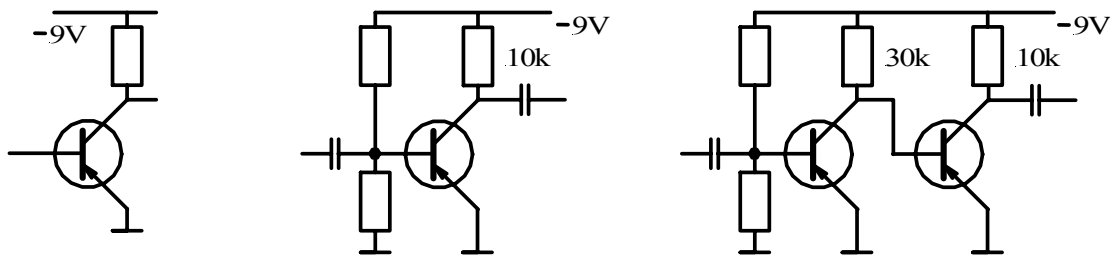


Abb. 10.8.29: Transistor im Emitterschaltung.

Sowohl Basis als auch Kollektor liegen ohne Signal nicht auf 0V , deshalb ist zur gleichspannungsfreien Außenwelt jeweils ein Koppelkondensator erforderlich; die für den Arbeitspunkt nötige Basisspannung wird dann über die Basisteiler-Widerstände eingestellt (mittleres Bild). In so einer Schaltung wäre ein Transistor aber nicht stabil betreibbar, auch wenn man für jedes einzelne Exemplar den Arbeitspunkt individuell einstellt: Schon bei wenigen Grad Temperaturänderung würde sich der Arbeitspunkt verschieben, würde sich der Klang ändern. Das Mittel der Wahl gegen thermische Drift: **Gegenkopplung**, d.h. gegenphasige Rückkopplung. Entweder in Form eines Emitterwiderstandes (erhöht den Eingangswiderstand), oder durch einen vom Ausgang auf die erste Basis zurückführenden Widerstand (erniedrigt den Eingangswiderstand), oder durch weitere Maßnahmen, deren Umfang aber den hier gesteckten Rahmen sprengen würde [siehe z.B. Fliege]. Beispiele gegengekoppelter Transistoren zeigen die folgenden Seiten, z.B. Kap. 10.8.5.3. Erst mit geeigneter Gegenkopplung wird es möglich, mehrstufige Verstärker wie oben im rechten Bild zu bauen. In der abgebildeten Version müsste allerdings der erste Transistor mit zu geringer Kollektorspannung arbeiten: Da die Basisspannung des zweiten Transistors bei Ge-Transistoren kaum über ca. 0.2 V anwachsen kann, sind auch für die Kollektorspannung des ersten Transistors keine größeren Werte möglich. Deshalb wird in die Emitterleitung des zweiten Transistors ein Widerstand (z.B. $1\text{ k}\Omega$) eingefügt, wodurch dessen Eingangswiderstand und -spannung ansteigt.

Gegenkopplung verringert die Verstärkung, stabilisiert sie aber auch, d.h. macht sie unempfindlicher gegen fertigungs- und temperaturbedingte Schwankungen. Bei Schaltungen, deren untere Grenzfrequenz nicht 0 Hz sein muss, ist eine Trennung in Wechselspannungs- und Gleichspannungsgegenkopplung möglich: Eine starke Gleichspannungsgegenkopplung stabilisiert den Arbeitspunkt, die schwächere Wechselspannungsgegenkopplung verhindert, dass die Verstärkung zu weit absinkt. Bei allen Verstärkern muss aber beachtet werden, dass bei hohen Frequenzen durch Phasendrehungen aus Gegenkopplung Mitkopplung wird – die Schaltung könnte zum HF-Generator werden.

* Das durchaus wichtige Gebiet der Zählpeile und Vorzeichen soll hier nicht näher vertieft werden, dazu muss auf die Literatur verwiesen werden, z.B. [20].