

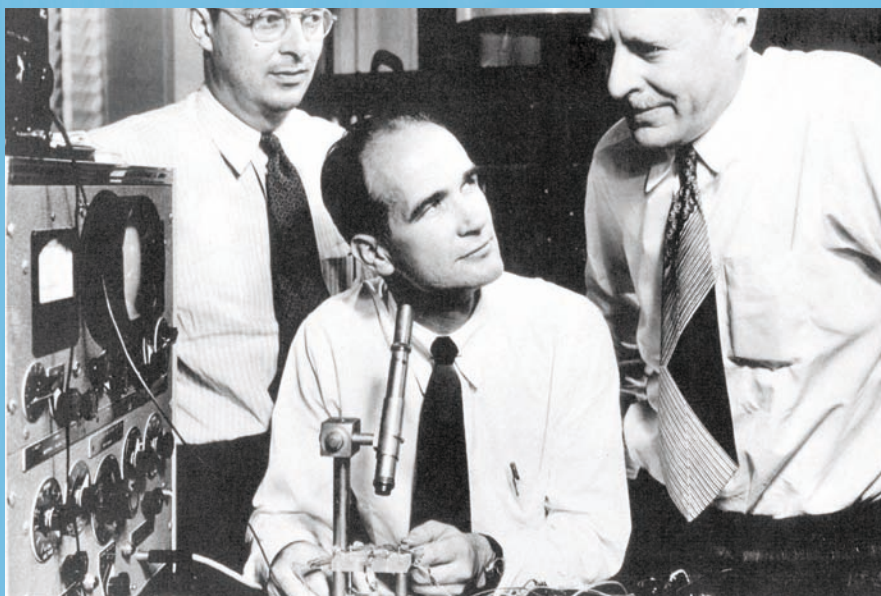
Sowohl der Transistor als auch das IC wurden jeweils zweimal „erfunden“

Transistor und IC historisch betrachtet

Der Tag, an dem James Watt im Jahre 1769 zum ersten Mal eine Urform seiner Dampfmaschine präsentierte, gilt unter Historikern als der Beginn des Industriezeitalters. Der 23.12.1947 markiert den Beginn des Informations-Zeitalters, denn an diesem Tag wurde der Transistor „geboren“. elektronik industrie hat tief in den Archiven recherchiert und erläutert die wesentlichen Meilensteine auf dem Weg zum Transistor sowie weiter bis zum IC von heute. Übrigens: Fast hätte der erste Transistor in Europa (und nicht in den USA) Signale verstärkt.

Die „Erfinder“ des Transistors (Bild 1), John Bardeen und Walter Houser Brattain sowie William Bradford Shockley haben hart gearbeitet und großartiges geleistet. Völlig zu Recht erhielten sie am 10.12.1956 dafür den Nobelpreis für Physik, aber die Grundlagen für die „Erfindung“ des Transistors legten Forscher in Europa. Außerdem wurde der Transistor nicht erfunden, sondern zielgerichtet im Team entwickelt – und zwar eingebettet in ein finanzkräftiges Gerüst. Der Transistor war somit auch das erste Ergebnis der industrialisierten Wissenschaft, des „Systems Engineering“, so dass Walter Brattain anlässlich der Verleihung des Nobelpreises 1956 die Auswirkungen dieser neuen Forschungsstrategie auch sehr deutlich kommentierte: „Man muss schon bescheiden sein, einen solchen Preis anzunehmen, wenn man bedenkt, wie viel Glück man hatte, zur rechten Zeit an der richtigen Stelle zu sein.“

Wie viel Glück die Nobelpreisträger mit ihrem Timing wirklich hatten und welche Fakten Brattain offensichtlich zu dieser Aussage bewegten, drang viele Jahre lang nicht an die Öffentlichkeit, denn erst in diesem Jahrtausend kristallisierte sich heraus, dass die beiden deutschen Forscher Dr. Herbert Mataré und Dr. Heinrich Welker in Paris Anfang 1948 ebenfalls einen funktionierenden Transistor entwickelt hatten.



Quelle: Bell-Labs/Alcatel-Lucent

Bild 1: Die Erfinder/Entwickler des Transistors: Die Erfinder des Transistors: John Bardeen (links), William Bradford Shockley (Mitte) und Walter Houser Brattain.

Grundlagen im Europa der 1920er Jahre gelegt

Bereits lange vor dem denkwürdigen Tag des Jahres 1947 begann in den Bell Telephone Laboratories (kurz Bell Labs) in Murray Hill/New Jersey (USA) die Entwicklung des Transistors. Schon 1923 entdeckte der russische Physiker Oleg Vladimirov Lossev, dass ein Zinkoxid-Kristall, über dem eine Spannung von einigen Volt angelegt und der mit einem Schwingkreis verbunden wird, als Oszillator oder Detektor mit Eigenschwingung fungieren kann. Ab 1923 beschäftigte sich auch der Hochschulprofessor und Siemens-Grundlagenforscher Walter Schottky mit der Halbleiterphysik. Zusammen mit Davjdor und Mott erkannte Schottky den Leitungsmechanismus der Halbleiter. Die für den Transistor nötigen Grundlagen auf dem Gebiet der Festkörperphy-

sik wurden etwa in den Jahren 1925 bis 1933 in Europa gelegt, indem einige der weltweit führenden Theoretiker die Quantenmechanik in theoretischer Form auf Festkörper und hier vor allem auf Metalle anwandten. So beschrieb beispielsweise Julius Lilienfeld bereits im Jahr 1928 die prinzipielle Funktionsweise des Feldeffekt-Transistors (FET) – also fast 30 Jahre vor dessen physikalischen Entdeckung. Allerdings waren damals noch viele grundlegende Aspekte offen. So konnte zu dieser Zeit zum Beispiel niemand erklären, warum Kupfer aus Chile besser für Kupferoxidul-Gleichrichter geeignet war als Kupfer, das in den USA verhüttet wurde. Diese Kupferoxidul-Gleichrichter wurden auch als Trockengleichrichter bezeichnet und nutzen die halbleitenden Eigenschaften des Kupfer-I-Oxids (Kupferoxidul). Sie zählen zu den ersten indus-

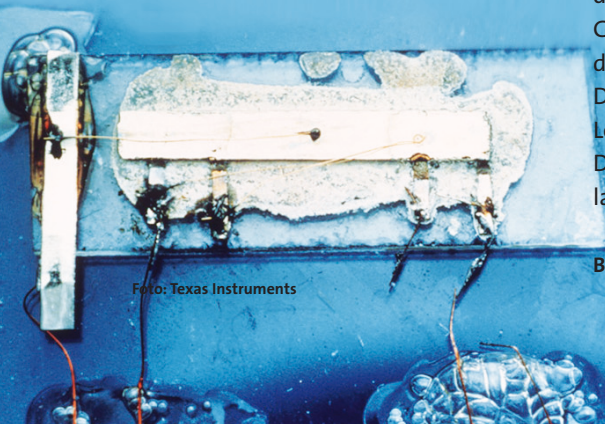


Foto: Texas Instruments

Bild 2: Das weltweit erste IC, entwickelt von TI-Mitarbeiter Jack Kilby.



all-electronics.de
ENTWICKLUNG. FERTIGUNG. AUTOMATISIERUNG



Entdecken Sie weitere interessante Artikel und News zum Thema auf all-electronics.de!

Hier klicken & informieren!



Quelle: ISI

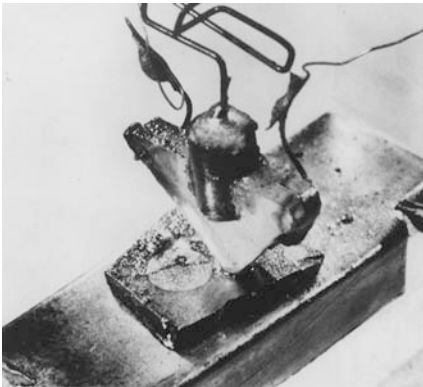


Bild 3: Der erste Transistor.

triell verwendeten Halbleiterbauteilen und wurden von den Selen sowie den Germanium- und Siliziumgleichrichtern abgelöst. Zur Reduktion des hierfür benötigten Kupfererzes warfen die Chilenen damals nämlich riesige Holzscheite, wenn nicht gar halbe Baumstämme in die Erzschnmelze, während die Amerikaner auf Methoden zurückgriffen, die weniger Verunreinigungen hinterlassen. Zwischen 1925 und 1935 begannen die Festkörperphysiker zu verstehen, wie wichtig die Störstellen, Gitterfehlstellen (Löcher) und Zwischengitter-Verunreinigungen für bestimmte elektrische Leitvorgänge sind.

Aktivitäten in den Bell Labs

Die Solid-State Division (Halbleiter-Abteilung) der berühmten Bell Labs, die später an AT&T und danach an Lucent Technologies gingen, wurde Ende des Jahres 1945 mit dem Zweck gegründet, „neues Wissen zu erlangen, das zur Entwicklung von durchgehend neuen und verbesserten Bauelementen und Kommunikationssystemen verwendet werden kann“. Diese Solid-State Division sollte sich eines lange gehegten Traums von Mervin Kelly, des damaligen Entwicklungsleiters der Bell Labs, annehmen. Schon 1936 äußerte sich Kelly gegenüber William Bradford Shockley, er wolle einen elektronischen Ersatz für die Relais in Telefon-Vermittlungsstellen finden. Da Vakuumröhren zuviel Leistung verbrauchten, zuviel Hitze produzierten und zu unzuverlässig waren, schieden sie für diesen Zweck aus. Bereits während des Krieges hatten die Amerikaner das Know-how für die Herstellung von (für damalige Verhältnisse) relativ reinem Silizium und Germanium entwickelt, denn diese Materialien wur-

den zur Herstellung von Radar-Detektoren benötigt. Schon 1945 schlug William Bradford Shockley vor, einen Halbleiterverstärker auf Basis des Feldeffekt-Prinzips zu bauen, das Julius Lilienfeld 1928 theoretisch beschrieben hatte, aber diverse Versuche, die Theorie in die Praxis umzusetzen, schlugen fehl, weil noch das Grundverständnis über Minoritätsträger fehlte.

Von Ende Juni bis Ende August 1947 flogen Bardeen und Shockley gemeinsam auf Geschäftsreise nach England und Zentraleuropa, was damals nur mit Tankstops in Neufundland und Irland möglich war. Europa litt in dieser Zeit noch sehr unter den Folgen des Krieges, und es war für die zwei Wissenschaftler oft schwer, Nahrung und Unterkunft zu finden. In England mussten die beiden sogar für eine Nacht gemeinsam in einem Bett nächtigen. Trotz der widrigen Umstände konnten die Wissenschaftler viele wertvolle Anregungen für ihre Arbeit aus England, Frankreich (Paris), den Niederlanden und der Schweiz mitbringen. Aufgrund der besonders schlechten Nachkriegs-Zustände in Deutschland (und vielleicht war es aus politischen Gründen auch nicht gestattet...) trafen sich die beiden Amerikaner sehr zu ihrem Bedauern weder mit Walter Schottky noch mit anderen deutschen Kollegen.

Im November 1947 begannen dann die ersten Experimente mit einem kleinen Stück p-dotierten Silizium, auf dem eine n-dotierte Inversionsschicht aufgebracht war. Ursprünglich wollten die beiden damit ein Bauelement entwickeln, das auf Basis des Feldeffekts funktioniert.

Die erste Verstärkung per Halbleiter

Am 17. November 1947 machte ein Kollege namens Gibney den Vorschlag, zwischen der Metallplatte und dem Halbleiter eine Vorspannung anzulegen, während beide Teile in einen Elektrolyt eingetaucht sind. Diese Idee der Vorspannung markierte einen weiteren Schritt hin zum ersten Transistor. Bei einem relativ zur Basis positiven Vorstrom zeigte sich, dass der Strom kleiner wird, wenn an dem Elektrolyt (eine Wachsschicht, die um die Metallspitze herum aufgebracht wurde und von einem Wassertropfen umgeben war) eine negati-

ve Spannung angelegt wird, was gemäß des Feldeffekts auch erwartet wurde. Das war die erste Verstärkung mit Hilfe eines Halbleiters, aber sie funktionierte aufgrund des sehr trägen Elektrolyts nur bei niedrigen Frequenzen bis zu 8 Hz.

Darauf führten Brattain und Bardeen ähnliche Experimente mit p-dotierter Inversionsschicht auf n-dotiertem Germanium durch, was zu noch besseren Ergebnissen führte. Die beiden beobachteten, wie sich auf der Oberfläche des Germaniums langsam eine Oxidschicht bildete. Daher beschlossen sie, den Elektrolyt wegzulassen und über den dünnen Oxidfilm hinweg eine Spannung anzulegen. So entdeckten Brattain und Bardeen den bipolaren Punktkontakt-Transistor.

Der erste Transistor überhaupt war ein Punktkontakt-Transistor (Bild 3), in dem zwei Kontaktpunkte auf der Oberfläche eines kleinen n-dotierten Germanium-Blocks dicht beieinander befestigt waren. Einer dieser Kontakte, heute würde man ihn Emitter nennen, wies eine positive Vorspannung auf, der zweite Kontakt, heute Kollektor genannt, eine negative Vorspannung. Der Emitter injizierte auf Grund seiner Vorspannung Löcher, die zum Kollektor flossen – und genau das führten die Wissenschaftler am 23. Dezember 1947 ihren Chefs in den Bell Labs vor. Dieser Tag gilt als der offizielle Geburtstag des Transistors (Bild 4). Die ersten erfolgreichen Experimente dieser Art erfolgten übrigens bereits gut eine Woche vorher, so dass der Transistor eigentlich schon am 16.12.1947 „geboren“ wurde, als die Forscher erstmals eine Spannungs- und Leistungsverstärkung mit Hilfe eines Halbleiters erzielten.

Systematische Entwicklung im Team

Auf Basis des bei Kriegsende existierenden Wissens gab es viele Hinweise darauf, dass die Halbleiter bei einem tieferen Verständnis der Grundlagen zu den gewünschten Ergebnissen führen konnten, einen elektronischen Ersatz für die Relais in Telefon-Vermittlungsstellen zu finden. Walter Brattain bemerkte damals, dass sämtliche Anstrengungen fehlschlugen, einen Halbleiter-Verstärker nach der klassischen Erfindermethode „Try and Error“

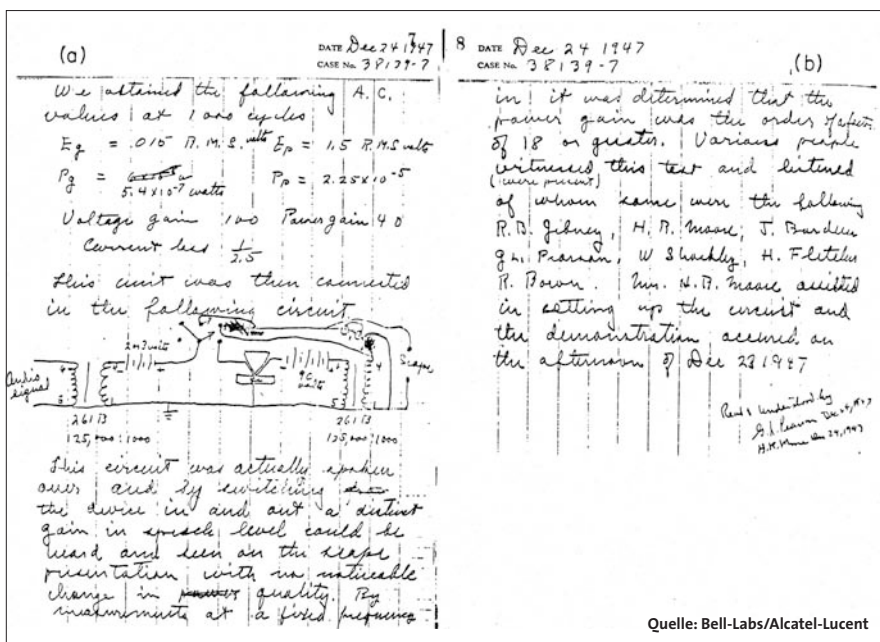


Bild 4: In seinem Notizbucheintrag vom 24.12.1947 beschreibt Brattain die Demonstration des weltweit ersten Punktkontakttransistors.

zu bauen – und zwar auch die Anstrengungen, die Brattain und Shockley vor dem Zweiten Weltkrieg unternommen hatten. Die Bell Labs starteten eine regelrechte Transistor-Offensive und begannen eine Art des projektbezogenen Arbeitens, wie es sie in dieser Konsequenz bisher noch nie gegeben hatte. Das Halbleiter-Forschungsteam hatte erkannt, dass das Pro-

wissenschaftlichen Theorien. Die „Erfindung“ des Transistors war somit keine „Erfindung“ mehr, sondern eine konsequente Entwicklung, die in der physikalischen Entdeckung des Transistor-Effekts gipfelte, was wiederum den Anfang einer neuen Entwicklungs-Ära markierte. Da man auch das Funktionsprinzip des Transistors in seinen Einzelheiten verstand, konnte man nicht nur voller Stolz ein funktionierendes Bauteil vorstellen, das man „erfunden“ hatte. Vielmehr stand die Tür offen für eine konsequente Weiterentwicklung, die derzeit in den hochintegrierten ICs unserer Tage gipfelt.



Bild 5: Herbert Mataré war einer der Väter des „europäischen Transistors“, des Transistors.

blem von allen Seiten systematisch angegangen werden musste. Aus diesem Grunde arbeiteten nicht nur theoretische Physiker und Experimentalphysiker an dem Projekt, sondern auch Chemiker und Metallurgen. Im Rahmen der Transistorforschung gaben sich die Wissenschaftler nicht mehr mit zufälligen Entdeckungen zufrieden. Vielmehr ging es darum, die Experimente in ihrer gesamten Komplexität zu verstehen und zu erklären sowie um die Formulierung von grundlegenden

Praxis und Theorie

Den ersten Schritt der Weiterentwicklung von Bardeens und Brattains Entwicklung „Transistor“ unternahm Shockley bereits einen Monat nach der Entwicklung des Punktkontakt-Transistors, indem er sich die entsprechenden Notizen machte, die zum Sperrschicht-Transistor (Flächentransistor) führten. Beim Flächentransistor findet der Transistor-Effekt nicht mehr an der Oberfläche, sondern im Innern des Halbleiters statt. Shockley war damals sehr frustriert, dass er während der unmittelbaren Entwicklung des Transistors keine größere Rolle spielte. 1976 reflektierte er seine Gefühle folgendermaßen: „Meine Begeisterung über den Erfolg der

Gruppe wurde dadurch getrübt, dass ich nicht einer der Erfinder war. Ich war schon etwas frustriert, dass meine persönlichen Anstrengungen, die mehr als acht Jahre zuvor begonnen hatten, nicht in einem signifikanten Beitrag von mir zu der Erfindung beitrugen.“

Während Brattain und Bardeen daran glaubten, dass der Transistor aufgrund eines Oberflächen- oder Feldeffekts funktionierte, war Shockley der festen Ansicht, dass die Verstärkung im „Bulk“, also im gesamten Material und somit nicht nur an der Oberfläche stattfindet. Binnen zwei Jahren entwickelte Shockley eine Theorie über die Vorgänge am pn-Übergang sowie über das Verhalten von Elektronen und Löchern in Halbleitern. Damit war Shockley in der Lage, den Sperrschicht-Transistor formal zu beschreiben – und zwar noch gut zwei Jahre bevor dieser 1951 physikalisch realisiert wurde. Mit diesem Flächentransistor begann der eigentliche Siegeszug des Transistors, denn jetzt bestand die Möglichkeit, Transistoren mit reproduzierbaren Daten in größeren Stückzahlen zu fertigen. Aufgrund dieser Verdienste um die theoretische Beschreibung erhielt auch Shockley als Dritter im Bunde zusammen mit den eigentlichen Entwicklern des Transistors (Bardeen und Brattain) am 10. 12. 1956 den Nobelpreis für Physik des Jahres 1956. Shockleys größter Verdienst war wohl die physikalische Beschreibung des Transistors in seinem schon klassischen Text „Electrons and Holes in Semiconductors“, den er 1950 in New York veröffentlichte.

Le Transistron

Von der Weltöffentlichkeit sehr lange völlig unbemerkt und ganz unabhängig von den Aktivitäten in den USA hatten Herbert Mataré (Bild 5) und Heinrich Welker (Bild 8) unter den schweren Bedingungen der Nachkriegszeit in Paris ebenfalls einen funktionierenden Transistor gebaut, den ihre Chefs im Rahmen des CNET-Programms im Jahr 1949 „Le Transistron“ taufte. Obwohl Forscher in den Bell Labs und in Paris annähernd zeitgleich das gleiche Prinzip entdeckten bzw. entwickelten, berücksichtigte das Nobelpreis-Komitee damals die Pariser Arbeiten nicht, ja es er-

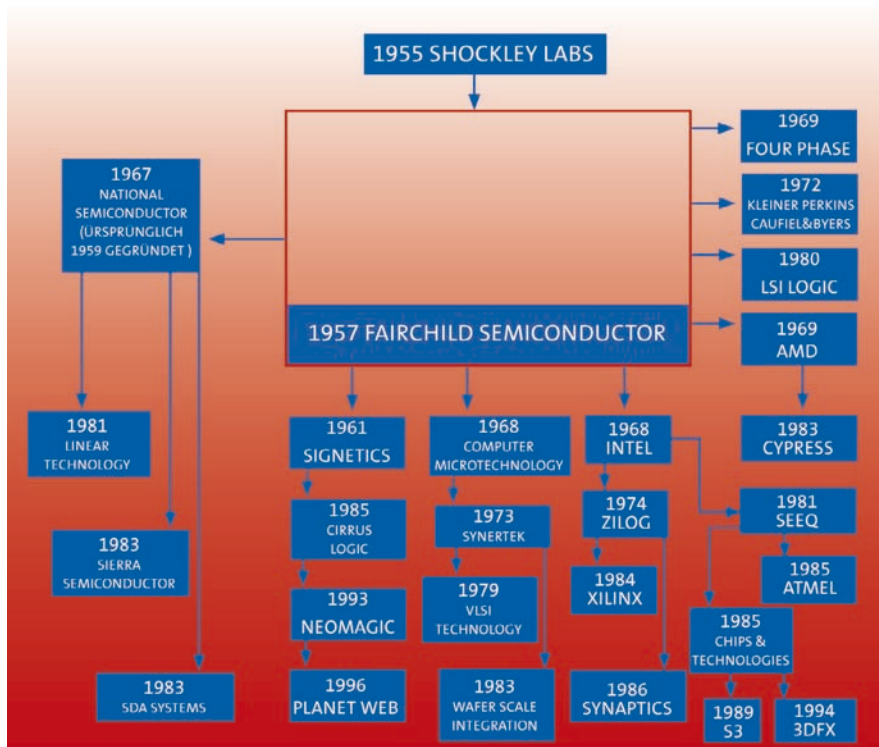


Bild 6: Fairchild gilt zu Recht als Mutter der Halbleiterindustrie. Aus keinem anderen Unternehmen der Branche gingen mehr Spinoffs hervor.

wähnte sie in keinerlei Weise. Wenn diese Konstellation heutzutage bestünde, dann würde das Komitee mit großer Wahrscheinlichkeit den Nobelpreis aus heutiger Sicht den beiden Forscherteams gleichzeitig verleihen.

Die Amerikaner beobachteten die erste Elektronen-Injektion Ende Dezember 1947, in Paris beobachteten Mataré und Welker Anfang 1948 die „Verstärkung mit Duodioden“ und im Mai/Juni 1948 die erste Signalverstärkung per Transistor, pardon: Transistron. Bis Anfang der 50er Jahre konnten die Transistrons mit höheren Frequenzen arbeiten als die Transistoren.

Die Amerikaner veröffentlichten am 25.6.1948 zum ersten Mal einen kurzen Bericht über den Transistor, wobei der Beitrag erst in der Juli-Ausgabe 1948 der damals führenden internationalen Zeitschrift „The Physical Review“ erschien. Am 26.6.1948 meldeten sie den Sperrschicht-Transistor zum Patent an, einen Tag später informierten sie die Medien. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass Welker und Mataré bei der Patentanmeldung ihrer Transistor-Variante am 13.8.1948 überhaupt etwas von den Ergebnissen der Bell Labs wussten. 1950 besuchte William Shockley auch Herbert Mataré und Hein-

rich Welker in Paris, aber in seinem berühmten Aufsatz „The Path to the Conception of the Junction Transistor“, den Shockley 1976 für das IEEE verfasste, erwähnte er diese europäischen Forschungen der Nachkriegszeit mit keinem Wort. Heinrich Welker verstarb 1981 ohne dass ihm jemals die entsprechende Anerkennung für seine Verdienste rund um den ersten europäischen Transistor zuteil wurde, aber zumindest Herbert Mataré erhielt 2008 im Alter von 96 Jahren mit der Verleihung des Eduard-Rhein-Ehrenrings (ein in Gold gefasster Mondstein) noch eine angemessene Würdigung seiner Tätigkeiten.

Wie fertigen?

Es gab somit zwei funktionsfähige Transistor-Strukturen: den Punktkontakt- und den Sperrschicht-Transistor. Allerdings eignete sich damals keiner von beiden so recht für die Massenfertigung. So war der Punktkontakt-Transistor beispielsweise ziemlich instabil und hatte alles andere als ideale elektrische Parameter. Nichtsdestotrotz fertigte Western Electric (der Halbleiterbereich von AT&T) zehn Jahre lang Punktkontakt-Transistoren, die dann in Oszillatoren für Telefone, in Hörgeräten

und in dem ersten digitalen Computer, der an Bord eines Flugzeugs in der Luft arbeitete, zum Einsatz kamen.

Vor allem haben sich die Wissenschaftler der Bell Labs bereits sehr früh Gedanken darüber gemacht, ob und wie man den zu entwickelnden Halbleiter fertigen kann. Diese Fokussierung auf den für klassische Forscher eher neuen Aspekt der Fertigung sorgte allerdings dafür, dass eine wichtige Voraussetzung für den bevorstehenden Erfolg erfüllt war: hochreines Halbleiter-Rohmaterial, das gezielt n- oder p-dotiert werden konnte. Auch die für die damalige Zeit bei Festkörperphysikern sicherlich nicht gerade alltägliche mühevollen Dienstreise nach Europa passt in dieses neue Prozedere der projektorientierten Forschung.

Ursprünglich bestand die Aufgabe des Halbleiter-Teams darin, einen Ersatz für die Elektronenröhre zu finden, da diese zu viele Nachteile hat. Dennoch waren Elektronenröhren in den ersten Jahren die Konkurrenz für Transistoren schlechthin. Erst als es gelang, die großen Vorteile des Transistors, nämlich seine geringe Größe sowie sein geringes Gewicht und seine geringe Verlustleistungsaufnahme, richtig zu nutzen, begann der wahre Siegeszug des Transistors und später auch der ICs.

Mervin Kelly erkannte bereits sehr früh die kommerziellen Möglichkeiten, die aus der Entwicklung des Transistors resultierten. Er wusste, dass nur durch eine breitgefächerte Fertigung durch viele verschiedene Firmen und die daraus erwachsende Konkurrenz untereinander die Verbreitung des Transistors beschleunigt werden konnte. Aus diesem Grund boten die Bell Labs Anfang 1952 ihre Patentrechte frei an. Für eine Anzahlung von 25 000 Dollar, die später mit den Lizenzzahlungen verrechnet wurden, konnten geeignete Interessenten eine Lizenz zur Fertigung von Transistoren erwerben. Um es „qualifizierten Ingenieuren zu ermöglichen, das Equipment, die Prozeduren und Methoden zur Fertigung dieser Produkte“ herzustellen, veranstalteten die Bell Labs damals ein achttägiges Seminar, wobei an zwei Tagen davon die Transistor-Fabrik von Western Electric in Allentown/Pennsylvania besichtigt wurde.

Nachdem der Sperrschicht-Transistor 1951

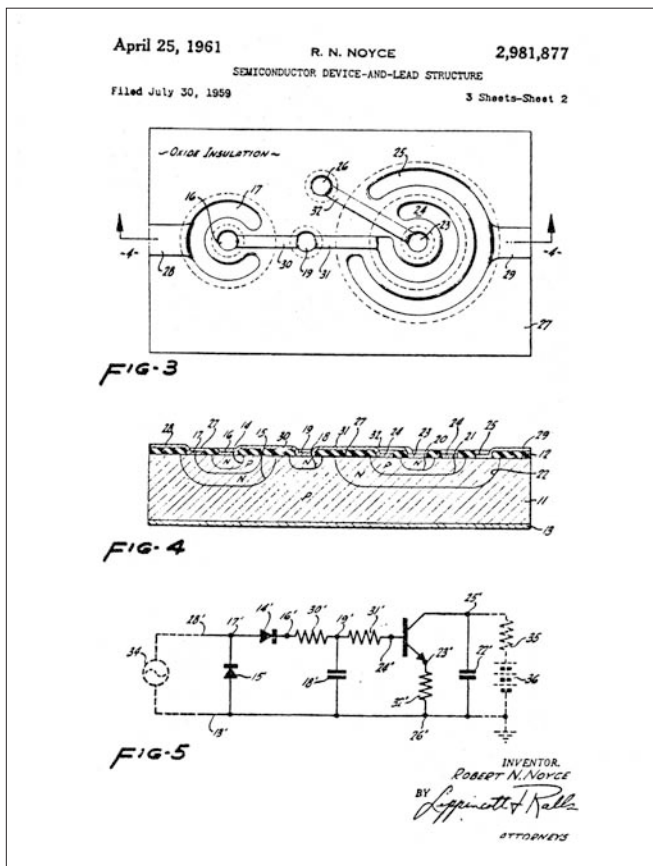


Bild 7: Bob Noyce von Fairchild erhielt diese Patentschrift des ersten ICs.

tastisch hohe Menge von 1800 Einzeltransistoren pro Stunde gefertigt und getestet werden konnte.

Aktivitäten in Europa

Bereits 1950 begann Philips mit der Fertigung von Kristalldioden aus Germanium, und ein Jahr später verließen die ersten „Kristall-Verstärker auf Germanium-Basis“ genannten Transistoren die Forschungslaboratorien der Niederländer, die dann ab 1952 in Massen gefertigt wurden. Durch die Umorientierung der französischen Industrie mit klarer Fokussierung auf die Atomforschung Anfang der 50er Jahre kamen die Halbleiter-Aktivitäten in Frankreich zunächst praktisch völlig zum Erliegen, so dass Mataré und Welker 1951 nach Deutschland zurückkehrten. Dort gründete Mataré in Düsseldorf Intermetall (heute: Micronas in Freiburg) und bereits nach wenigen Monaten war Intermetall das weltweit erste Unternehmen, das Dioden und Transistoren verkaufte. Welker ging zu Siemens (siehe Kasten). Intermetall präsentierte dann auf der Düsseldorfer Funkausstellung 1953 das erste Muster eines Transistorradiogeräts auf Basis von vier Punktkontakttransistoren – und zwar ein Jahr vor ähnlichen Geräten aus den USA beziehungsweise zwei Jahre vor dem berühmten Sony TR1, mit dem die japanische Consumerelektronik-Industrie ihren Siegeszug begann.

1954 fertigte Philips das erste kommerziell erhältliche Transistorradio Europas. Auch Telefunken begann 1952 nach der allgemeinen Lizenzvergabe durch die Bell Labs, sich mit Transistoren und deren Fertigung zu beschäftigen.

1955 wurde in Frankreich das Unternehmen R.P.C. gegründet, das in der Nähe der Seine-Metropole die Transistorenfertigung aufnahm. Als 1960 der Staatskonzern Thomson das Unternehmen R.P.C. übernahm, wurde der Name in COSEM geändert, aber erst 1985 in Thomson Semiconducteurs umbenannt.

1957 gründeten Telettra und Olivetti das Unternehmen SGS, um mit einer Lizenz von Fairchild Transistoren in Italien zu fertigen. 1960 übernahm Fairchild ein Drittel der Anteile von SGS, und das ebenfalls italienische Unternehmen ATEC begann mit der Produktion von Leistungstransistoren

produktionsreif geworden war, überschlugen sich die Ereignisse: 1952 nahm Bell System mit Hilfe von Transistoren in Englewood/New Jersey die erste Vermittlungsstelle im Selbstwählverfahren (also ohne Operator) in Betrieb. 1954 gelang es Siemens kurz vor den Amerikanern, Reinstsilizium in industriell relevanten Mengen herzustellen, und schon im selben Jahr stellte Texas Instruments den ersten Silizium-Transistor vor. 1957 brachte Siemens mit dem 2002 den ersten in Serie gefertigten Computer auf den Markt, der vollständig auf der Transistortechnik basierte. Auch IBM stellte in diesem Jahr seine Computer-Designs von Elektronen-Röhren auf Transistoren um. Ebenfalls im Jahr 1957 meldete der RCA-Mitarbeiter John T. Wallmark das Patent eines Feldeffekt-Transistors an. Mitte der 50er Jahre dominierten die bereits als Röhrenhersteller bekannten Unternehmen General Electric, Philco, Raytheon, RCA, Sylvania und Westinghouse die Halbleiterszene, aber Motorola und Texas Instruments waren ebenfalls bereits sehr aktiv. 1955 verließ Shockley die Bell Labs, um in Kalifornien das Unternehmen

Shockley Semiconductors zu gründen. Shockley war fest entschlossen, eine vierlagige Siliziumdiode zu entwickeln, was sich als uferloses Projekt herausstellte. Frustriert verließen daher acht von Shockleys besten Mitarbeitern im Jahr 1957 die damals noch junge kalifornische Firma, um Fairchild Semiconductors, die „Mutter der Halbleiterindustrie“ (Bild 6), zu gründen. Zu diesen acht Fairchild-Gründern zählten auch Robert Noyce und Gordon Moore, die im Jahr 1968 Intel gründeten. Fairchild konzentrierte sich zunächst auf die Fertigung von Hochleistungs-Mesa-Transistoren und nutzte dazu die in den Bell Labs entwickelten Diffusionstechnologien. Bald darauf erhielt die noch kleine Firma von IBM einen Auftrag zur Fertigung von Mesa-Transistoren für einen Computer. 1959 entwickelte Fairchild den Planarprozess, der die erste industrielle Serienfertigung von Transistoren ermöglichte und noch heute als Basis-Prozess für die Herstellung von Silizium-ICs dient. IBM baute 1960 in Poughkeepsie bei New York die erste vollautomatische Fertigungslinie für Transistoren, in der die damals phan-

Quelle: Fairchild

VERBUNDHALBLEITER, DIE BASIS FÜR LEDs

Der Mathematiker und Physiker Dr. Heinrich Welker arbeitete einige Jahre als Assistenzprofessor unter Arnold Sommerfeld, der als einer der Begründer der modernen theoretischen Physik gilt. 1940 wandte sich Welker mehr der praktischen Seite zu und entwickelte 1948 zusammen mit Herbert Mataré in Paris den „europäischen Transistor“: das Transistron.

1951 übernahm er im Labor der Siemens-Schuckertwerke in Erlangen die Abteilung Festkörperphysik. Er entdeckte, dass III/V-Verbindungen wie GaAs Halbleitereigenschaften aufweisen, erzeugte die ersten synthetischen III-V-Halbleiter und erkannte deren immenses Potenzial. Er legte mit seinen Pionierarbeiten zum Thema GaAs die Grundlagen für LEDs, Laserdioden sowie Mikrowellenhalbleiter und trieb die entsprechenden Arbeiten im Siemens-Konzern systematisch voran.

auf Basis einer Lizenz von RCA. 1972 fusionierten SGS und ATES zu SGS, und 1987 SGS und Thomson Semiconducteurs zu STMicroelectronics.

In den 60er Jahren begann auch bei Siemens in Deutschland die Transistorfertigung. So wurden nicht nur von den Amerikanern sondern auch von Siemens bereits 1961 Germanium-Mesa-Transistoren für einen Frequenzbereich von einigen hundert MHz bis 1 GHz gefertigt, was ab 1962 in Großserie geschah. Eine Europapremiere war die Herstellung der ersten ICs durch Siemens im Jahr 1965. Dabei handelte es sich durchgehend um bipolare ICs, die meist für analoge Verstärker-Anwendungen konzipiert waren.

Das IC als Folge des Sputnik-Schocks

Nachdem die Russen erfolgreich den Satelliten (Sputnik) ins All geschossen hatten, erlitten die Amerikaner den sogenannten „Sputnik-Schock“. Als Reaktion darauf startete die amerikanische Regierung ein Programm zur Miniaturisierung der Elektronik. Getrieben von diesem

Druck zur Miniaturisierung hatte Jack Kilby von Texas Instruments im Juli 1958 die Idee, „Widerstände, Kondensatoren, Transistoren und Dioden auf einem einzigen Stück Silizium“ zu integrieren, was er im August 1958 auch in die Tat umsetzte. So schuf er das erste IC (Bild 2). Allerdings dienten bei Kilby noch echte Drähte zur Verbindung zwischen den einzelnen monolithisch integrierten Schaltungselementen.

Zeitgleich hatte Robert Noyce bei Fairchild eine ähnliche Idee. Auf Basis des kurz zuvor von seinem Fairchild-Kollegen Jean Hoerni (dem späteren Gründer von Teledyne und Intersil) entwickelten Planar-Prozesses konzentrierte sich Noyce auf die Interconnects, also auf die metallischen Zwischenverbindungen in dem, was wir heute integrierte Schaltung nennen. Von Noyce stammt ein Verfahren, das auch heute noch zum Handwerkszeug bei der IC-Fertigung gehört: Aufbringen einer Metallschicht und anschließendes Wegätzen, wobei die gewünschten Interconnects vorher mit Fotomasken definiert wurden.

Bis in die 60er Jahre stritten Texas Instruments und Fairchild um das Patent für die integrierte Schaltung. Schließlich einigten sie sich, dass sowohl Noyce als auch Kilby als Erfinder gelten, die zu gleichen Teilen die Rechte halten, weil jeder der beiden unter einem anderen Aspekt zu der Erfindung beitrug.

Höhere Ausbeute, sinkende Preise

ICs waren zu Beginn der 60er Jahre immens teuer und nur für Höchstleistungs-Anwendungen oder Geräte mit ganz besonderen Platzanforderungen im allerobersten Preisbereich einsetzbar, denn die Ausbeute war sehr schlecht. Nachdem Hoerni 1960 die Passivierung mit Hilfe von Oxiden entwickelt hatte, stieg die Ausbeute der ICs an, so dass die Preise beachtlich sanken.

1961 stellte Fairchild das erste industriell gefertigte IC her: ein monolithisch integriertes Set/Reset-Flipflop. Der Preis für dieses Flipflop ist aus heutiger Sicht gigantisch, denn er lag bei 120 Dollar – und das zu einer Zeit, in der eine Flasche Cola am Automaten einen Dime (10 Cents) kostete, während sie heute (in der Dose) praktisch nie unter 1,50 US-\$ erhältlich ist.



Bild 8: Halbleiter-Pionier Dr. Heinrich Welker.

Mitte der 60er Jahre konnte die Ausbeute bei ICs derart gesteigert werden, dass zu diesem Zeitpunkt erstmals damit begonnen wurde, über eine Verwendung von ICs in normalen Elektronik-Anwendungen nachzudenken. Ebenfalls im Jahr 1961, also nicht mal ganz 14 Jahre nach der Entwicklung des Transistors, erreichte die Halbleiter-Industrie zum ersten Mal die Umsatzmarke von 1 Milliarde Dollar.

Moore's Law

Im „Electronics Magazine“ veröffentlichte Gordon Moore 1965 eine Grafik, in der die Anzahl der Transistoren eines Chips auf einer halblogarithmischen Skala über der Zeit aufgetragen war. Dem heute als „Moore's Law“ bekannten Gesetz zufolge verdoppelt sich jedes Jahr die Anzahl der Transistoren auf einem Chip. Mit zunehmender Integration verringerte sich diese Wachstumsrate jedoch auf etwa 18 Monate pro Verdopplung.

1969 betritt Neil Armstrong als erster Mensch den Mond – mit Hilfe des Transistors, aber noch ganz ohne Mikroprozessor, denn erst 1971 brachte Intel mit dem 4004 den ersten Mikroprozessor auf den Markt. Schon der 4004 hatte mit seinen 2300 Transistoren etwa die Leistungsfähigkeit des ENIAC, des 1946 gebauten ersten elektronischen Computers der Welt. Allerdings beanspruchten die 18850 Elektronen-Röhren des ENIAC eine Standfläche von 150 Quadratmetern sowie 150 kW Heizleistung. ENIAC und 4004 boten etwa die Rechenleistung eines heute für 1

Euro erhältlichen Taschenrechners, wobei der Taschenrechner bereits zusätzlich eine im Vergleich zum ENIAC komfortable Ein- und Ausgabe einschließt.

Ebenso rasant wie die technische Entwicklung war die Veränderung der Märkte, in denen Transistoren zum Einsatz kamen. Die ersten in Massen (was man damals so unter „Massen“ verstand: 1000er-Stückzahlen) gefertigten Transistoren

waren erheblich teurer als heute ein IC mit vielen Millionen Transistoren. Zum 50. Geburtstag des Transistors im Jahr 1997 errechnete der damalige Eigentümer der Bell Labs, Lucent Technologies, dass statistisch gesehen bereits damals jeden Tag pro Kopf der Bevölkerung gut 10 000 Transistoren auf unserem Planeten gefertigt wurden; heute ist dieser Wert um viele Zehnerpotenzen größer.

