Wie funktioniert ein Transistor?

QUANTENTECHNOLOGIE · MATERIALIEN UND BAUELEMENTE

Wenn man fragt, welche Erfindung des 20. Jahrhunderts die Welt am stärksten verändert hat, fallen meist Antworten wie Internet, Computer oder Smartphone. Alle drei wären ohne ein einziges, sehr kleines Bauteil nicht denkbar. Ein Transistor ist im Kern nur ein Schalter, der Strom ein- und ausschalten oder ein schwaches Signal verstärken kann. In dem Gerät, auf dem Sie diesen Text lesen, arbeiten viele Milliarden davon. Wahrscheinlich ist er das am häufigsten hergestellte Ding, das die Menschheit je gebaut hat.

Weniger bekannt ist, dass der Transistor ein Kind der Quantenphysik ist. Ohne die Quantenmechanik der Zwanzigerjahre hätte niemand verstanden, warum Halbleiter sich so verhalten, wie sie es tun, und ohne dieses Verständnis wäre er nie gebaut worden.

Was ein Halbleiter ist

In einem Metall wie Kupfer gibt es Elektronen, die sich frei bewegen können, deshalb leitet es Strom. In einem Isolator wie Glas sind alle Elektronen fest an ihre Atome gebunden. Halbleiter wie Silizium oder Germanium liegen dazwischen, und warum das so ist, konnte erst die Quantenmechanik erklären.

In einem Kristall können Elektronen, ähnlich wie in einem einzelnen Atom, nur bestimmte Energien haben. Diese Energien liegen hier aber nicht auf einzelnen Stufen, sondern in breiten Bereichen, den sogenannten Bändern. Zwischen dem untersten vollen Band und dem nächsten leeren Band liegt eine Lücke, in der es keine erlaubten Zustände gibt. Bei einem Isolator ist diese Lücke groß, bei einem Halbleiter klein. Wärme oder Licht reichen dann aus, um einzelne Elektronen über die Lücke zu heben, wo sie sich frei bewegen. Der britische Physiker Alan Wilson hat dieses Bild 1931 ausgearbeitet [1].

Daraus ergibt sich eine zweite, sehr merkwürdige Sache. Wenn ein Elektron nach oben springt, hinterlässt es im unteren Band eine Lücke, ein Loch. Und dieses Loch verhält sich wie ein positiv geladenes Teilchen, das sich ebenfalls durch den Kristall bewegen kann. Halbleiter leiten also auf zwei Arten, mit Elektronen und mit Löchern. Durch gezieltes Verunreinigen mit Fremdatomen, das sogenannte Dotieren, kann man bestimmen, welche Sorte überwiegt. Phosphor liefert zusätzliche Elektronen, man spricht von n-Dotierung. Bor erzeugt zusätzliche Löcher, das ist p-Dotierung. Mit genau diesen beiden Zutaten baut man jeden Transistor.

Ein Weihnachtsgeschenk aus New Jersey

Die Idee, Strom in einem Festkörper mit einem elektrischen Feld zu steuern, ist älter als der Transistor. Der Physiker Julius Lilienfeld meldete schon 1926 in den USA ein Patent auf ein solches Bauteil an, und 1934 tat Oskar Heil in Cambridge dasselbe. Ob einer von beiden je ein funktionierendes Gerät gebaut hat, ist nicht belegt [2]. Es fehlte an reinen Materialien und an einem Verständnis dafür, was an der Oberfläche eines Halbleiters passiert.

Nach dem Zweiten Weltkrieg setzten die Bell Telephone Laboratories in Murray Hill, New Jersey, eine Gruppe auf genau dieses Problem an. Die Telefongesellschaft brauchte einen Ersatz für die Elektronenröhren in ihren Verstärkern, die heiß, groß und unzuverlässig waren. Geleitet wurde die Gruppe von William Shockley, die entscheidenden Experimente machten aber der Theoretiker John Bardeen und der Experimentator Walter Brattain. Am 16. Dezember 1947 gelang ihnen ein Aufbau aus einem kleinen Stück Germanium, auf das zwei eng benachbarte Goldkontakte drückten, gehalten von einem Kunststoffkeil. Er verstärkte ein Signal bis zum Hundertfachen. Am 23. Dezember führten sie ihn der Laborleitung vor, und Shockley nannte das später ein „großartiges Weihnachtsgeschenk“ [3].

Öffentlich vorgestellt wurde der Transistor am 30. Juni 1948, kurz darauf erschien die Veröffentlichung in der Physical Review [4]. Shockley, der nicht direkt beteiligt gewesen war und sich übergangen fühlte, entwickelte in den folgenden Wochen fieberhaft eine bessere Variante, den Flächentransistor, der sich viel leichter herstellen ließ. 1956 erhielten die drei gemeinsam den Nobelpreis für Physik. Für Bardeen war es nicht der letzte: 1972 bekam er einen zweiten, für die Theorie der Supraleitung. Er ist bis heute der einzige Mensch mit zwei Physik-Nobelpreisen.

Wie ein Transistor schaltet

Fast alle Transistoren in heutigen Chips sind Feldeffekttransistoren, kurz MOSFET, und damit eine Umsetzung von Lilienfelds alter Idee. Man kann sich ihr Prinzip an einem Querschnitt klarmachen (Abb. 1).

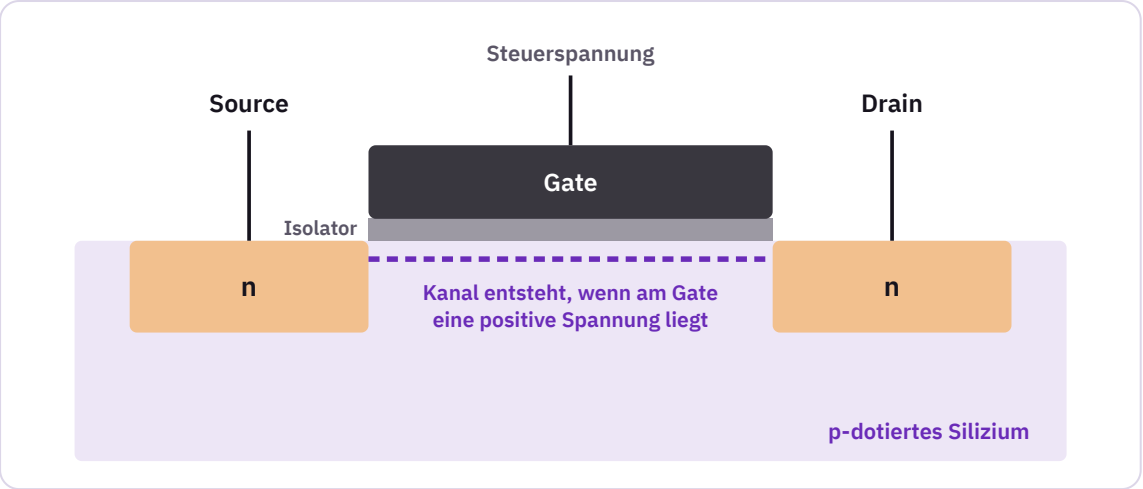


Abb. 1: Schematischer Querschnitt durch einen n-Kanal-MOSFET. Eigene Darstellung.

In einem Stück p-dotiertem Silizium liegen zwei n-dotierte Inseln, Source und Drain genannt, also Quelle und Abfluss. Dazwischen kann normalerweise kein Strom fließen, weil das p-Gebiet wie eine Barriere wirkt. Über der Lücke zwischen den beiden Inseln sitzt, getrennt durch eine hauchdünne Isolatorschicht, eine dritte Elektrode, das Gate. Legt man daran eine positive Spannung, zieht sie Elektronen an die Oberfläche des Siliziums. Dort bildet sich ein schmaler leitender Kanal, und Strom kann von Source zu Drain fließen. Nimmt man die Spannung weg, verschwindet der Kanal und der Strom stoppt.

Mehr ist es nicht. Ein Schalter, der ohne bewegliche Teile auskommt, mit einer Spannung bedient wird und Milliarden Mal pro Sekunde umschalten kann. Verbindet man viele solcher Schalter geschickt miteinander, erhält man logische Gatter, die rechnen können, und daraus Speicher, Prozessoren und schließlich Computer.

Immer kleiner

Ab 1958 lernte man, mehrere Transistoren samt Verbindungen auf einem einzigen Stück Halbleiter unterzubringen. Jack Kilby bei Texas Instruments baute den ersten integrierten Schaltkreis, Robert Noyce bei Fairchild kurz darauf eine Variante aus Silizium, die sich in Serie fertigen ließ. Kilby erhielt dafür im Jahr 2000 den Nobelpreis für Physik, Noyce war da schon gestorben. Seitdem ist die Zahl der Transistoren auf einem Chip immer weiter gewachsen, lange Zeit in einem Rhythmus von etwa zwei Jahren pro Verdopplung, den der spätere Intel-Mitgründer Gordon Moore in den Sechziger- und Siebzigerjahren beschrieben hatte und der als mooresches Gesetz bekannt wurde. Ein Grafikprozessor wie der B200 von Nvidia, vorgestellt im März 2024, enthält auf zwei zusammengeschalteten Chips 208 Milliarden Transistoren [5].

Die Strukturen auf modernen Chips sind inzwischen so winzig, dass sie nur noch aus wenigen Dutzend Atomlagen bestehen. Und hier holt die Quantenphysik den Transistor wieder ein, diesmal als Problem. Wenn die Isolatorschicht unter dem Gate nur noch wenige Atome dick ist, können Elektronen sie einfach durchqueren, obwohl sie nach klassischer

Vorstellung nicht genug Energie dafür haben. Dieser Tunneleffekt verursacht Leckströme, die Energie kosten und Wärme erzeugen. Die Chipindustrie hat darauf mit neuen Materialien und dreidimensionalen Transistorformen reagiert, aber die Grenze rückt näher. Das ist einer der Gründe, warum man nach ganz neuen Wegen sucht, etwa der Spintronik, die neben der Ladung auch den Spin der Elektronen nutzt, oder dem Quantencomputer, der die Quanteneffekte nicht bekämpft, sondern zum Rechnen einsetzt.

Zum Weiterlesen

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer Spektrum · ISBN 978-3-662-49093-8

Bändermodell, Dotierung und Halbleiterbauelemente, sauber hergeleitet und mit vielen Abbildungen. Der richtige Schritt, wenn man nach diesem Artikel tiefer einsteigen will.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. A. H. Wilson: *The Theory of Electronic Semi-Conductors.* In: Proceedings of the Royal Society of London A 133 (1931), S. 458–491, doi:10.1098/rspa.1931.0162.
2. Computer History Museum: *1926: Field Effect Semiconductor Device Concepts Patented.* The Silicon Engine. computerhistory.org.
3. Computer History Museum: *1947: Invention of the Point-Contact Transistor.* The Silicon Engine. computerhistory.org.
4. J. Bardeen, W. H. Brattain: *The Transistor, A Semi-Conductor Triode.* In: Physical Review 74 (1948), S. 230–231, doi:10.1103/PhysRev.74.230.
5. J. Walton: *Nvidia's next-gen AI GPU revealed: Blackwell B200.* Tom's Hardware, 18. März 2024. tomshardware.com.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Wie funktioniert ein Transistor?. Stand: Oktober
2026. URL: https://quanten.de/transistor.html (PDF:
```

```
https://quanten.de/pdf/transistor.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Der Tunneleffekt · Spintronik · Supraleitung · Quantencomputer

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/transistor.html