Digitalisiert 05/2008 von Thomas Günzel für www.radiomuseum.org mit freundlicher Genehmigung der ETZ-Redaktion.
Die aktuellen Ausgaben der ETZ finden Sie unter www.etz.de

Ausgabe B

ETZ ELEKTROTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

Der Elektrotechniker

ORGAN DES VERBANDES DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER (VDE)

7. Jahrgang | Wuppertal, 21. August 1955 | Heft 8

# Transistoren und ihre Fertigung

Von **Johannes Malsch,** Ulm*)

DK 621.314.7

Die Entwicklung der Halbleiterverstärker der letzten Jahre war außerordentlich vielseitig, wie dies bereits aus den verschiedenen vorgeschlagenen Bauarten ersichtlich ist (z. B. Spitzentransistor, p-n-p- und n-p-n-Flächen-Transistor, Oberflächensperrschicht-Transistor, Unipolar- und Analog-Transistor, Fieldistor, Drift-Transistor, p-n-i-p-Transistor, Transistor-Tetrode und andere). Im Laufe dieser Entwicklung zeichneten sich Wege ab, die, gestützt auf vielseitige und sehr tiefgehende Forschungen, zur Fertigung bestimmter Typen führten.

Heute wird eine Reihe von Transistoren, meist noch in verhältnismäßig kleinen Stückzahlen, nach technisch weitgehend durch entwickelten Verfahren hergestellt. Für einige Bauarten, die in langjährigen Erfahrungen auch von der Schaltungseite aus untersucht und erprobt sind, zeichnen sich bereits die Wege zu einer rationellen Massenfertigung ab.

Seit den ersten Arbeiten über den Transistoreffekt sind nun etwa 7 Jahre vergangen. Heute ist man wohl so weit gekommen, daß man von den Anfängen einer Großfertigung auf der ganzen Welt sprechen kann. Die meisten Jahre waren erfüllt von Hoffnungen, die sich an theoretische und experimentelle physikalische Arbeiten knüpften, aber auch von zahlreichen Enttäuschungen, wie sie sich bei der technischen Verwirklichung von Halbleiter-Verstärkern aus immer neuen Fehlerquellen, die bei der Fabrikation auftraten, ergaben. Noch in den vergangenen Jahren zeigten sich bei vielen maßgebenden Firmen im In- und Ausland erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Ausgestaltung der technisch herzustellenden Typen. Da in letzter Zeit in unzähligen Aufsätzen in Fachzeitschriften auf die außerordentlichen Schwierigkeiten beim Transistorbau und deren physikalische Ursachen hingewiesen worden ist, soll hier nur kurz noch einmal darauf hingewiesen werden.

## Die Transistor-Bauarten

### Der Spitzen - Transistor

Bekanntlich begann die Entwicklung der Transistoren mit dem Spitzen-Transistor[1]), der darin besteht, daß auf ein halbleitendes Plattchen von Germanium zwei Wolframspitzen in unmittelbarer Nachbarschaft aufgesetzt sind, denen auf der anderen Seite eine sperrschichtfrei aufgebrachte flächenhafte Elektrode gegenübersteht. Der Transistoreffekt beruht dann darauf, daß die Strome zwischen der einen Spitze, Kollektor genannt, und der flächenhaften Elektrode, dem Block- oder Basis-Anschluß, dadurch gesteuert werden, daß bestimmte Ladungsträger von der zweiten Spitze, dem Emitter, in den Halbleiter-Werkstoff hinein injiziert werden.

Im Anschluß an die grundlegende Arbeit von *Bardeen* und *Brattain* im Jahre 1948 ging man zunächst daran, derartige Spitzen-Transistoren technisch herzustellen. Heute hat man erkannt, daß die Fertigung gut reproduzierbarer Spitzen-Transistoren innerhalb praktisch zulässiger Toleranzen ein technisch nahezu unlösbares Problem darstellt. Es kommt dabei nicht nur darauf an, sehr feine Spitzen in genau gleicher Weise im Abstand von etwa einem hundertstel Millimeter auf ein Germaniumplättchen aufzusetzen, wobei das Germaniumplättchen genau reproduzierbare Eigenschaften haben muß; es gilt ferner die Spitzen mit gleichem Druck aufzubringen, sie dann etwa durch Impulse hoher Stromdichte in gleicher Weise so zu „formieren", daß dabei reproduzierbare Gleichrichter-Kennlinien entstehen. Man muß ferner die Oberflächen der Germaniumplättchen in gleicher Weise behandeln und schließlich dieses empfindliche Gebilde reproduzierbar serienmäßig luftdicht einbauen können.

Nachdem heute einigermaßen zu übersehen ist, was z. B. beim Formieren an der Oberfläche des Germaniums vor sich geht, und nachdem wir wissen, welchen vielseitigen, empfindlichen Einflüssen eine freie Halbleiteroberfläche ausgesetzt ist, hat man allgemein das Ziel, aus der ursprünglichen Anordnung des Spitzen-Transistors einen brauchbaren Verstärker zu machen, aufgegeben. Wenn der Spitzen-Transistor heute noch einige Bedeutung hat, so nur deshalb, weil er infolge seiner instabilen Kennlinie und der kleinen Kapazitätswerte für gewisse, besonders auch hochfrequente Schaltvorgänge, bei denen es auf sehr genaue Einhaltung der Kenndaten nicht ankommt, brauchbar ist. Es ist aber wohl heute schon ziemlich sicher, daß auch in der Schalttechnik der Spitzen-Transistor durch andere bei der Herstellung weniger empfindliche Gebilde ersetzt werden wird.

### Der Flächen - Transistor

Der Flächen-Transistor dagegen, der bereits im Jahre 1949 von W. *Shockley* theoretisch eingehend behandelt worden ist, wurde aus dem Zustand einer Laboratoriums-Fertigung heute weitgehend zu dem einer Serienfertigung in der Fabrik entwickelt. Es sei kurz auf diese sowohl für den Wissenschaftler als auch für den Techniker außerordentlich anregende Entwicklung, aber lediglich vom Standpunkt der Fertigung aus, eingegangen.

*Shockley* hatte seinen theoretischen Arbeiten ein ganz einfaches Bild zugrunde gelegt, nämlich das eines Germanium-Einkristalls, der nach dem Schema von *Bild 1* aus drei deutlich abgegrenzten Teilen besteht, von denen die beiden äußeren entgegengesetzten Leitungscharakter als der innere haben. Sind z. B. die äußeren Teile *p*- (positiv- oder löcher-)leitend, so muß der mittlere Teil *n*- (negativ- oder elektronen-)leitend sein. An den beiden äußeren Teilen befinden sich die Elektroden, die mit Emitter *E* und Kollektor *C* bezeichnet werden, während an der Mittelschicht der Germaniumblock durch die Elektrode B angeschlossen wird.

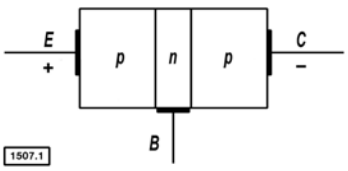



*Bild 1.* Schema des Flächen-Transistors *(p-n-p).*

*) Prof. Dr. phil. *J. Malsch* ist Leiter der Halbleiter-Entwicklung bei Telefunken.

1) *H. Bardtke:* Die Kristalldiode und ihre Weiterentwicklung. ETZ-B Bd. 5 (1953) S.17...20.

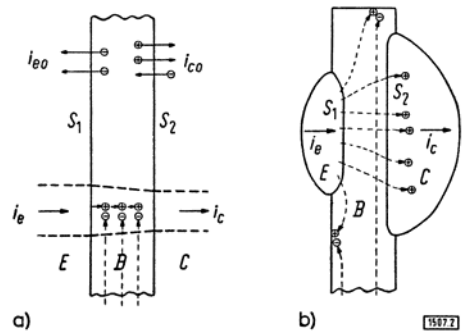



*Bild 2.* Physikalische Vorgänge im Flächentransistor.
a) Schematische Darstellung der Ströme und der Volumen-Rekombination im *p-n-p*-Transistor.
b) Stromverlauf im Legierungs-*p-n-p*-Transistor; schematische Darstellung der Oberflächen-Rekombination.
$i_e$ = Emitter-Nutzstrom $i_{e\,0}$ = Emitter- } Rückstrom
$i_c = \beta \cdot i_e$ = Kollektor-Nutzstrom $i_{c\,0}$ = Kollektor- }

In den USA wurde für diesen Anschluß die Bezeichnung Basis eingeführt, die inzwischen auch in das deutsche Schrifttum eingegangen ist. Wenn wir dafür hier noch den Ausdruck Block benutzen, so deshalb, weil der Ausdruck Basis von der Schaltungstechnik in Deutschland als Begriff für den gemeinsamen Anschluß zweier Vierpole, wie er auch bei Transistor-Schaltungen immer auftritt, vorweg genommen wurde.

Die wichtigsten Transistor-Verstärkerschaltungen sind bekanntlich die Block-Basisschaltung, bei der der Eingang zwischen *E* und *B*, der Ausgang zwischen *C* und *B* liegt und die Emitter-Basisschaltung, bei der *E* der gemeinsame Punkt von Eingang (bei *B*) und Ausgang (bei *C*) ist.

### Die physikalischen Vorgänge im Flächen-Transistor

*Shockley* hat nun bereits vor 6 Jahren den Verlauf und die Größe der einzelnen Ströme, die sowohl über den *p-n*-Übergang *EB (Bild 1)* in *Bild 2* mit $S_1$ bezeichnet, als auch über den *p-n*-übergang *BC (Bild 1)* ($S_2$ in *Bild 2*) und über den Blockanschluß herüberfließen, ausgerechnet. Er hat ferner ausführlich dargestellt, daß infolge der Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern im Blockraum der Mittelschicht diesem dauernd Ladungsträger von *B* aus nachgeliefert werden müssen, so daß auch nach *B* hin ein Strom abfließt.

In *Bild 2 a* und *2 b* sind diese Verhältnisse, die für den Transistorbau von entscheidender Bedeutung sind, am Beispiel des *p-n-p*-Transistors erläutert. Hier sind die Vorgänge im Blockraum, der durch die Grenzschichten $S_1$ und $S_2$ vom Emitter- und Kollektorraum, getrennt ist, schematisch dargestellt. In *Bild 2 a* sind die verschiedenen möglichen Teilströme und die Volumen-Rekombinationen angedeutet; *Bild 2 b* zeigt den Vorgang der Oberflächen-Rekombination bei einem *p-n-p*-Legierungstransistor, der im folgenden näher betrachtet wird. Über die Sperrschicht $S_1$ fließt zunächst infolge kleiner Spannungs-Unterschiede der Emitter-Nutzstrom $i_e$, der in unserem Beispiel aus sehr vielen positiven Ladungen (Löchern, auch als Defekt-Elektronen bezeichnet) besteht, und der sich durch die Blockschicht in die Kollektorschicht als Kollektor-Nutzstrom $i_c$ fortsetzt. Da der Eingang zwischen *E* und *B* niederohmig, der Ausgang zwischen B und C hochohmig ist, weil die Grenzschicht $S_1$ eine Gleichrichterstrecke in Fluß-, $S_2$ eine solche in Sperr-Richtung bedeutet, erhalten wir z. B. in Blockbasisschaltung eine hohe Spannungs-Verstärkung. Der Transistor wäre ideal, wenn der gesamte Emitter-Nutzstrom sich am Kollektor wiederfinden würde ($\beta = 1$) und wenn keine weiteren Ströme auftreten würden.

Nun treten aber eine Reihe von Nebeneffekten auf, die zu den bekannten Schwierigkeiten im Transistorbau führen. Zunächst geht ein Bruchteil der einströmenden Ladungen des Emitter-Nutzstromes dadurch verloren, daß diese positiven Ladungen mit den steuernden Elektronen des Blockraumes rekombinieren, so daß dauernd Elektronen von *B* aus nachgeliefert werden müssen.

Dieser Vorgang der Volumen-Rekombination ist in *Bild 2 a* dargestellt. Die Stärke des Emitter-Nutzstromes $i_e$ der sich natürlich über die ganze Breite $S_1$ erstreckt, ist hier durch Begrenzungen angedeutet, die sich im Blockraum einander nähern. Dieser Nutzstrom nimmt also infolge der Rekombinationen im Blockraum stetig ab; er sinkt im Kollektorraum auf den Betrag $i_c = \beta \cdot i_e$.

Derartige Rekombinationen treten nun nicht nur im Inneren des Blockraumes auf, sondern wie sich neuerdings immer mehr gezeigt hat, in sehr hohem Maße an den freien Oberflächen des Blockraumes, wo die Voraussetzungen zur Rekombination offenbar sehr viel günstiger sind als im Inneren. Dies ist in *Bild 2* dargestellt.

Es ist eine wesentliche Aufgabe der Transistor-Fertigung, diese Volumen- und Oberflächen-Rekombination so weit wie möglich herabzusetzen. Die Volumen-Rekombination wird durch Verwendung sorgfältig hergestellten Germaniums unterdrückt, in dem die mittleren Reichweiten der freien Ladungsträger, die in die Blockschicht eintreten (minority carriers) möglichst groß sind, jedenfalls größer als die Dicke der Mittelschicht. Die Oberflächen-Rekombination sucht man dadurch zu verringern, daß man die freien Oberflächen möglichst klein hält und sie sorgfältig durch geeignete Ätzverfahren behandelt.

Neben dem soeben betrachteten schädlichen Strom, der nach *B* hin abfließt, sind noch die in *Bild 2 a* eingetragenen Ströme $i_{e\,0}$ und $i_{c\,0}$ möglichst klein zu halten, die bei der Natur der Halbleiter, in denen stets positive und negative Ladungen vorhanden sind, nicht vermieden werden können[2]). In unserem Beispiel ist dies erstens ein Elektronenstrom, der von *B* nach *E* geht (Emitter-Rückstrom) und der den Nutzeffekt der Emission, vermindert, und zweitens ein Defektelektronenstrom von *B* nach C, der die Sperrfähigkeit der Schicht *BC,* also den Kollektor-Widerstand, herabsetzt. Dieser Kollektor-Rückstrom kann noch durch einen vom Kollektorraum kommenden Elektronenstrom erhöht werden. Beide Rückströme können grundsätzlich durch richtige Wahl des Germaniums, d. h. des Verhältnisses der Zahl der positiven zu der der negativen Ladungen, etwa ausgedrückt durch die spezifische Leitfähigkeit, auf günstigste Werte herabgesetzt werden[2]). Für den Kollektor-Rückstrom ist darüber hinaus die richtige Behandlung des *n-p*-Überganges zwischen *B* und C durch Ätzen der Oberfläche von größter Bedeutung.

### Probleme beim Transistorbau

#### Gesichtspunkte für Werkstoff-Auswahl und die Fertigung

Wir haben aus den bisherigen Ausführungen ersehen, daß es für den Bau von Transistoren zunächst wichtig ist, einen geeigneten Ausgangs-Werkstoff zu verwenden, damit die Neigung zu Rekombinationen im Blockraum möglichst

[2]) Es liegt in der Natur der Halbleiter begründet, daß das Produkt aus positiven Ladungen *p* und negativen Ladungen *n* eine Konstante C darstellt, die für das betreffende Halbleiterelement charakteristisch ist. Im *n*-Werkstoff der Blockschicht z. B. treten dann auch Löcher (positive Ladungen) von der Zahl p = *C/n* auf.

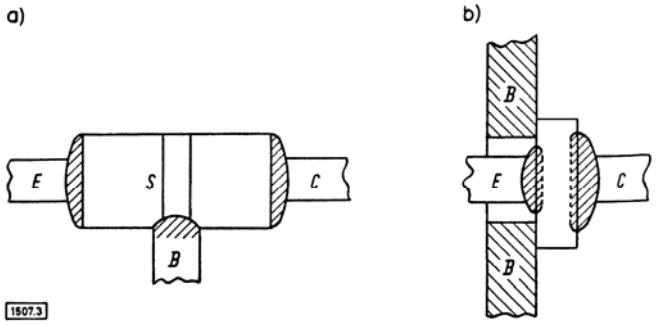



*Bild 3.* Blockanschluß; a) beim gezogenen, b) beim legierten Transistor.

gering bleibt. Er muß ferner in den beiden *p-n*-Grenzbereichen für die Gleichrichtung günstige Eigenschaften haben. Um diese zu erzielen, ist es notwendig, die Konzentration des Störstellengehaltes für die einzelnen Zonen richtig zu wählen und darauf zu achten, daß insbesondere in der Mittelschicht die Reichweite der Minderheitenträger genügend groß ist. Ferner ist es für die einzelnen Transistortypen wichtig, in welcher Weise sich z. B. beim *p-n-p*-Transistor der Übergang des *p*-Typs in den Grenzzonen zum *n*-Typ vollzieht. Dieser Übergang kann sich plötzlich oder verhältnismäßig langsam vollziehen.

Die technisch wichtigsten Werkstoff-Konstanten sind demnach die Leitfähigkeiten, die zusammen mit den Reichweiten der Minderheitenträger das Germanium hinreichend kennzeichnen. Dabei ist es oft erlaubt, die Reichweitenmessung durch andere Messungen, wie z. B. die der Gleichrichter-Wirkung des Ausgangs-Werkstoffs zu ersetzen. Ferner sollen die Oberflächen so beschaffen sein, daß die Oberflächen-Rekombination möglichst unterdrückt werden kann; und schließlich muß die Fertigstellung der Transistor-Elemente so durchgeführt werden, daß sich an den *p-n*-Übergängen keine Nebenschlüsse bilden.

Aber auch diese sich z. T. widersprechenden Forderungen reichen für die Herstellung guter Transistoren noch nicht aus. Hinzu kommen noch weitere Bedingungen, die sich, je nach dem Verwendungszweck, besonders unangenehm auswirken können. Diese hängen insbesondere mit den äußeren Anschlüssen zusammen. Um die Rekombination im Blockraum möglichst herabzusetzen, wird man die Anschlüsse so schmal wie möglich machen. Damit wird aber, schon wenn man von der schematischen Anordnung in *Bild 1* ausgeht, der Anschluß des Blockes zu einem Problem. Er ist stets mit einem Übergangs-Widerstand verbunden und sieht in einfacher Darstellung, je nach Art der Herstellung des Transistors, etwa wie in *Bild 3 a* oder *b* aus.

Man darf dabei nicht vergessen, daß der Übergangs-Widerstand bis zu sämtlichen Punkten der *p-n*-Grenzen reicht, daß es sich also um einen Ausbreitungs-Widerstand handelt, der um so größer wird, je schmaler die mittlere Steuerzone des Transistors ist. Legt man z. B. eine steuernde Spannung zwischen *E* und *B*, so wird an der Grenzschicht $S_1$ nur ein Teil davon wirksam, weil der ohmsche Spannungsabfall am Ausbreitungswiderstand (Block- oder Basiswiderstand genannt) für die Aussteuerung verloren geht.

Besonders für die Verstärkung hoher Frequenzen ist dieser Blockwiderstand verhängnisvoll. Hier müssen wir die Mittelschicht sehr dünn machen, damit die Laufzeit der Ladungsträger im Blockraum (besser gesagt: die Ausbildungszeit des Diffusionsprozesses im Blockraum) nur kurz ist. Für die Konstruktion guter Transistoren ist es also notwendig, den Blockwiderstand so weit wie möglich herabzusetzen.

Ein weiterer Gesichtspunkt für den Transistorbau muß aber eine gute Wärmeabfuhr von den Elektroden sein. Es ist bekannt, daß die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter außerordentlich stark temperaturabhängig sind. Um möglichst wenig temperaturabhängige Kennlinien zu erhalten, muß man also für gute Wärmeabfuhr vom Kollektor- und auch vom Blockanschluß sorgen.

## Herstellung von Mehrzonen - Kristallen

Gehen wir auf unser Prinzipbild *(Bild 1)* zurück, das den *Shockley*schen Berechnungen eines Flächen-Transistors zugrunde liegt. Es ist außerordentlich interessant, daß von dieser theoretischen Arbeit aus auch der Bau von Flächen-Transistoren begonnen wurde. Man versuchte zunächst, mit dem an sich bekannten Verfahren einen Einkristall herzustellen, der aus drei Zonen mit verschiedenen Eigenschaften nach der in der Skizze dargestellten Art besteht. Dies kann man, rein physikalisch gedacht, dadurch erzielen, daß man zunächst der Schmelze, aus welcher der Kristall gezogen wird, Spuren eines Elementes beigibt, die den Einkristall *p*-leitend machen (wie z.B. Gallium oder Indium). Während des Ziehens setzt man dann nach einer bestimmten Zeit ein

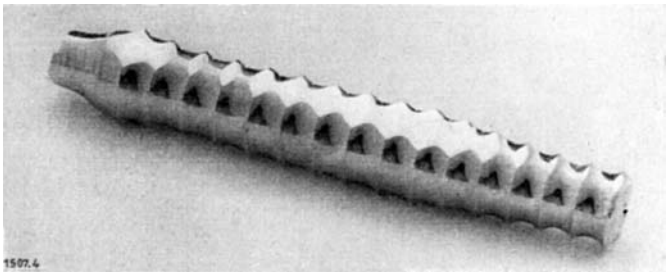



*Bild 4.* Rate-growing Kristall. Ein Teil der Oberfläche ist abgeschliffen, damit die *p-n*-Übergänge festgestellt werden können.

Element zu, das den Kristall in einen *n*-leitenden überführt (z.B. Antimon oder Arsen). Man muß dabei soviel von diesem Stoff einbringen, daß das vorher bereits zugesetzte p-Leitung liefernde Element überkompensiert oder, wie man auch sagt, überdopt wird.

Nachdem man nun um eine winzig kleine Strecke von einigen μ weiter gezogen hat (Blockschicht), muß man die Schmelze wiederum ändern, so daß sie wieder p-leitend wird. Man setzt also jetzt wieder soviel Gallium oder Indium zu, daß nun wieder das Arsen oder Antimon überdopt wird.

Tatsächlich haben eine Reihe von Firmen nach diesem Prinzip Transistoren hergestellt, allerdings aus fertigungstechnischen Gründen vom *n-p-n*-Typ, da sich eine von zwei n-Schichten eingeschlossene dünne *p*-Schicht mit diesem Verfahren leichter verwirklichen läßt.

## Das Zonen - Wachstums -Verfahren

Auf neue Erkenntnisse aufbauend, ist das Verfahren inzwischen durch ein eleganteres ersetzt worden. Man macht dabei von der Erfahrung Gebrauch, daß die Einbaufähigkeit der Stoffe, die man dem Germanium zusetzen muß, um *n*- oder *p*-Leitfähigkeit zu erhalten, von der Geschwindigkeit abhängt, mit der man den Kristall aus der Schmelze wachsen läßt.

Nun ist z. B. die Einbaufähigkeit derjenigen Stoffe, die *n*-Leitung ergeben und die eine kleine Einbaukonstante[3]) haben, wie z. B. Antimon, sehr viel empfindlicher auf Änderungen der Wachstums-Geschwindigkeit als die Einbaufähigkeit eines dreiwertigen Elementes mit großer Einbaukonstante wie z. B. Gallium. Man kann also durch Änderung der Wachstums-Geschwindigkeit erreichen, daß der Kristall abwechselnd *n*- oder *p*-leitenden Charakter hat, wenn man ihn abwechselnd langsam oder schnell wachsen läßt und ihn aus einer Schmelze zieht, welche die von vornherein *n*- oder *p*-Leitung hervorrufenden Bestandteile in richtigem Mengenverhältnis enthält. Die Wachstums-Geschwindigkeit wird dabei entweder durch Änderung der Ziehgeschwindigkeit oder der Temperatur der Schmelze oder durch gleichzeitige Änderung beider Größen möglichst sprungweise verändert.

Infolge der verschiedenen Wachstums-Geschwindigkeit ist äußerlich am Kristall schon die Verschiedenheit der Struktur erkenntlich *(Bild 4)*, so daß sich ein derartiger Kristall leicht derart in Scheiben zersägen läßt, daß jede Scheibe die drei den Transistor bildenden Zonen enthält. Aus den einzelnen Scheibchen werden dann die Transistoren herausgeschnitten. Durch besondere Ätzverfahren kann man die *p-n*-Übergänge sichtbar machen und genau lokalisieren.

Die Hauptschwierigkeit bei der Fertigstellung dieser Transistoren besteht darin, den Blockanschluß so anzubringen, daß dabei die Sperrschicht nicht verletzt wird. Dies wird bei einem Blick auf *Bild 3 a* ohne weiteres verständlich.

Man kann sich ferner leicht vorstellen, daß bei diesem Zonen-Wachstums-Verfahren das Einhalten konstanter Bedingungen, die für eine Massenfertigung die notwendige

[3]) Als Einbau- oder auch Segregations-Konstante *k* bezeichnet man das Verhältnis der Konzentration des zugesetzten Stoffes im Kristall $c_S$ (Solidus) zu der Konzentration in der Schmelze $c_L$ (Liquidus) im Gleichgewichtszustand, d. h. bei unendlich langsamer Wachstumsgeschwindigkeit. Für Antimon ist $k = 0{,}005$ und für Gallium $k = 0{,}1$.

Thomas Günzel 05/2008 für www.radiomuseum.org

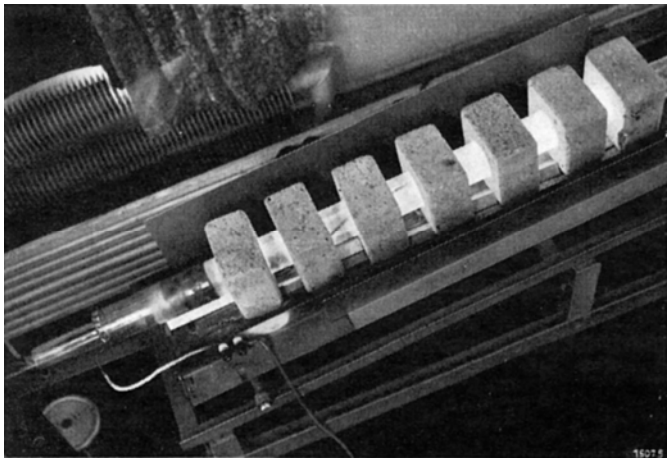


*Bild 5.* Zonenschmelze; Teilansicht.

Voraussetzung ist, nicht leicht zu erfüllen ist. Schon während des Ziehens eines Kristalles werden die aufeinanderfolgenden Schichten verschieden, da sich die Konzentration der Schmelze dauernd ändert.

Sehr störend für eine gleichmäßige Fertigung sind die Abweichungen, die durch kleine Schwankungen der Temperatur und deren Gradienten hervorgerufen werden können und Konzentrations-Unterschiede, die bei den geringen Zusätzen leicht, schon durch ungleichmäßigen Ausgangs-Werkstoff, auftreten können. Angesichts dieser Schwierigkeiten und der verhältnismäßig kurzen Zeit, die seit dem Auftreten des Zonen-Wachstums-Verfahrens vergangen ist, spielt es in der heutigen Gesamtfertigung noch eine verhältnismäßig geringe Rolle. Es hat aber den Anschein, daß es, besonders für Hochfrequenz-Transistoren, noch eine große Zukunft hat. Das in USA entwickelte Verfahren ist dort als „Rate-growing"-Prozeß bekannt.

### Der Legierungs-Transistor

Abschließend sei ein Blick auf das heute gebräuchlichste und weitgehend fabrikatorisch durchentwickelte Verfahren, das des Einlegierens geworfen. Wenn auch über dieses Verfahren schon zahlreiche Aufsätze bestehen, so ist es vielleicht doch lehrreich, einiges darüber zu erfahren, wie es heute in der Fabrikation durchgeführt wird.

Bei dem Einlegier-Verfahren wird, um z. B. einen *p-n-p*-Transistor herzustellen, von beiden Seiten Indium oder Gallium oder auch eine Legierung beider Metalle in bestimmter Zusammensetzung in ein Germaniumplättchen einlegiert, so daß ein Gebilde nach dem Schema von *Bild 3 b* entsteht. Für einen möglichst kleinen Blockwiderstand wird dadurch gesorgt, daß der Blockanschluß ringförmig ausgebildet wird. Der Aufbau eines solchen Transistors ist also von dem nach dem Rate-growing-Verfahren hergestellten Typ sehr verschieden.

Grundsätzlich unterscheidet er sich vom Rate-growing-Transistor zunächst durch den Ringblockanschluß[4]), der einerseits einen kleinen Blockwiderstand hat, anderseits aber gegenüber dem Anschluß des Rate-growing Transistors den Nachteil hat, daß die Blockschicht jetzt eine verhältnismäßig große freie Oberfläche, also die Gefahr großer Oberflächen-Rekombination aufweist.

Ein weiterer grundsätzlicher Unterschied besteht aber im Aufbau der p-n-Übergänge, die beim Rate-growing je nach der Ausbildung des Verfahrens mehr oder weniger weich gestaltet werden können und sich durch geeignete Variation von Temperatur- und Ziehgeschwindigkeit in bestimmter Weise ergeben, während sie, wie nähere Untersuchungen gezeigt haben, beim Legierungs-Transistor stets recht scharf sind.

Es würde zu weit gehen, hier auf die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren näher einzugehen. Die Technik des Anbringens der Zuleitungen zu den Elektroden derart, daß sie guten elektrischen und Wärme-Übergang verbürgen, hat man inzwischen ebenso gelernt wie die Technik des Ätzens der Germaniumoberfläche und der *p-n*-Übergänge, so daß ein Mindestmaß von Oberflächen-Rekombination und ein Höchstwert der Kollektor-Sperrwiderstände erreicht wird.

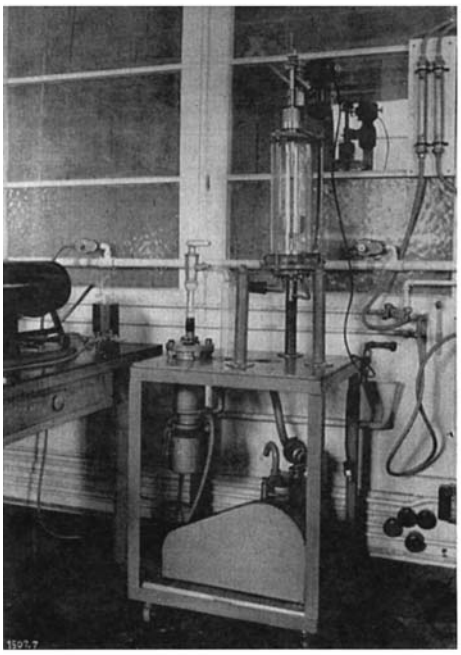


*Bild 7.* Kristall-Zieheinrichtung.

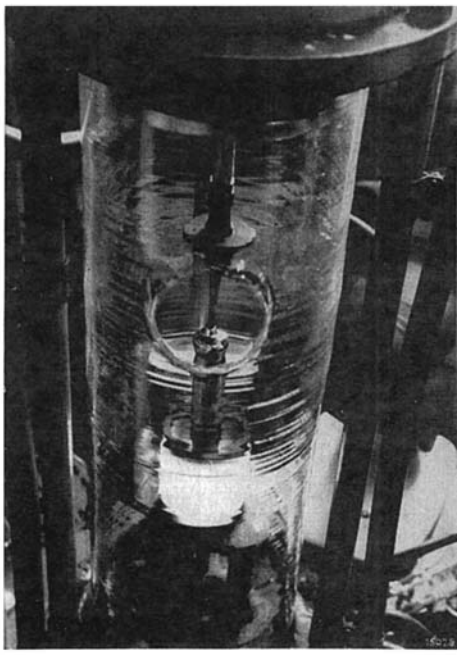


*Bild 8.* Blick durch das Klarquarzfenster der Zieheinrichtung auf einen gezogenen Einkristall.

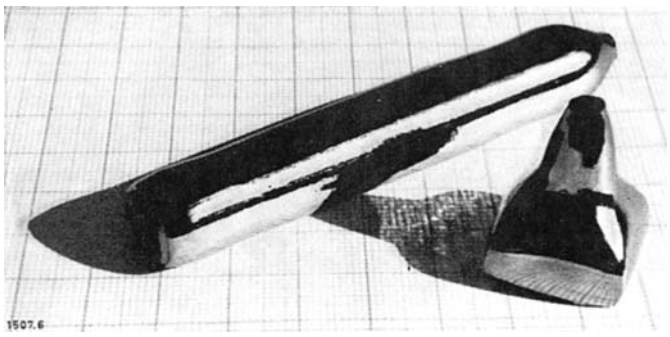


*Bild 6.* Einkristall und Impfkristall.

### Das Rauschen

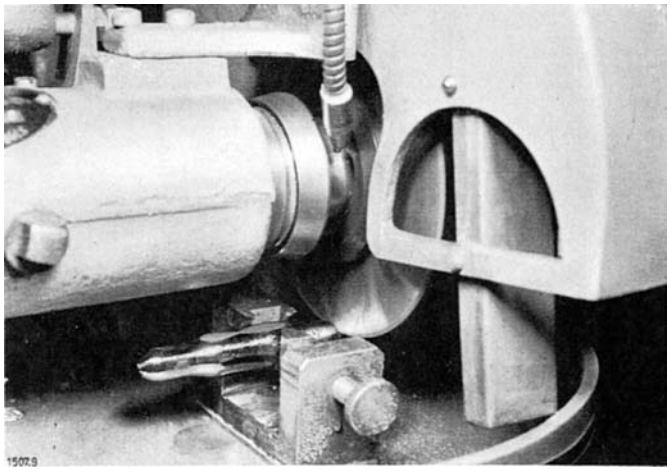
Noch nicht völlig geklärt sind die Ursachen und der Sitz des Rauschens, aber auch diesbezüglich weisen die heutigen Typen bedeutende Fortschritte gegenüber jenen auf, die etwa vor ein bis zwei Jahren auf den Markt gebracht worden sind.

## Die Fertigung von Transistoren

Der Werdegang des heutigen Legierungs-Transistors ist an Hand der *Bilder 5 ··· 12* schnell geschildert:

[4]) Für bestimmte, insbesondere Niederfrequenz-Typen, genügt auch ein einseitiger Anschluß, der fabrikationstechnisch gegenüber dem Ringblocktyp sowohl Vorteile als auch Nachteile hat und auch von einigen Herstellern benutzt wird.

Thomas Günzel 05/2008 für www.radiomuseum.org



Zunächst muß der geeignete Ausgangs-Werkstoff hergestellt werden. Die Voraussetzung hierfür ist ein homogenes Germanium außerordentlich großer Reinheit, also von verschwindend kleinem Störstellengehalt. Diese Voraussetzung kann auf verschiedene Weise kontrolliert werden: als notwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung ist zu erfüllen, daß der Kristall eine Leitfähigkeit nahe der Eigenleitfähigkeit (etwa 50 Ωcm) aufweist. Daß diese geringe Leitfähigkeit nicht etwa durch Überdopung von *n*- und *p*-Störstellen hervorgerufen wird, muß noch durch zusätzliche Messungen geprüft werden.

### Gewinnung chemisch reinen Germaniums

Das heute in Europa erhältliche Germanium ist sehr unterschiedlich. Außerdem fallen bei einer Reihenfertigung im Laufe der Verarbeitung der Einkristalle zu Transistoren erhebliche Mengen von stark verunreinigtem Germanium (vorwiegend beim Zersägen und beim Ätzen) an, so daß — zumindestens teilweise — auch eine chemische Aufbereitung nötig ist. Diese geschieht dadurch, daß über das hocherhitzte Germanium ein Chlorstrom geleitet wird, so daß es in $GeCl_4$ umgewandelt wird. $GeCl_4$ ist, ähnlich wie $CCl_4$ eine Flüssigkeit, die durch sorgfältige Destillation chemisch sehr hoch gereinigt werden kann.

Die Destillation hat den Vorteil, daß die Chloride einer Reihe chemischer Verunreinigungen, die sich durch den weiter unten beschriebenen physikalischen Reinigungsprozeß nicht ausscheiden lassen, sehr weitgehend eliminiert werden, weil ihr Siedepunkt unter dem des $GeCl_4$ liegt.

Mit Hilfe von destilliertem Wasser wird das $GeCl_4$ in $GeO_2$ nach dem Prozeß: $GeCl_4 + 2\,H_2O = GeO_2 + 4\,HCl$ in Germaniumdioxyd, das als weißes Pulver gewonnen wird, und Salzsäure überführt. Das $GeO_2$ wird nun in einem Reduktionsofen durch hochreinen Wasserstoff in bekannter Weise reduziert.

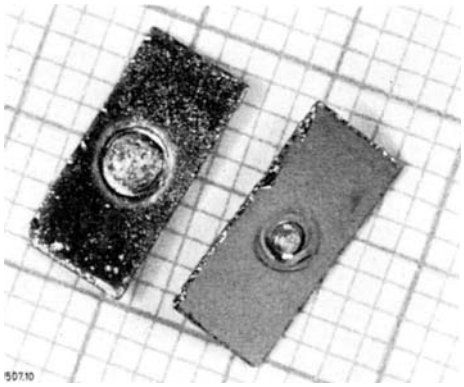
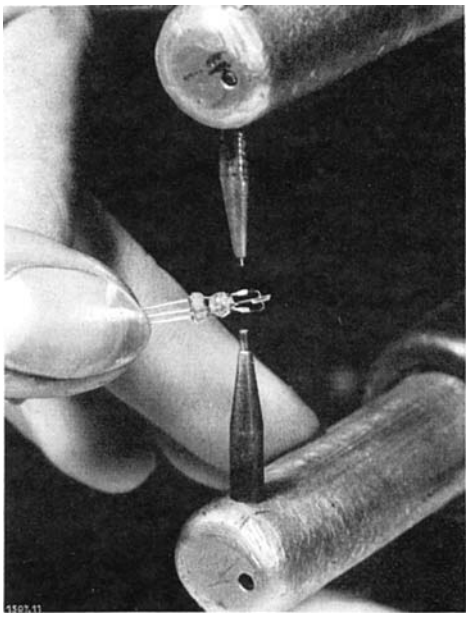


*Bild 10.* Germaniumplättchen mit einlegierter Indiumpille für Leistungs-Transistoren. Als Untergrund dient Millimeterpapier.

### Die Zonenreinigung

Das so chemisch vorgereinigte Germanium wandert jetzt in das Quarzschiffchen der Zonenreinigungsanlage, in der es physikalisch dadurch gereinigt wird, daß durch räumlich begrenzte Öfen jeweils nur ein Teil des Germaniums geschmolzen wird. Wenn nun die Öfen langsam über das Schiffchen hinweggezogen werden, so bewegt sich die geschmolzene Zone im Schiffchen von einem Ende zum anderen. Die Fremdstoffe, die sich nur ungern in den Ge-Kristall einbauen, (deren Segregations-Konstante $k$ kleiner als 1 ist), reichern sich dann in der Schmelze an und wandern ans Ende des Schiffchens, während sich die Fremdstoffe mit $k > 1$ am Anfang des Kristalls ansammeln. Der Hauptteil des Kristalles wird dann außerordentlich rein, sofern im Kristall nicht Fremdatome verblieben sind, deren $k$ ungefähr gleich 1 ist. Glücklicherweise lassen sich diese Fremdatome (ebenso wie solche mit $k > 1$) weitgehend durch chemische Reinigung ausscheiden. Derartige Elemente würden sich durch diesen physikalischen Reinigungsvorgang nicht eliminieren lassen.

*Bild 5* zeigt den Ausschnitt einer solchen Zonenreinigungsanlage mit 7 Schmelzzonen. Nun wird der nahezu eigenleitende Teil der Zonenschmelze zerstückelt und in einen Kohletigel gebracht, aus dem ein Einkristall gezogen wird.



### Das Herstellen der Einkristalle

Der Schmelze wird eine sehr kleine definierte Menge eines bestimmen 5- oder 3-wertigen Elementes beigegeben, um einen *n*- oder *p*-leitenden Einkristall ganz bestimmter Leitfähigkeit zu erhalten. Dieser Einkristall bestimmt die Eigenschaft der Blockschicht des gewünschten *p-n-p*- bzw. *n-p-n*-Transistors. Dabei wird sorgfältig darauf geachtet, daß der Impfkristall, an dem der Kristall während des Ziehens anwächst, in einer bestimmten Richtung, z.B. der 1-1-1-Richtung oder der 1-0-0-Richtung orientiert ist, so daß auch der gezogene Kristall eine bestimmte Orientierung aufweist. *Bild 6* zeigt einen solchen Kristall; daneben liegt der Anfang eines 1-0-0 orientierenden, an einem Impfkristall angewachsenen Kristalles.

*Bild 7* zeigt eine Kristallzieheinrichtung, die mit Hochvakuum arbeitet, während man in *Bild 8* durch ein in den Quarzzylinder eingeschmolzenes Klarquarzfenster sieht, wie der Kristall am Impfkristall angewachsen ist. Der Einkristall wird dann in Scheiben bestimmter Dicke zersägt *(Bild 9).* Die Scheibchen werden wieder in rechteckige Plättchen aufgeteilt, deren Fläche sich nach dem Verwendungszweck, insbesondere der Leistung des gewünschten Typs richtet.

Wichtig für eine gleichmäßige Serienfertigung ist die darauffolgende Behandlung des Germaniumplättchens, die

Thomas Günzel 05/2008 für www.radiomuseum.org

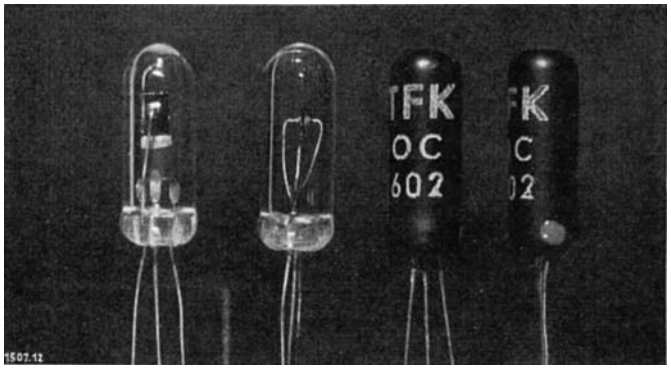



*Bild 12.* Fertige Glas-Transistoren, ungeschwärzt und geschwärzt.

sehr sorgfältig geschliffen, poliert und geätzt werden. *Bild 10* zeigt Germaniumplättchen eines Leistungstransistors (auf Millimeterpapier). Die Indiumpille für Emitter und Kollektor, die genau bestimmte Abmessungen und Form haben müssen, werden in einem Wasserstoffofen bei bestimmten, für die einzelnen Transistortypen charakteristischen Temperaturen einlegiert.

Große Sorgfalt ist auf den folgenden elektrolytischen Ätzvorgang zu verwenden, der den Transistor bereits in seinen elektrischen Eigenschaften völlig fertigstellt. Nun sind noch die Anschlußdrähte anzubringen und an den Gehäusesockel (bei dem hier gezeigten Typ aus Glas) anzuschweißen *(Bild 11).* Schließlich wird dieser Transistor völlig dicht eingeschmolzen, ähnlich wie die in Glas eingeschmolzenen Dioden. *Bild 12* zeigt den fertigen Aufbau dieses 50 mW-*p-n-p*-Typs, der geschwärzt werden muß, um Lichteinwirkungen zu vermeiden.

Nach Fertigstellung werden die wichtigsten und empfindlichsten Kennwerte eines Transistors in einem einfach zu bedienenden Gerät geprüft.

## Zusammenfassung

Der Aufsatz gibt zunächst einen Überblick über die physikalische Wirkungsweise des Transistors. Indem man lernt, die physikalischen Vorgänge zu verstehen, erkennt man die zahlreichen Nebeneffekte, die den Wirkungsgrad der Verstärkung herabsetzen. Diese Störungen müssen ausgeschieden werden, um einen technisch guten Transistor zu bauen. Die Störeffekte, wie z. B. verminderte Emitterwirksamkeit und Sperrwirkung an der Kollektorschicht, zu großer Blockwiderstand, Volumen- und Oberflächen-Rekombination usw., werden geschildert. Schließlich wird der Werdegang eines neuzeitlichen Transistors beschrieben.

Thomas Günzel 05/2008 für www.radiomuseum.org