Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 33 (1960)

Heft: 5

Rubrik: Funk + Draht

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Funk + Draht

Mai 1960

Beilage zum «Pionier»
zur fachtechnischen Ausbildung
der Übermittlungstruppen

Nachdruck verboten

Der Transistor

Physikalische Grundlagen, Wirkungsweise und kurzer Einblick in die Herstellungsmethode

Die Transistoren sind in den letzten Jahren sehr aktuell geworden und haben das Aussehen und die Betriebsmöglichkeiten elektronischer Geräte geradezu revolutionierend verändert und erweitert.

Trotz der sehr schnellen Ausbreitung der Anwendung der Transistoren wird man aber eines gewissen unangenehmen Gefühls nicht vollständig los. Nur sehr wenige kennen letzten Endes die genaue Wirkungsweise der Transistoren. Zudem ist man sich selten genau im klaren darüber, wie sich ihre unangenehme Temperaturabhängigkeit in allen Konsequenzen auswirkt. Die ganze Transistortechnik ist zudem noch sehr stark im Fluss. Was heute als das Modernste gilt, kann in einem halben Jahr schon wieder durch etwas entscheidend Besseres ersetzt sein. Trotzdem wachsen die Anwendungsgebiete der Transistoren eigentlich täglich. Sogar einer der konservativsten elektrischen Apparate, nämlich das uns allen bekannte Telephon, hat — allerdings erst in Form von Versuchsausführungen — durch die Anwendung von Transistoren eine wesentliche schaltungstechnische Veränderung und Verbesserung erfahren.

Bevor an die eigentliche Aufgabe dieses Aufsatzes, die physikalischen Grundlagen für das Verständnis der Funktionsweise der Transistoren zu erläutern, herangetreten wird, soll auf einfache Art das Wesen des elektrischen Leiters und dasjenige eines elektronischen Verstärkers kurz in Erinnerung gerufen werden.

Bekanntlich bestehen alle Elemente, und zwar Leiter, Halbleiter und Isolatoren in ihrem Grundaufbau aus positiven Atomkernen und aus negativen Elektronen, wie dies auf Fig. 1a dargestellt ist. Nach aussen hin herrscht elektrische Neutralität, weil sich die positiven und negativen Ladungen in ihrer Wirkung neutralisieren. In den meisten Fällen kommt der elektrische Strom dadurch zustande, dass sich die Elektronen bewegen, d. h., dass sie in einer Richtung fliessen.

Fig. 1a

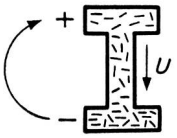


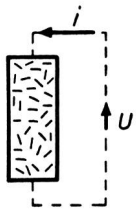
Fig. 1b

Die Grundbedingung für das Zustandekommen eines elektrischen Stromes ist das Vorhandensein einer Spannungsquelle, also z. B. einer Taschenlampenbatterie.

Grundsätzlich besteht das Hauptmerkmal einer Spannungsquelle darin, dass in ihr die Elektronen auf eine Seite gedrängt werden — zum sogenannten —Pol und von diesem über einen elektrischen Leiter zum sogenannten +Pol fliessen möchten (Fig. 1b). Die Spannungsquelle ist aber streng dafür besorgt, ihre zugehörige Anzahl Elektronen dauernd in sich zu behalten. Deswegen muss ein Stromkreis immer geschlossen sein, d. h. in gleicher Zahl, wie Elektronen aus dem —Pol der Batterie herausfliessen, müssen beim +Pol Elektronen wieder hineinfliessen.

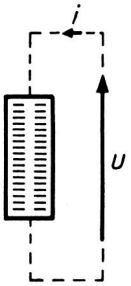
Als elektrische Leiter bezeichnen wir stromdurchlässige Stoffe. Diese — es sind vor allem die Metalle — zeichnen sich dadurch aus, dass ein Teil ihrer Elektronen frei beweglich ist und sozusagen als Elektronengas im kompakten Stoff herumfliesst, wie es in Fig. 1c schematisch dargestellt ist. Trotz dieser freien Beweglichkeit der Elektronen wird aber auch hier streng darauf geachtet, dass immer die dem betreffenden Leiter zugehörige Zahl an Elektronen in diesem vorhanden ist. Der Leiter setzt aber dem ständigen Wechsel von Elektronen nur einen kleinen oder fast keinen Widerstand entgegen, wir sagen, sein ohmscher Widerstand sei klein.

Im Gegensatz zu den elektrischen Leitern gibt es eine grössere Zahl Isolatoren, also Stoffe, die praktisch keinen Strom durchlassen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass alle Elektronen streng an den Atomkern gebunden sind und nur durch grosse Energiezufuhr freigemacht werden können. Diese Stoffe sind also nicht gewillt, von ihren Elektronen einige abzugeben und durch andere zu ersetzen, d. h. es kommt kein Stromfluss zustande. Man sagt deshalb, der ohmsche Widerstand sei sehr gross (Fig. 1d).



$R = \frac{U}{i}$ = sehr klein

Fig. 1c



$R = \frac{U}{i}$ = sehr gross

Fig. 1d

Als Zwischenstufe zwischen den Leitern und den Isolatoren finden wir nun noch die sogenannten Halbleiter. Diese stellen sozusagen eine Übergangszone dar. Es sind Stoffe, deren Elektronen eigentlich wie bei den Isolatoren festgebunden sind. Sie lassen sich jedoch mit wenig Energie befreien und ermöglichen deswegen einen beschränkten Stromdurchfluss. Die nötige Energie für das Entstehen von freien Elektronen kann durch Erwärmen zugeführt werden. Deshalb ist die Leitfähigkeit der Halbleiter stark temperatur-

abhängig. Einen Halbleiter richtig umschreiben zu wollen, ist sehr schwierig; er ist weder Fisch noch Vogel. Doch gerade diese Eigenschaft als labile «Zwischenlösung» lässt — wie wir später sehen werden — den Halbleiter so interessant werden. Naturgemäss besitzt er nämlich die Eigenschaft, durch geringe Veränderungen, z. B. durch Beimischen fremder Stoffe, seine elektrischen Eigenschaften stark zu ändern. Dieser Eigenschaft ist es zu verdanken, dass sich aus den Halbleitern — es betrifft dies vor allem die Elemente Germanium und Silizium — die Halbleiterverstärkerelemente, die sogenannten Transistoren herstellen lassen.

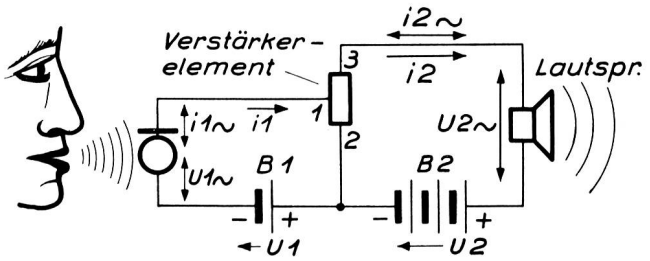


Fig. 2

Fig. 2 ruft kurz das Grundprinzip der elektronischen Verstärkung in Erinnerung. Es stellt die Verstärkung der Sprachenergie mittels eines elektronischen Verstärkers und deren Wiedergabe durch einen Lautsprecher dar. Die sehr kleine Sprachenergie erzeugt im Mikrophon die kleine Wechselspannung $U_1\sim$, welche nach dem ohmschen Gesetz den Wechselstrom $i_1\sim$ zur Folge hat. $i_1\sim$ überlagert sich dem durch die Batterie U_1 erzeugten Gleichstrom i_1, welcher via die Anschlusspunkte 1 und 2 (bei den Elektronenröhren sind dies das Steuergitter und die Kathode) durch das Verstärkerelement fliesst. Die beiden Ströme sind in Fig. 2a dargestellt.

Die Haupteigenschaft des elektronischen Verstärkers besteht nun darin, dass er den von der Batterie U_2 erzeugten, über die Anschlusspunkte 2 und 3 durch das Verstärkerelement fliessenden grossen Gleichstrom i_2 in gleicher Weise variieren lässt wie der durch die Sprachenergie «gewellte» Strom i_1. Es entsteht demzufolge das Strombild der Fig. 2b.

Es ist nun leicht, den so erzeugten grossen Wechselstrom $i_2\sim$ vom Gleichstrom i_2 zu trennen (Fig. 2c) und ihn mittels Lautsprecher wieder in akustische Energie umzuwandeln.

Das Verhältnis

$$\frac{i_2\sim}{i_1\sim}$$

gibt den Stromverstärkungsgrad des Verstärkers an, während das in der Praxis wichtigere Verhältnis

$$\frac{U_2\sim}{U_1\sim}$$

das direkte Mass für den Verstärkungsgrad der Schaltung darstellt.

Nach dieser kurzen Zusammenfassung der Haupteigenschaften eines elektronischen Verstärkers sollen nun die Beschaffenheit solcher Elemente sowie die physikalischen Gesetze, nach denen sie funktionieren, betrachtet werden.

Bis vor einigen Jahren hat uns die Elektronenröhre, deren einfachste Art — die Triode — in Fig. 3 dargestellt ist, durch ihre sehr vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in Staunen gesetzt. Sie erfüllt die aufgestellte Bedingung, mit wenig Wechselspannung auf der Steuerseite, grosse Wechselströme — resp. Wechselspannungen auf der Sekundärseite zu bewirken, voll und ganz.

Doch obschon die Existenz der Elektronenröhren eigentlich der Grund für die fast explosive Entwicklung der elektrischen Nachrichtentechnik, der elektronischen Rechenmaschinen sowie raffinierter Steuer- und Regelsysteme aller Art war, ist sie doch heute auf dem besten Wege dazu, das tragische Sprichwort «Das Bessere ist der Feind des Guten» im negativen Sinne ertragen zu müssen. Der in Fig. 4 dargestellte Transistor, wiederum versehen mit einer

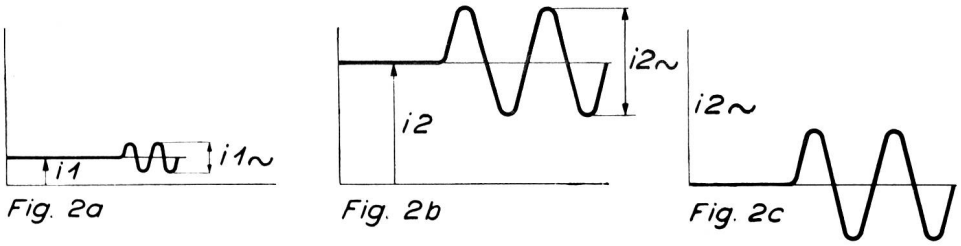


Fig. 2a Fig. 2b Fig. 2c

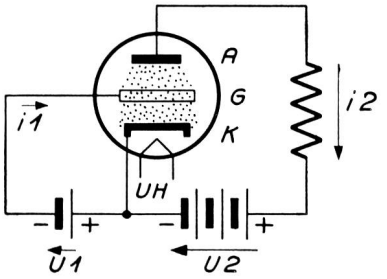


Fig. 3

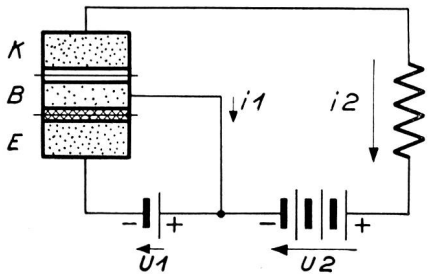
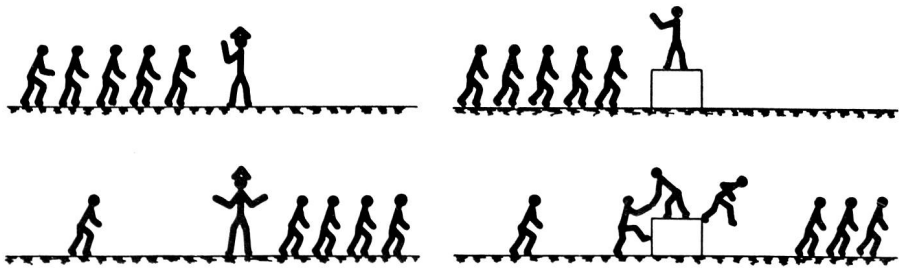


Fig. 4



Eintrittselektrode, einer Steuerelektrode und einer Austrittselektrode analog der Darstellung des gewünschten Verstärkerelementes in Fig. 2 ist heute daran, die Elektronenröhre aus immer mehr Anwendungsgebieten zu verdrängen.

Anhand der Fig. 3 und 4 sollen kurz die beiden Hauptunterschiede zwischen einer Elektronenröhre und einem Transistor betrachtet werden. Bekanntlich muss eine Elektronenröhre zuerst geheizt werden, und zwar elektrisch mit Hilfe des Heizfadens, bevor sie zu funktionieren beginnt. Die Elektronen treten nur bei grosser Hitze aus der Kathode aus und bewegen sich durch das Röhrenvakuum gegen die Anode. Die Zahl der durch das Gitter zur Anode fliessenden Elektronen ist abhängig von der Spannung des Gitters, d.h. mit Hilfe der Gittervorspannung wird der Elektronenfluss von der Kathode zur Anode in seiner Menge reguliert. Die Stromsteuerung erfolgt also durch die blosse Variation der negativen Spannung am Gitter fast leistungslos.

Bildlich kann das Gitter einer Elektronenröhre mit einem Polizisten verglichen werden, welcher ohne Energie, sondern nur durch seine Autorität den Strom der Arbeiter, die auf der rechten Seite zur Arbeit gehen wollen, reguliert und dementsprechend die geleistete Arbeit sinngemäss steuert.

Der in Fig. 4 schematisch dargestellte Transistor besteht zur Hauptsache aus einem winzigen Stück Germanium[1]) oder Silizium[1]), welches durch Beimengen von Fremdstoffen so präpariert wird, dass drei elektrisch verschiedenartige Schichten entstehen, wobei jedoch die erste und letzte Schicht sozusagen gleich sind. Ganz oberflächlich kann nun die Wirkungsweise der Transistoren folgendermassen erklärt werden:

Der erste und die letzte Schicht — der Emitter und der Kollektor, wie in der Fachsprache gesagt wird — zeichnen sich durch eine relativ hohe, die Zwischenzone — die Basis — durch eine niedrige elektrische Leitfähigkeit aus. Es ist leicht verständlich, dass bei einem Elektronenfluss vom Emitter zum Kollektor vor der Basis ein Gedränge entsteht, weil durch die Basis nur wenige Elektronen hindurchkönnen, während in der Übergangszone von der Basis zum Kollektor fast eine Leere von Elektronen entsteht, weil die ankommenden Elektronen immer sofort über die gut leitende Kollektorzone und durch den Verbraucherwiderstand — der z. B. wie im Bild 2 ein Lautsprecher sein kann — in den +Pol der Batterie gesaugt werden.

Durch Anlegen einer kleinen Hilfsspannung U_1 an den Emitter und die Basis, welche den kleinen Strom i_1 zur Folge hat, werden die Elektronen für ihren beschwerlichen Weg durch die Basis angetrieben. Damit wird der Stromfluss i_2, welcher ohne die Spannung U_1 verschwindend klein ist, gross. Der kleine Strom i_1, der infolge der Spannung U_1 fliesst, verursacht also den grossen Strom i_2.

Bildlich gesprochen muss der Polizist, der bei der Elektronenröhre nicht zu arbeiten, sondern nur die Arme zu bewegen braucht, beim Transistor Hand anlegen. Er muss alle Arbeiter, die auf der rechten Seite arbeiten wollen, über eine Schwelle heben. Bringt er diese kleine Energie nicht auf, dann muss die grosse Arbeitsleistung auf der rechten Seite aufhören.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Röhren und den Transistoren sind also die folgenden:

1. Die Röhre muss zuerst aufgeheizt werden, bevor sie zu arbeiten beginnt. Der Transistor ist nach dem Einschalten sofort einsatzbereit, weil die für den Stromfluss notwendigen freien Elektronen im Stoff vorhanden sind.
2. Der Transistor kann mit Speisegleichspannungen bis hinunter zu 1 V einwandfrei arbeiten, während die Röhren meistens eine höhere Anodenspannung als 50 V verlangen.
3. Der Transistor braucht für die Steuerung elektrische Leistung, während wir bei der Elektronenröhre im Steuerkreis fast keinen Strom, sondern nur eine Spannung benötigen. Die Steuerleistung ist also sehr klein. Dieser Nachteil des Transistors lässt sich jedoch durch geschickten Aufbau der Schaltungen weitgehend eliminieren.

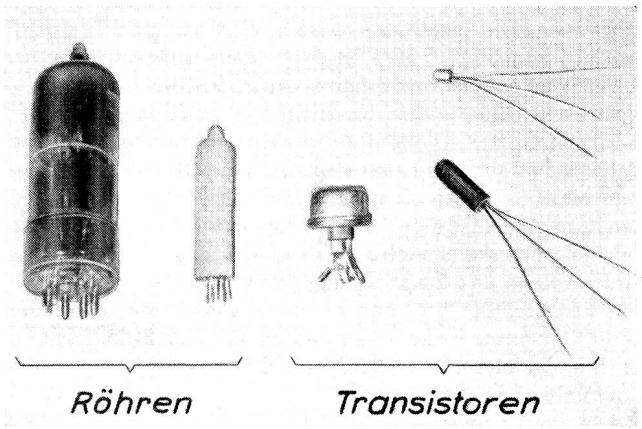


Fig. 5

4. Die Transistoren sind — wie Bild 5 zeigt — in den Abmessungen viel kleiner und — infolge ihres Aufbaus — viel unempfindlicher in bezug auf Erschütterungen und Stösse.
5. Die Lebensdauer der Transistoren kann bei sorgfältiger Herstellung 10 bis 100mal grösser sein als diejenige der Röhren, welcher durch das langsam schlechterwerdende Röhrenvakuum und die infolge der grossen Hitze sich abnützenden Kathode eine Grenze gesetzt ist.

Die Vorteile des Transistors gegenüber den Röhren sind unbestritten und werden durch die rasche Weiterentwicklung auf dem Gebiete der Halbleitertechnik stets grösser.

Nach dieser kurzen allgemeinen Einleitung soll nun versucht werden, mit Hilfe möglichst einfacher physikalischer Gesetze die Funktionsweise der Transistoren zu erklären. Hierzu ist ein kleiner Einblick in den Aufbau der Atome nötig.

Fig. 6

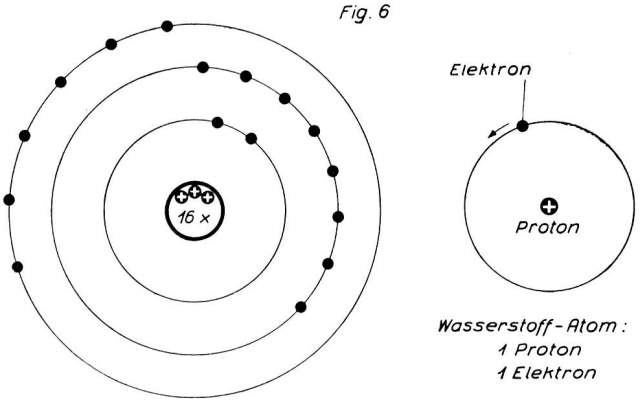


Fig. 6 zeigt schematisch den bekannten Aufbau eines Atoms. Jedes der 92 bekannten natürlichen Elemente ist elektrisch dadurch gekennzeichnet, dass es eine bestimmte Anzahl Elektronen, die negativ geladen sind und die gleiche

[1]) Diese beiden Elemente stellen die Grundbaustoffe der Transistoren dar. Ohne zwingenden Grund wird in der Folge des Aufsatzes der Germanium-Transistor betrachtet. Die Wirkungsweise des Silizium-Transistors ist genau analog.

Zahl Protonen mit einer positiven Ladung besitzt. Die Atome sind also nach aussen hin neutral. Das kleinste Atom — das Wasserstoffatom — besitzt ein Elektron und ein Proton, währenddem das schwerste Element, das Uranium, im Besitze von 92 Elektronen und dementsprechend 92 Protonen ist. Dass es in diesen Atomen noch andere Partikel gibt, z. B. die Neutronen, die keine Ladung besitzen, fällt hier ausser Betracht, weil wir uns nur für die am Entstehen elektrischer Ströme und Spannungen verantwortlichen Teilchen, also die negativen Elektronen und die positiven Protonen interessieren.

Nach dem Coulombschen Gesetz ziehen sich entgegengesetzte Ladungen an, während sich gleichartige Ladungen abstossen. Die Elektronen werden also von den Protonen im Kern angezogen. Nun ist es ja heute sehr leicht zu erklären, was getan werden muss, um zu verhindern, dass die Elektronen durch die elektrische Anziehungskraft der +Protonen im Kern nicht auf diesen gezogen werden. Die Natur behandelt die Elektronen wie einen Erdsatelliten, indem sie ihnen eine so grosse Umlaufgeschwindigkeit um den Kern gibt, dass sich die Zentrifugalkraft, die auf die Masse des Elektrons radial nach aussen wirkt und die Coulombsche Kraft, welche das Elektron nach innen zieht, aufheben. Bei den Erdsatelliten hat man es nach aussen auch mit der Zentrifugalkraft, nach innen jedoch mit der Erdanziehung zu tun, welche nach ähnlichen Gesetzen wirkt wie die Coulombsche Kraft.

Die Fig. 7a zeigt, dass nicht alle Elektronen den gleichen Abstand vom Kern haben. Die Naturgesetze, welche nur mit Hilfe der Quantentheorie, und auch dann erst nur teilweise bis zum genauen Aufbau der Atome verstanden werden können, machen dem Atom für sein Verhalten bestimmte Vorschriften.

Fig. 7a

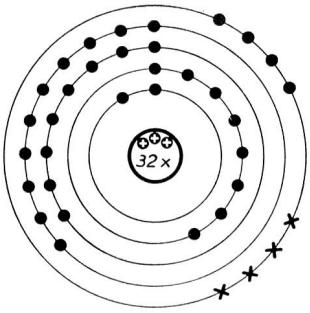
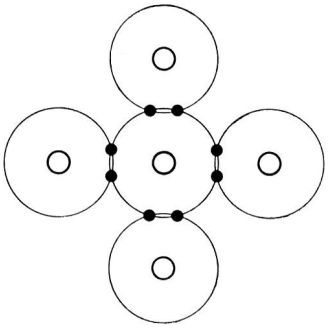


Fig. 7b



Germanium - Atom

Die für die nachfolgenden Betrachtungen wichtigste Vorschrift verlangt, dass die Elektronenbahnen der Atome mit genau festgelegten Anzahlen von Elektronen belegt sind. Ohne auf die Besonderheiten dieses Naturgesetzes einzutreten, kann man sich einfach merken, dass bei dem uns besonders interessierenden Element Germanium nach dem vorschriftsmässigen Auffüllen einiger Bahnen auf der äussersten noch 4 Elektronen übrig bleiben. Die Bahn sollte jedoch 8 Elektronen besitzen. Das Atom hilft sich nun so, indem es sich eng mit 4 Nachbaratomen verbindet und mit diesen je 2 Elektronen gemeinsam verwaltet. Diese gegenseitige Bindung der Atome ist in Fig. 7b schematisch dargestellt. Vereinfachend sind nur die äussersten, unvollständigen Elektronenbahnen der Atome gezeichnet.

Bei einer solchen Zusammenfügung der Atome befinden sich nun tatsächlich 8 Elektronen auf der äussersten Bahn, und zwar 4 eigene und 4 von den Nachbarn. Alle 8 Elektronen können nun wahlweise um einen der 5 Kerne fliegen. Dass die Atome durch diese gemeinsame Verwaltung eng miteinander verbunden sind, kann man sich leicht vorstellen, ohne auf die von den Atomphysikern erbrachten mathematischen Beweise eintreten zu müssen.

Die Zahl der Nachbaratome, die ein Atom auf Grund seiner Anzahl fehlender Elektronen an sich binden will, wird «Valenz» oder «Wertigkeit» des betreffenden Elementes genannt. Das dargestellte Germaniumatom ist also 4wertig. Die Elektronen auf der äussersten Bahn werden «Valenzelektronen» genannt.

Die strenge Absicht jedes einzelnen Atoms, immer genau 4 Nachbaratome um sich zu haben, bedingt beim Aufbau vieler Atome zu einem festen Stück eine genaue geometrische Anordnung. Die für das Germanium bedingte Kristallstruktur, wie diese geometrische Form genannt wird, ist in Fig. 8 ersichtlich.

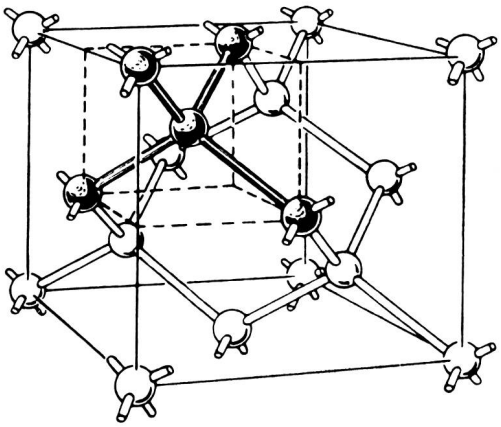


Fig. 8

Die 4 Balken, die gleichmässig auf die Atomoberfläche verteilt sind, geben die Richtung an, in welcher die 4 Nachbaratome angeordnet sein müssen.

Anhand der Fig. 7a soll nun noch die Wirkung eines zweiten fundamentalen Naturgesetzes, nämlich des allgemeinen Energie-Gesetzes, betrachtet werden. Die um den Atomkern fliegenden Elektronen haben eine bestimmte Energie in sich. Diese setzt sich zusammen aus der kinetischen, d. h. der Bewegungs-Energie, und der potentiellen, d. h. der Energie der Höhe. — Je schneller ein Flugzeug fliegt, desto mehr Arbeit muss geleistet werden, um es abzustoppen und je höher es fliegt, desto mehr Energie musste beim Start in die Maschine gepumpt werden, um sie auf diese Höhe hinaufzubringen. — Genau gleich verhält es sich mit den Elektronen, nur in etwas anderem Maßstab. Mit Hilfe relativ einfacher Mathematik kann gezeigt werden, dass die Gesamtenergie der einzelnen Elektronen auf den äussersten Bahnen am grössten, auf den innersten am kleinsten ist.

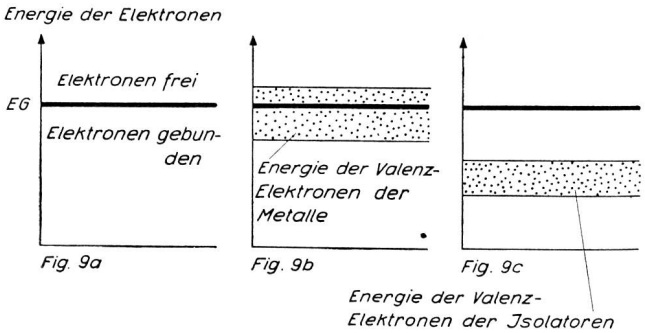


Fig. 9a Fig. 9b Fig. 9c

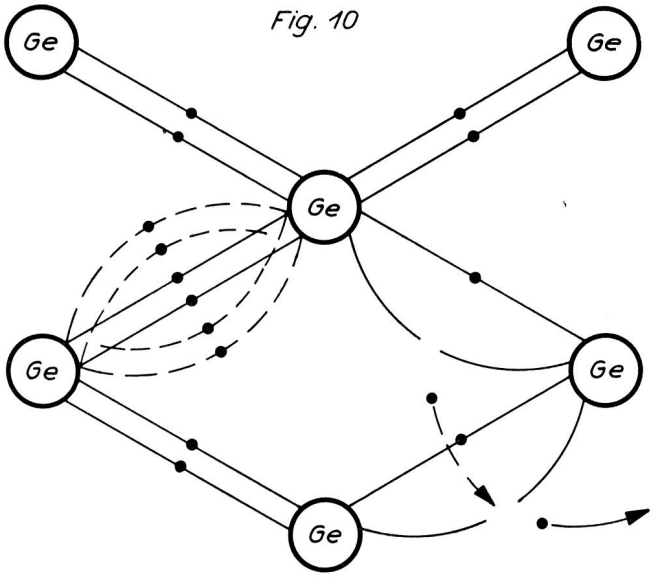
Wird einem der energiereichen Elektronen der äussersten Bahn noch mehr Energie zugefügt, als es bereits hat, dann gelingt es, dieses aus seiner Bahn herauszulenken und sozusagen im Raum der Atome frei herumfliegen zu lassen. Fig. 9 veranschaulicht die Energieverhältnisse.

Unterhalb der Austrittsenergiegrenze EG sind die Elektronen an den Atomkern gebunden, während Elektronen, deren Energie grösser als die Austrittsenergie ist, sich frei bewegen können.

Die freien (d. h. also die energie-reichen) Elektronen sind es nun, die das Zustandekommen eines elektrischen Stromes ermöglichen. Sie lassen sich durch eine kleine elektrische Spannung antreiben und fliegen in der Richtung des elektrischen Feldes. Die Natur hat es so eingerichtet, dass ein Teil der Valenzelektronen der Metalle dauernd eine so grosse Energie hat, dass sie permanent frei sind. Die Energiezone der freien Elektronen wird das «Leitungsband» genannt. Umgekehrt ist die Energie der Valenzelektronen der Isolatoren so klein — sie ist in Fig. 9c dargestellt — dass die Elektronen weit davon entfernt sind, sich frei zu bewegen. Die Isolatoren gestatten deshalb keinen Stromfluss.

Nun ist es aber erfahrungsgemäss so, dass auch der beste Isolator noch etwas stromleitend ist. Zudem ist die Leitfähigkeit allgemein um so grösser, je höher die Temperatur steigt. Diese Tatsache kann folgendermassen erklärt werden: Bekanntlich ist auch die Wärme eine Energieart. Das Wärmegefühl, das man empfindet, wenn man z. B. die Hand in warmes Wasser legt, rührt von der Bewegung der Wassermoleküle und deren Aufprallen auf die Hand her. Je grösser die Temperatur ist, desto schnellere Bewegungen führen die Moleküle und Atome aus.

Durch dieses Wärmeschwirren der Atome kommt es vor, dass Elektronen aus ihrer Bindung sozusagen herausgeschleudert werden. Fig. 10 veranschaulicht diesen Vorgang schematisch.

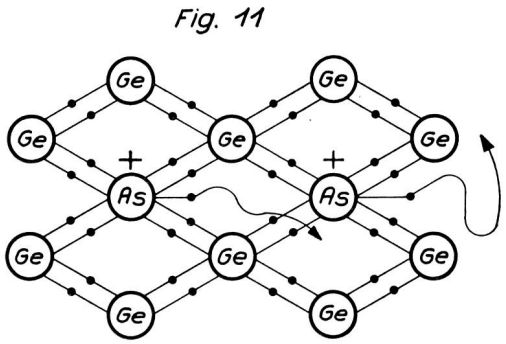


Generation und Rekombination

Sie stellt den in die Ebene projizierten Germaniumkristall dar. Jedes Atom ist wieder mit 4 Nachbaratomen verbunden und verwaltet — durch die zwei Verbindungsfäden und die darauf liegenden Punkte schematisch dargestellt — mit jedem zwei Elektronen gemeinsam. Die herausgeschleuderten Elektronen verhalten sich gleich wie die freien Elektronen der Metalle, d. h. sie gestatten einen Stromfluss. Diese herausgeschleuderten Elektronen bleiben aber nicht dauernd frei, sondern sie werden über kurz oder lang wieder von einem Atom eingefangen und neu gebunden. In der Fachsprache sagt man, dass beim Herausschleudern der Elektronen ein Loch entsteht. Dieses Loch kann eigentlich als positive Ladung betrachtet werden, denn dort, wo aus einem elektrischen Gleichgewichtszustand eine negative Ladung — also das freiwerdende Elektron — wegfliegt, bleibt effektiv ein gleich grosser Überschuss an positiver Ladung zurück. Auf Grund dieser Überlegung werden in der weitern Folge des Aufsatzes diese entstehenden Löcher als fiktive, positive Ladungen betrachtet, was gleichbedeutend ist mit fehlender negativer Ladung. Die durch die Wärmebewegung ermöglichte Befreiung eines Elektrons aus seiner Valenzbindung und das hiedurch erfolgende Entstehen eines Loches nennen wir «Generation». Das Wiedereinfangen eines Elektrons und damit das Verschwinden eines Loches wird «Rekombination» genannt. Zwischen diesen zwei Vorgängen herrscht ein Gleichgewicht, indem in einem Kristall immer gleichviel Generationen wie Rekombinationen stattfinden. Je häufiger diese beiden Vorgänge jedoch vor sich gehen, desto mehr freie Elektronen sind in jedem Zeitmoment vorhanden, desto grösser ist also die Leitfähigkeit des Stoffes.

Das Energieband der Valenzelektronen der sogenannten Halbleiter liegt, wie das der Isolatoren, auch unter der wichtigen Austrittsenergiegrenze, jedoch sehr nahe daran. Es ist deshalb leicht verständlich, dass durch die Wärmeenergie viele Elektronen aus ihrer Gebundenheit befreit und ins Leitungsband geschickt werden. Es sind also dauernd ziemlich viele freie Elektronen vorhanden; es fallen jedoch wegen des sich einstellenden Gleichgewichtszustandes auch dauernd wieder viele Elektronen ins Valenzband zurück. Die dauernde Generation und Rekombination ist also bei den Halbleitern stark, ihre elektrische Leitfähigkeit ist deshalb besser als diejenige der Isolatoren.

Die Halbleiter lassen sich nun jedoch ausser durch dieses Wärmeschwirren noch auf eine andere Art, nämlich durch künstliche Verunreinigung mehr oder weniger stark stromleitend machen. Diese Verunreinigung erfolgt in Form von 3- oder 5wertigen Atomen, welche im Kristallgefüge des Germaniums jeweils ein Atom verdrängen.



n-Halbleiter

An Hand der Fig. 11 soll zuerst untersucht werden, was die Beimengung von 5wertigen Atomen, z. B. Arsen-Atomen, zur Folge hat.

Das 5. Valenzelektron des Arsen-Atoms wird für eine Bindung mit den 4 Nachbargermaniumatomen nicht gebraucht. Das Elektron wird deshalb ins Leitungsband abgegeben und vergrössert dadurch die Leitfähigkeit des Germaniumkristalls.

Fig. 11a zeigt einesteils die bindungsmässig überzähligen, freibeweglichen Elektronen des zugefügten 5wertigen Atoms und anderseits die Elektronen, die durch die Wärmebewegungen frei werden und im festen Verband der gebundenen Elektronen ein Loch hinterlassen. Die beiden Pfeile in der Figur sollen die dauernde Generation und Rekombination veranschaulichen.

Die «Generation» und «Rekombination» ist örtlich nicht überall möglich. Die meisten dieser Vorgänge passieren an fehlerhaften Stellen, so wie in den Randschichten des Kristalls. Dieser kann so gezüchtet werden, dass die Rekombinations- resp. Generationsstellen häufig oder selten sind. Die Stellen sind im Bild 11a durch die Unterbrechungen im Trennungsstrich zwischen der positiven Grundladung und den freien Elektronen schematisch dargestellt.

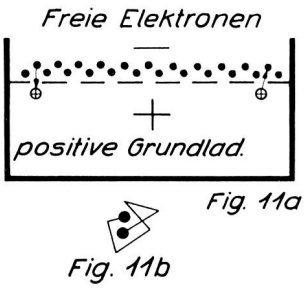


Fig. 11a

Fig. 11b

Die freien Elektronen führen — durch die Wärme angeregt — Bewegungen aus und stossen dauernd aneinander, so dass ihre Bahn gemäss Fig. 11b aussehen kann.

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung werden die Elektronen von links nach rechts getrieben, d. h. es entsteht ein Elektronenstrom (Fig. 11c). Diese gerade Bewegung nach rechts überlagert sich der Zickzack-Bewegung des Bildes Fig. 11b, so dass etwa ein Elektronenweg nach Fig. 11d entsteht.

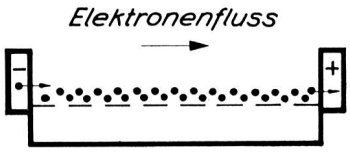


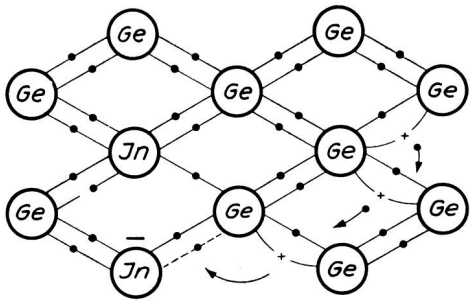
Fig. 11c

Fig. 11d

Die Leitfähigkeit des Germaniums wird also durch Verunreinigung mit 5wertigen Atomen stark vergrössert. Weil es die 5. Valenzelektronen der beigemengten 5wertigen Atome sind, die eine Verbesserung der Leitfähigkeit bewirken, nennt man einen solchen Halbleiter «Überschussleiter» oder «n-Halbleiter». (n heisst negativ und bezieht sich auf die negativen Ladungsträger, d. h. die 5. Valenzelektronen.)

Wird das Germanium mit einem 3wertigen Stoff (Fig. 12), z. B. mit Indium verunreinigt, so fehlt jeweils in einer der 4 Bindungen ein Elektron, obschon jedoch der Stoff im gesamten elektrisch neutral ist. Die entstandene Bindungslücke lässt sich nun durch ein Elektron, das durch die Wärmebewegung aus seiner Bindung herausgeschleudert wurde, ausfüllen. Dafür hinterlässt natürlich dieses gestohlene Elektron an seinem alten Platz ein Loch, welches sich wiederum ein anderes freies Elektron verschaffen und ein neues Loch erzeugen muss. Genau wie die bindungsmässig freien Elektronen des vorhin besprochenen n-Hablleiters sich im Kristallgefüge frei bewegen können, bewegen sich hier beim sogenannten Mangel- oder p (positiv)-Halbleiter die Elektronenlücken, die sogenannten Löcher frei im

Fig. 12



p-Halbleiter

Kristallgefüge. Sie stellen einen Fluss fehlender negativer Ladungen, also effektiv positiver Ladungen dar, mittels welchen genau wie mit den freien Elektronen ein Stromfluss zustandekommt (Fig. 12a). Ähnlich wie die freien Elektronen der Fig. 11a führen die freien Löcher Zickzack-Bewegungen aus (Fig. 12b). Am besten kann man sich diesen sogenannten Löcherstromfluss vorstellen, wenn wieder eine Spannungsquelle angelegt wird. (Fig. 12c) Auf der —Seite treten dauernd Elektronen ein und füllen die durch die angelegte Spannung von rechts nach links getriebenen Löcher ständig aus. Bei der +Seite werden die dauernd durch Generation entstehenden freien Elektronen abgesaugt. Es entstehen also hier dauernd Löcher, von denen wir vereinfachend annehmen wollen, dass sie aus dem +Pol der Stromquelle austreten. Ein Löcherstrom zeichnet sich also, im Gegensatz zum Elektronenstrom des n-Halbleiters, dadurch aus, dass die Löcher aus dem +Pol austreten und nach dem —Pol fliessen.

Fig. 12a

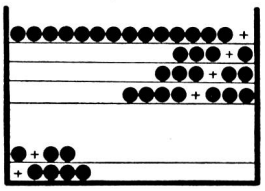


Fig. 12b

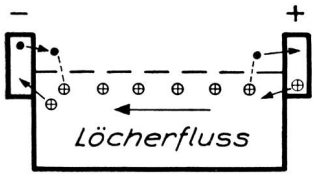


Fig. 12c

Fig. 12d

Damit sind die beiden, durch verschiedenartige Verunreinigung der Germaniums entstehenden Leitertypen, der p-Halbleiter und der n-Halbleiter in bezug auf ihre elektrische Leitfähigkeit kurz dargelegt. Es soll nun betrachtet werden, was entsteht, wenn solche verschiedenartige Halbleiter miteinander verbunden werden. (Fortsetzung folgt)