

## Transistor

### Was ist ein Transistor?

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und Verstärken von elektrischem Strom verwendet wird. Die Bezeichnung ist eine Kurzform für die englische Bezeichnung transient resistor, die den Transistor als einen durch Strom steuerbaren Widerstand beschreiben sollte.

Der Transistor wurde auf der Grundlage der Diode entwickelt. Eine Diode besteht aus zwei dotierten Halbleiterschichten (NP- bzw. PN-dotiert) und schaltet Strom nur in einer Richtung durch. Ein Transistor ist nun eine Kombination aus drei Dioden "hälften" (NPN- bzw. PNP), wobei die obere und untere Schicht als Kollektor bzw. Emitter und die mittlere Schicht als Basis bezeichnet werden.

5 000 000 000 000 000 000 Stück - Wenn man alle Transistoren in sämtlichen bislang hergestellten Schaltkreisen zusammenzählt, ist der Transistor diejenige technische Funktionseinheit, die je von der Menschheit in den höchsten Gesamtstückzahlen produziert wurde.

0,000 000 03 Meter - Die neuesten Intel-Transistoren sollen eine Breite von nur noch 30 Nanometer haben. Dabei wird ein einzelnes Elektron durch das so genannte Transistor-Tor (Gate) geschickt und schaltet so den Transistor auf.

### Geschichte

1948 gilt allgemein als das Jahr, in dem der Transistor erfunden wurde. Beteiligt an der Erfindung waren William Shockley, John Bardeen und Walter Brattain, die 1956 den Nobelpreis dafür erhielten. In den 50er Jahren gab es einen Wettlauf zwischen Röhre und Transistor, in dessen Verlauf die Chancen des Transistors häufig eher skeptisch beurteilt wurden.

Zuerst wurden Transistoren aus Germanium hergestellt und ähnlich wie Röhren in winzige Glasröhrchen eingeschmolzen. Das Germanium wurde später durch Silizium ersetzt.

Noch heute gilt Moores 1960 aufgestelltes Gesetz, wonach sich die Anzahl der Transistoren in Prozessoren alle 1 1/2 Jahre verdoppelt.

### Varianten von Transistoren

#### \* Bipolartransistor

- Fototransistor
- Darlington-Transistor
- IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor
- HBT (HJBT) Heterojunction Bipolartransistor

#### \* Feldeffekttransistor FET

- JFET: Junction Feldeffekttransistor
- Metall-Oxid-Feldeffekttransistor MOSFET
- HEMT: Junction Feldeffekttransistor
- Ionen-Sensitiver Feldeffekt-Transistor (ISFET)
- MESFET: Metall Semiconductor Feldeffekttransistor

### Bipolartransistor

Einen Bipolartransistor nennt man einen Transistor, bei dem Ladungsträger beider Polarität (Elektronen und Defektelektronen) zur Funktion beitragen. Er besteht aus drei abwechselnd p- und n-dotierten Halbleiterschichten, die als Kollektor (C), Basis (B) und Emitter (E) bezeichnet werden. Die Basis ist besonders dünn und liegt zwischen Kollektor und Emitter.

Es gibt npn-Typen und pnp-Typen, die Buchstaben geben die Reihenfolge der Schichtung an. Somit bildet ein Bipolartransistor immer zwei gegeneinander geschaltete Dioden.  
Beim Transistor steuert ein Strom  $I_B$  im Basis-Emitter-Kreis einen (stärkeren) Strom  $I_C$  im Kollektor-Emitter-Kreis.

Da der zwischen Basis und Emitter fließende Strom nur die BE-Sperrschicht leitend machen muss, genügt hier ein kleiner Strom. Die einmal in die Basis gelangten Elektronen fließen zum größten Teil weiter zum Kollektor. Es wird also ein ca. 100mal größerer Strom durch den kleinen gesteuert. Das Verhältnis der Ströme ist vom Typ abhängig, man bezeichnet es als den Stromverstärkungsfaktor  $\beta$ . Es liegt in der Größenordnung von 10 bis 10000, je nach Konstruktion des Transistors.

Das größte Anwendungsgebiet von Bipolartransistoren sind Verstärkerschaltungen.

### **Fototransistor**

Ein Fototransistor funktioniert nach den gleichen Regeln wie der Bipolartransistor, nur mit dem kleinen Unterschied, dass hier die Ansteuerung der Basis mit Licht geschieht. Das Licht fällt durch das klare Gehäuse direkt oder aber durch eine Linse des ansonsten geschlossenen Gehäuses auf den Halbleiter, d. h. auf den als Fotodiode wirkenden PN-Übergang zwischen Basis und Emitter. Der Fotostrom wird dann an Ort und Stelle im Transistor verstärkt, sodass ein Fototransistor direkt kleine Verbraucher (im mA-Bereich) schalten kann. Somit haben Fototransistoren nur zwei Anschlüsse, nämlich Kollektor und Emitter. Es gibt allerdings auch Ausführungen mit drei Anschlüssen: der dritte Anschluss regelt den Arbeitspunkt der Basisansteuerung.

Anwendungen finden Fototransistoren in jeglicher Art von Registrierung oder Übertragungen via Licht, also zum Beispiel Lichtschranken, Dämmerungsschalter, Optokoppler.

### **Darlington-Transistor**

Ein Darlington-Transistor ist ein elektronisches Bauelement, das aus zwei kombinierten Bipolartransistoren in einem Gehäuse besteht.

Der Vorteil dieser Technik ist, dass bei gleichbleibendem Platzbedarf eine erheblich höhere Stromverstärkung erreicht werden kann. Die gesamte Verstärkung beträgt dabei das Produkt der Verstärkungen der beiden Einzeltransistoren, bei modernen Darlington sind das 1000 und mehr. Der Darlington-Transistor hat bei hohen Frequenzen eine größere Phasenverschiebung als ein einzelner Transistor, so dass bei negativer Rückkopplung leichter Instabilitäten auftreten können. Die Basis-Emitter-Spannung ist doppelt so hoch und beträgt beim Silizium Darlington-Transistor  $> 1,2$  Volt.

### **Insulated Gate Bipolar Transistor**

Ein Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ist ein Halbleiterbauelement, welches zunehmend in der Leistungselektronik verwendet wird, da es die Vorteile des bipolaren Transistors (gutes Durchlassverhalten, geringer Eingangswiderstand) und die Vorteile eines Feldeffekttransistors (nahezu leistungslose Ansteuerung) vereinigt. IGBTs werden unter anderem im Hochleistungsbereich eingesetzt, da sie über eine hohe Sperrspannung verfügen und hohe Ströme (bis etwa 3 kA) schalten können.

Anwendungen sind z. B. Schaltnetzteil, Frequenzumrichter (z. B. in der Antriebstechnik) oder Gleichstromsteller.

### **Feldeffekttransistor**

Die FETs haben den Bipolar-Transistoren sehr ähnliche Eigenschaften: auch sie sind aktive, nichtlineare Halbleiter- Bauelemente mit drei Anschlüssen: Source, Gate und Drain

Der wichtigste Unterschied zwischen FET und Bipolar-Transistoren besteht im physikalischen Arbeitsprinzip: Ein FET ist ein *spannungsgesteuertes* Bauelement. Die *Spannung* zwischen Gate und Source steuert die Leitfähigkeit des Drain- Source-Leitungskanals.

Eine Unterscheidung der FETs ist abhängig vom verwendeten Kanaltyp: In *Anreicherungs-FET* ist der Leitungskanal unterbrochen, solange keine hinreichende Gate-Spannung anliegt. Im *Verarmungs-FET* ist der Kanal leitend, solange er nicht durch eine genügend große Gate-Spannung abgeschnürt wird.

FETs werden häufig als spannungsgesteuerte Widerstände und Anpassglieder bzw. Abschwächer verwendet.

### **JFET: Junction Feldeffekttransistor**

Beschreibung der Wirkungsweise eines Sperrschicht-Fets: (N-Kanal-Typ)

Der N-Kanal dieses Fet ist der leitende Bereich. Der Stromfluß durch diesen Bereich wird mit der Vorspannung an der Steuerelektrode(Gate) gesteuert.

Erhöht man die negative Gate-Spannung, so dehnt sich die Sperrschicht (Raumladungszone) aus. Der Strom durch den N-Kanal wird geringer.

Das verändern der Sperrschichtbreite erfordert so gut wie keine Leistung.

Die typische Kennlinien eines Fet kommen aus einem Punkt, im Gegensatz zum Bipolaren Transistor, bei dem die Kennlinien aus einem Stamm kommen.

Jede der Kennlinien gilt für eine bestimmte Gatespannung UGS. Bei einer Gatespannung von 0V ist die Sperrschicht am schmalsten bzw. kleinsten. Hier fließt der größte Strom ID durch den Kanal. Ab der Abschnürgrenze lässt sich der Strom durch den Kanal nicht mehr erhöhen.

Sperrschicht-Fets werden in Verstärkern, in Schalterstufen und Oszillatoren eingesetzt. Ein besonderer Vorteil ist sein großer Eingangswiderstand, der eine leistungsarme Steuerung ermöglicht.

Der Fet eignet sich nicht für hochfrequente Anwendungen.

### **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor**

MOSFET ist die Abkürzung für Metal Oxide Semiconductor (auch: Silicon) Field Effect Transistor (engl. für Metalloxid-Halbleiter-/ -Silizium-Feldeffekttransistor).

Statt der pnp oder npn-Struktur eines Bipolar-Transistors wird als Gate eine Metallschicht über eine isolierende Siliziumdioxidschicht zwischen Source und Drain gelegt. d.h. das Gate ist elektrisch völlig *isoliert* vom Leitungskanal. Normalerweise wirkt das darunterliegende, leicht p-dotierte Silizium (Kanal) sperrend, so dass kein Strom zwischen den beiden Kontakten Source und Drain fließen kann. Wenn über den Gate eine Spannung angelegt wird, erzeugt diese eine Inversion in dem Kanal, so dass Ladungsträger zwischen Source und Drain fließen können.

Ein Nachteil des MOSFET liegt in seinen prinzipiell schlechten Hochfrequenzeigenschaften aufgrund der geringen Oberflächenbeweglichkeit der Ladungsträger im Kanal. Ein Vorteil gegenüber Bipolartransistoren aber ist, dass die Leitfähigkeit zwischen Source und Drain stromlos (kapazitiv) gesteuert wird. Er ist außerdem wegen seines einfachen Herstellungsprozesses besonders für integrierte Schaltungen geeignet.

Wie auch beim Bipolartransistor gibt es zwei komplementäre Bauformen: n-Kanal MOSFET und p-Kanal MOSFET. Diese können jeweils noch in selbstsperrende und selbstleitende Typen unterschieden werden.

Beschreibung der Funktionsweise eines MOS-FET(Anreicherungstyp):

Der MOS-FET befindet sich immer im Sperr-Zustand (deshalb selbstsperrend), wenn keine positive Spannung zwischen Gate- und Source-Anschluß anliegt.

Wird zwischen Gate und Source eine positive Spannung UGS angelegt, dann entsteht im Substrat ein elektrisches Feld. Die Elektronen im p-leitenden Substrat werden vom positiven Gate-Anschluß angezogen. Sie wandern bis unter das Siliziumdioxid (Isolierschicht). Die Löcher wandern in entgegengesetzter Richtung. Die Zone zwischen den n-leitenden Inseln enthält überwiegend Elektronen als freie Ladungsträger. Zwischen Source- und Drain-Anschluß befindet sich nun eine n-leitende Brücke. Die Leitfähigkeit dieser Brücke lässt sich durch die Gatespannung UGS steuern.

Dadurch dass die Siliziumdioxid-Schicht isolierend zwischen Aluminium und Substrat wirkt, fließt kein Gatestrom

IG. Zur Steuerung wird nur eine Gatespannung UGS benötigt.  
Die Steuerung des Stromes ID durch den MOS-FET erfolgt leistungslos.

Der beschriebene MOS-FET ist ein Anreicherungstyp. Er ist selbstsperrend. Es gibt aber auch MOS-FETs als Verarmungstypen. Sie sind selbstleitend, weil sie schon nach angelegter Spannung UDS leitend sind. Das wird durch eine schwache n-Dotierung zwischen den n-leitenden Inseln (Source und Drain) erzeugt. Dieser MOS-FET sperrt nur vollständig, wenn die Gatespannung UGS negativer ist als die Spannung am Source-Anschluß.

### **High Electron Mobility Transistor**

Der High Electron Mobility Transistor (HEMT) ist ebenso wie der MOSFET ein unipolares Bauelement. Er besteht aus Schichten verschiedener Halbleitermaterialien mit unterschiedlich großen Bandlücken. Häufig wird das Materialsystem Aluminium-Gallium-Arsenid/Gallium-Arsenid verwendet, wobei das AlGaAs hoch n-dotiert und das GaAs nicht dotiert wird. Da die verbotene Zone des AlGaAs größer ist als die des GaAs, bildet sich an der Grenzfläche dieser beiden Materialien auf Seiten des GaAs ein zweidimensionales Elektronengas (2DEG) aus, das als leitfähiger Kanal dienen kann. Die Elektronenbeweglichkeit ist darin sehr hoch. Der HEMT ist deshalb für Hochfrequenzanwendungen gut geeignet. Die Steuerung des Bauelementes erfolgt, ähnlich wie beim MESFET über ein Metallgate, das sich direkt auf den n-AlGaAs befindet. Das HEMT-Prinzip ist auch auf andere Materialsysteme wie InGaAs/InP/AlInAs und Si/SiGe anwendbar.

### **Ion-Selective Field Effect Transistor**

Der ISFET ist ein Ionen-Sensitiver Feldeffekttransistor.

Anstelle des metallischen Gate tritt hier eine Ionensensitive Schicht, die mit einer zu messenden Flüssigkeit in Kontakt gebracht wird. Je nach Ionenzusammensetzung der Flüssigkeit werden im leitenden Kanal zwischen Source und Drain Ladungsträger verdrängt oder angereichert. Dadurch ändert sich der elektrische Widerstand, der gemessen werden kann.

Die ISFET-Sensoren (Ion Sensitive Field Effect Transistor), ursprünglich für den medizinischen Bereich entwickelt, finden Dank ihrer robusten Bauweise und hoher Präzision auch im Labor- und Industriebereich vermehrt Anwendung.

### **Thyristor**

Eine konsequente Erweiterung dieses Prinzips sind Halbleiterbauelemente aus mehreren Schichten (z.B. PNP); diese werden auch als Thyristoren bezeichnet. Der Name ist eine Schöpfung aus Thyatron und Transistor und bezeichnet einen steuerbaren Gleichrichter in Halbleiterausführung.

Er hat drei pn-Übergänge in der Folge pnpn. Wie eine Diode hat der Thyristor Anode und Kathode und zusätzlich einen Gate-Anschluss.

Im Grundzustand ist der Thyristor in beiden Richtungen sperrend. In Flussrichtung sperrt er bis zu seiner Durchbruchspannung (Nullkippspannung). In Sperrrichtung verhält er sich wie eine normale Diode. Praktisch wird der Thyristor dann als steuerbare Diode eingesetzt. Durch Strominjektion in die dritte Schicht (Ansteuerung am Gate) kann man den Thyristor zünden (leitfähig schalten), vorausgesetzt, die Anode ist positiver als die Kathode. Gelöscht (in den Sperrzustand versetzt) wird der Thyristor durch Unterschreiten des Haltestroms, im Allgemeinen durch Abschalten der Spannung an der Anode.

Eine Sonderform ist die Thyristortetrode. Sie besitzt an der zweiten und an der dritten Schicht eine Elektrode. Sie kann an beiden Elektroden oder an jeder einzeln gezündet und gelöscht werden, jeweils mit einem positiven oder negativen Impuls.

Thyristoren werden für große Ströme bis über 1000 A gebaut. Allerdings haben die üblichen Thyristoren Grenzfrequenzen von 200 Hz. Thyristoren haben ein breites Anwendungsfeld, von der Steuerung elektrischer Motoren bis zur Lichtsteuerung (Dimmung). Sie werden auch für größte Leistungen, wie in Anlagen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung verwendet. Im Bereich der einiger Megawatt, wie z.B. in Elektrolokomotiven, wurden Thyristoren ihrerseits bereits wieder durch IGBTs verdrängt.