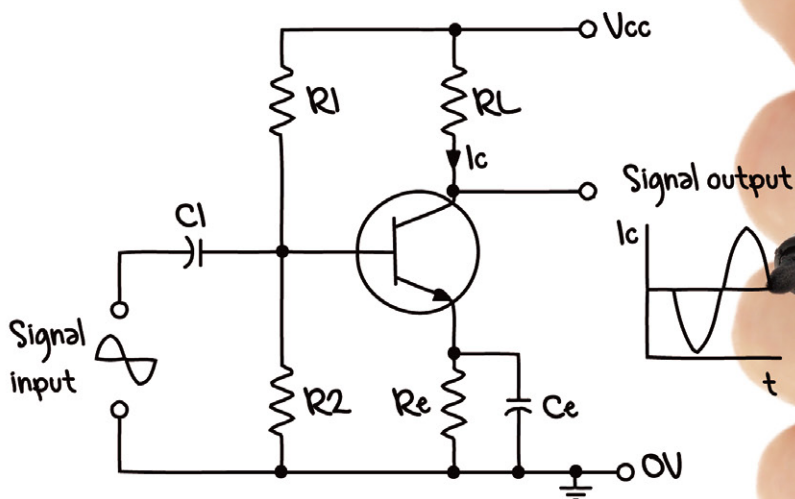


# 75 Jahre Transistor

## Wie eine lange Entwicklung zur Realität wurde

Der 23. Dezember 1947 gilt als das offizielle Geburtsdatum des Transistors – die späteren Nobelpreisträger John Bardeen, William Shockley und Walter Brattain präsentierten den ersten funktionierenden Spitzentransistor. Bis dahin war es ein weiter Weg, auf dem auch deutsche Physiker wegweisend tätig waren. Heute ist der Transistor aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken – er bildet die Grundlage jedes elektronischen Geräts, ob als Einzelbauteil oder milliardenfach kombiniert in einem Chip.

### AMPLIFIER



### Ablösung für die Elektronenröhre

Sie war der Star der Elektronik der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts – die Elektronenröhre. Nach der Nutzung der ersten von John Fleming im Jahre 1904 erfundenen Vakuum-Diode als Spitzendetektor für Empfangszwecke war zunächst der Gleichrichter-Effekt (engl. rectifier) der Vakuumröhre bekannt. Dies war freilich noch kein Verstärkerelement. Dieser Effekt wurde 1906 fast gleichzeitig durch die Physiker Robert von Lieben und Lee de Forest ent-

deckt und mit jeweiligen Patenten gesichert. Während von Lieben das zwischen zwei Elektroden gebildete Feld im Inneren der mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre durch ein äußeres Feld beeinflusste, baute de Forest ein Steuergitter in die Röhre ein und steuerte das Feld in der Röhre durch Anlegen einer Spannung an das Steuergitter – die Triode war erfunden. Später wurde das Gas in der Röhre durch ein Hochvakuum ersetzt.

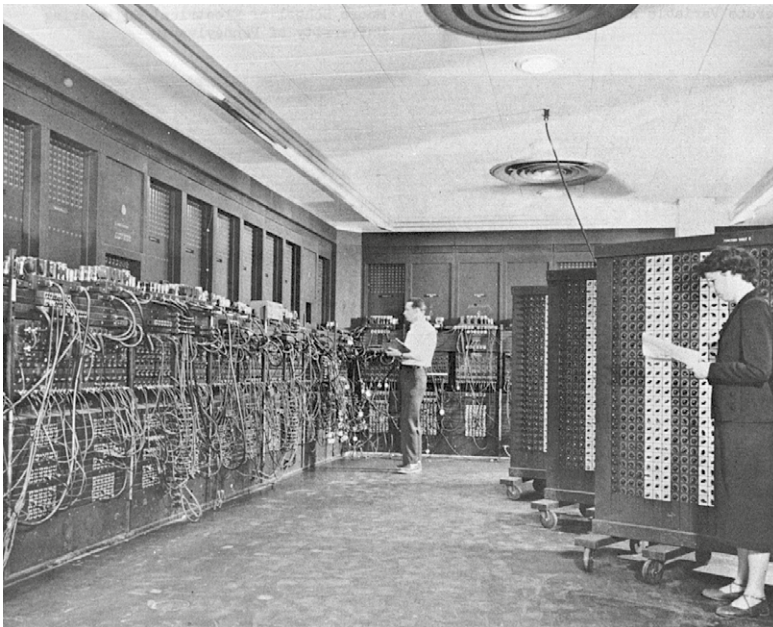


Bild 1: Hier arbeiten über 17000 Elektronenröhren auf 10 x 17 m, 27 Tonnen schwer – ENIAC, der erste Universalrechner. Bild: U.S. Army

Einige Jahre später taucht in der Historie ein heute gut bekannter Name auf – Walter Schottky. Der in der Schweiz geborene Schottky erfand 1915 nicht nur die Tetrode, eine Weiterentwicklung der Triode mit einem zusätzlichen Schirmgitter, das mit einer konstanten Spannung das Steuergitter gegen die Anode der Röhre abschirmt und so eine bessere Verstärkung, eine geringere Schwingneigung und einen höheren Ausgangswiderstand ergab.

Er schuf mit seinen Forschungen über die Raumladung, obwohl zunächst auf Röhren fokussiert, auch die theoretischen Grundlagen der Halbleitertechnik. Auch beruhend auf den Beobachtungen Ferdinand Brauns im Jahr 1874 gipfelte seine Forschung 1938 in der Erfindung der nach ihm benannten Schottky-Diode. Diese beruht auf einem Grenzflächen-Kontakt zwischen einem Metall und einem Halbleitermaterial und der gleichrichtenden Wirkung dieser Anordnung. Die Diode ist noch heute mit ihren schnellen Schaltzeiten und dem geringen Spannungsabfall ein sehr beliebtes Halbleiterbauteil.

In der weiteren Zeit entwickelte man die Elektronenröhre stetig weiter bis hin zu äußerst ausgefeilten Konstruktionen, man denke nur an die Bildröhre, die Röntgenröhre, die in der Radartechnik eingesetzte Wanderfeldröhre und das auch in der Mikrowelle eingesetzte Magnetron. Noch heute spielen einige Röhrenarten eine Rolle in der Elektronik, so etwa als enorm leistungsstarke Senderöhre bis in den Gigahertzbereich hinein oder für die hochwertige Musikwiedergabe für Audiophile und Musiker.

Zudem spielt die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Impulse (EMP) und Radioaktivität bis heute eine Rolle für den militärischen Einsatz in bestimmten Bereichen.

So vielfältig und leistungsstark Elektronenröhren sind, sie haben von Beginn an Nachteile. Kurz gefasst: Sie sind groß, werden sehr heiß, benötigen eine aufwändige, leistungsstarke Stromversorgung mit hohen Spannungen, brauchen eine gewisse Aufheizzeit, bis sie arbeiten, die Lebensdauer ist je nach Einsatzzweck sehr begrenzt und die Fehleranfälligkeit hoch. Man stelle sich einmal nur Größe, Herstellungsaufwand, Abwärme und Energieaufwand eines modernen Mikroprozessors mit einigen Milliarden Transistoren in Röhrentechnik vor ... Obwohl, es gab Röhren-Rechner, riesige Schränke mit zig Kilowatt Leistungsbedarf, wie z. B. den ENIAC (Bild 1), den Colossus oder den deutschen Zuse Z22. Von den 1940er- bis 1960er-Jahren waren sie leistungsstark und begründeten die Anfänge der elektronischen Rechentechnik.

Aufgrund der genannten Nachteile ergaben sich schon früh viele Gründe, alternative Bauteile zu entwickeln, die all diese negativen Eigenschaften nicht haben. Eine physikalische Grundlage hatte Walter Schottky mit der Raumladungstheorie geschaffen.

Ein weiterer in Deutschland tätiger Physiker, der später in die USA ausgewanderte Julius Edgar Lilienfeld, machte 1925 eine bahnbrechende Entwicklung mit einem kanadischen Patent öffentlich – er entwickelte den Feldeffekt-Transistor (Bild 2, [1]) und zeigte damit den grundlegenden Aufbau des Transistors, wie wir ihn heute kennen. Umzusetzen war der Aufbau zu dieser Zeit noch nicht, weil man die erforderlichen Halbleitermaterialien nicht verfügbar hatte. Da Lilienfeld seine Erfindung nicht publizierte, fand sie auch kein Interesse in der Industrie. Später stellte sich bei Nachbauten seines Entwurfs heraus, dass der Transistor tatsächlich unmittelbar funktionsfähig war.

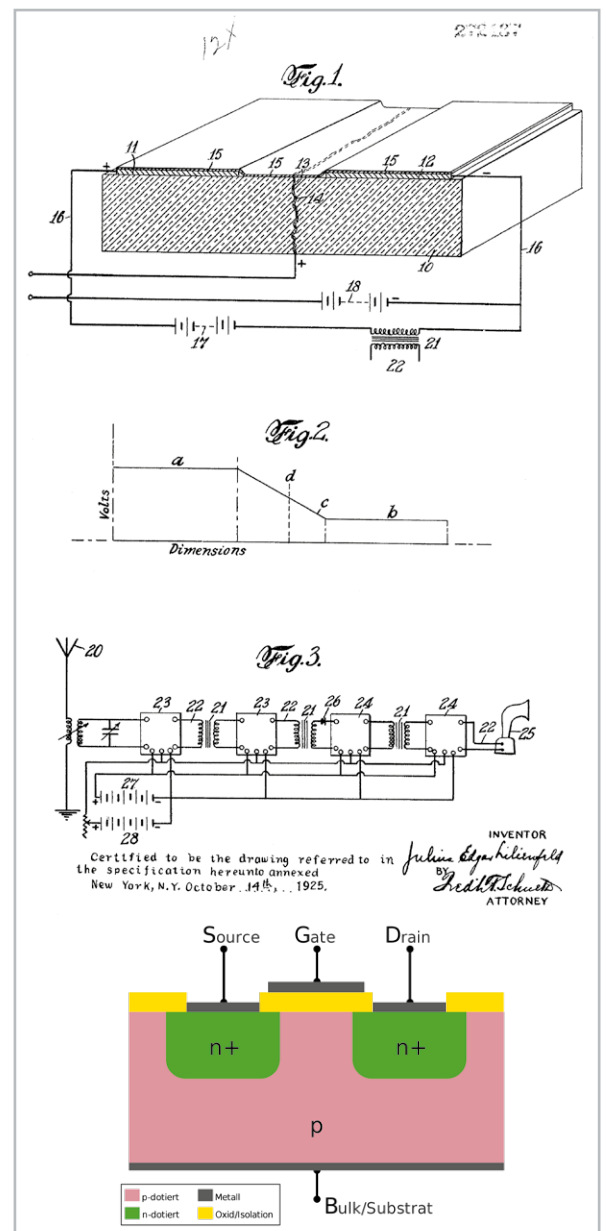


Bild 2: Das Patent von Lilienfeld zeigt bereits 1925 den typischen Aufbau eines Transistors. Lilienfeld hat den Feldeffekt-Transistor erfunden, konnte ihn aber aus technologischen Gründen nie umsetzen. Unten der Aufbau eines FETs heute  
Bilder: Patent CA272437A [1]; Wikipedia CC BY-SA 2.5, Arne Nordmann

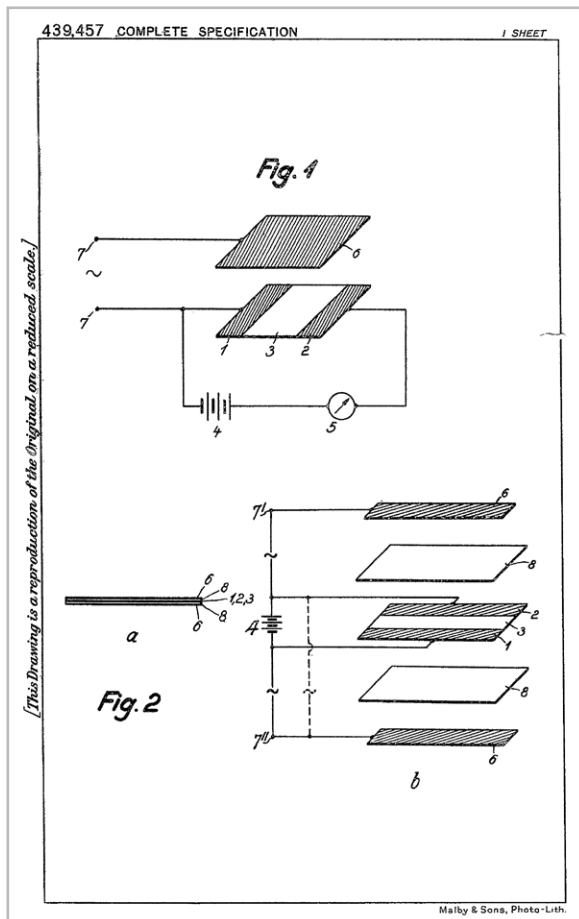


Bild 3: Oskar Heils Patentschrift zeigt ebenfalls den Grundaufbau eines FETs, hier allerdings mit isoliertem, kapazitiv wirkendem Gate. Bild: Patent GB439457A [2]



Bild 4: Der deutsche Halbleiter-Pionier Herbert Mataré entwickelte den ersten europäischen Transistor  
Bild: Privatarchiv Herbert Franz Mataré.  
Scanned by Wikinaut, CC BY-SA 3.0, [3]



Bild 5: Die späteren Nobelpreisträger John Bardeen, William Shockley und Walter Brattain erforschten und bauten für die Bell Laboratories den ersten Spitzentransistor und den Flächentransistor. Bild: Bell Labs

Einen ähnlichen Aufbau, jedoch mit bereits isoliertem Gate (kapazitive Steuerung), wie wir es heute kennen, hat 1934 der deutsche Physiker Oskar Heil zum Patent angemeldet (Bild 3, [2]). Auch er hat den Aufbau noch nicht praktisch realisieren können.

Dennoch bleibt festzustellen, dass damit der FET zumindest in der Theorie und den physikalischen Grundlagen des Transistors der erste Transistor weit vor dem später realisierten Bipolartransistor war.

### Der Wettlauf zwischen Mataré und Bell Labs

Zugegeben, es ist etwas überspitzt formuliert, aber während des Zweiten Weltkriegs und danach gab es durchaus aufgrund der schnell fortschreitenden Forschung und der technologischen Erschließung von Halbleitermaterialien einen Technologiewettkampf vor allem zwischen Deutschland und den USA. Gewissermaßen als „Abfallprodukt“ der rasant vorangetriebenen Radartechnik im Zweiten Weltkrieg entwickelte der deutsche Physiker Herbert Mataré (Bild 4) bei Telefunken quasi das erste praktisch nutzbare Halbleiterbauelement, eine als Detektor in Radargeräten eingesetzte und mit Silizium und Germanium aufgebaute Doppelspitzendiode. Er brachte dabei erstmalig zwei Metallelektroden auf ein Halbleitersubstrat auf. Dabei konnte er beobachten, dass eine Spannungsänderung an der einen Elektrode via Halbleitersubstrat den Stromfluss durch die andere Elektrode beeinflusste.

Durch die Wirren des Kriegs gelang es Mataré erst ab 1945, diese Beobachtungen in seiner Zeit bei der französischen Firma F & S Westinghouse in die Praxis umzusetzen. Er entwickelte mit seinem Kollegen Heinrich Welker zunächst den ersten praktisch realisierbaren FET, später dann den Bipolartransistor. Darauf kommen wir noch zurück.

### Wie der Spitzentransistor bei Bell entstand

Zur gleichen Zeit forschten John Bardeen, William Shockley und Walter Brattain (Bild 5) in den Bell Laboratories (USA) ebenfalls an dieser Technik. Sie wurden von Bell als Forschergruppe gebildet, um die damals verwendete Technik der Bell-Telefonsysteme, konkret die relativ schnell ausfallenden Vakuumröhren und die elektromechanischen Schalter, durch Halbleitertechnik abzulösen. Sie konnten sich auch bereits auf die Forschungen und Entwicklungen von Bell stützen, für die Radartechnik leistungstarke Germanium-Mischerdioden herzustellen.

William Shockley hatte zuvor schon erste Forschungsergebnisse ähnlich denen von Lilienfeld, Heil und Mataré auf dem Gebiet des Feldeffekt-Transistors erreicht, jedoch ebenfalls zunächst noch keine praktisch nutzbaren Transistoren entwickeln können. Shockley hatte sich zum Ziel gesetzt, ein steuerbares Halbleiterelement zu entwickeln, das ähnlich wie die Röhren-Triode funktioniert. Dabei kam ihm die Forschungsarbeit von John Bardeen zugute, der auf dem Gebiet der Quantenmechanik forschte und das Ziel verfolgte, die schon von Mataré beobachteten und auch von Bardeen entdeckten Oberflächeneffekte der Halbleitermaterialien praktisch nutzbar zu machen. Auch Schottkys Forschungsergebnisse flossen hier als Grundlage mit ein.

Der Ansatz war, den bereits seit 1906 bekannten Elektronenfluss-Effekt der Diode vom Emitter zum Kollektor zu steuern, indem man die beiden Anschlüsse auf je einer Seite eines Halbleiterkristalls aufsetzte. Hier fließt zunächst kein Strom. Erst, wenn man über einen dritten Kontakt (Basis) per anliegender positiver Spannung sogenannte Defektelektronen und damit quasi winzige Löcher in den Halbleiterkristall einbringt, kommt, je nach Höhe der Spannung an der Basis, ein ebenso variierender Stromfluss vom Emitter zum Kollektor zustande. Damit dies funktionieren kann, müssen die Elektroden sehr nahe beieinanderliegen und der Bereich, in dem die Defektelektronen eingebracht werden, muss sehr klein und klar abgegrenzt sein.

Das liest sich einfach, auf dem Weg zur praktischen Umsetzung hatten die Forscher jedoch zahlreiche Hürden zu bewältigen, die das noch weitgehend in seinem Verhalten unbekannte und erst spät hochrein vorliegende Halbleitermaterial aufstellte. Den Durch-

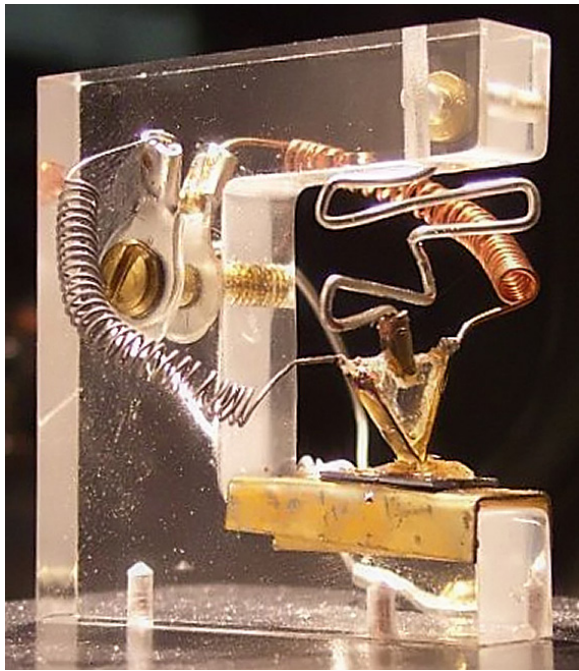


Bild 6: Der Nachbau des Bipolar-Transistors von John Bardeen und Walter Brattain steht im Nixdorf-Museum in Paderborn. Bild: Wikimedia, CC BY-SA 3.0

bruch konnten Bardeen und Brattain durch einen aus heutiger Sicht vermeintlich einfachen Laboraufbau erzielen: Man brachte eine Goldfolie, die eine gute Kontaktierung sichert, auf einen Träger auf und schnitt einen extrem schmalen Spalt hinein. Darauf kam der Halbleiterkristall, auf dessen Gegenseite über einen Kontakt (Basis) eine Spannung angelegt wurde. Durch den steuerbaren Defektelektronenfluss von der Basis aus wurde nun ein Stromfluss zwischen den beiden anderen Kontakten erzielt. Damit war der erste funktionierende Bipolar-Transistor in seiner Urform als Spitzentransistor entstanden.

In Bild 6 ist ein Nachbau dieser Anordnung zu sehen, Bild 7 zeigt die Zeichnungen des später dazu

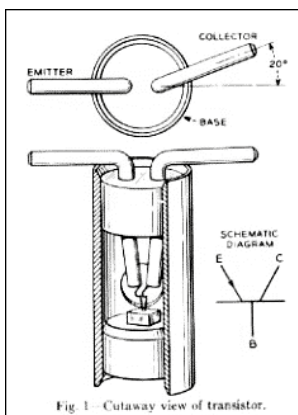


Bild 8: Der berühmte „Type A“-Transistor von Bell im Metallgehäuse war der erste in Serie gefertigte Transistor. Bilder: Copyright 2001-2017 by Jack Ward, transistormuseum.com

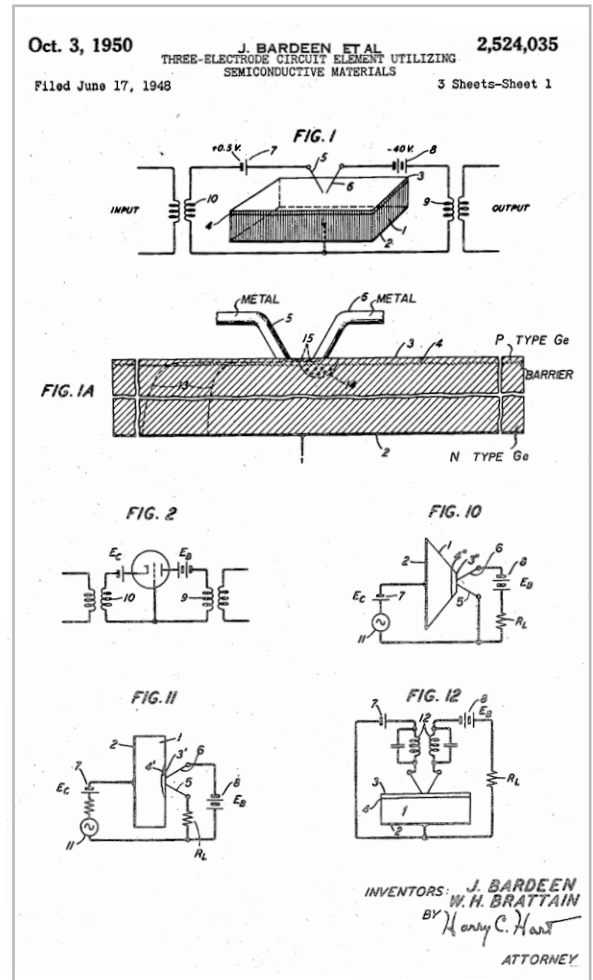
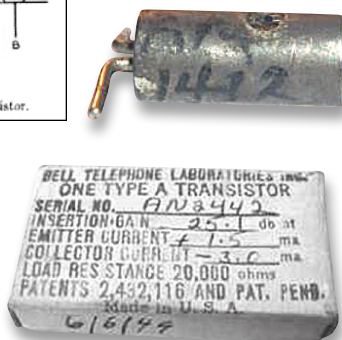


Bild 7: Das bahnbrechende Patent „Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials“ für den Bipolar-Spitzentransistor von Bell Telephone Lab INC. Bild: Patent US2524035A [4]

eingereichten US-Patents [4]. Vergleicht man es mit der Lilienfeld-Patentschrift von 1925, erkennt man deutliche Parallelen des Wirkmechanismus, ebenso zur Arbeit von Heil. Allerdings erwähnten die Bell-Forscher diese Vorarbeit nie – sie hatten ja einen Bipolar-Transistor entwickelt, Lilienfeld den FET beschrieben ...

Eingesetzt wurde hier ein Germaniumkristall statt des ursprünglich angestrebten Siliziums, da die Germanium-Schmelzpunkttemperatur besser im Labor beherrschbar war als die um gut 500 °C höhere Schmelzpunkttemperatur des Siliziums.

Danach ging es schnell – innerhalb weniger Wochen entwickelten die Bell-Forscher das Design weiter und präsentierten nach mehreren Zwischenstufen schließlich am 23. Dezember 1947 einen funktionierenden Verstärker mit einem PNP-Spitzentransistor, der eine 18-fache Leistungsverstärkung aufweisen konnte. Dieser Tag gilt als Geburtsstunde des Transistors. Veröffentlicht hat Bell dies allerdings erst im Juni 1948 mit der o. a. Patentschrift, quasi gleichzeitig mit der Vorstellung des in einem Metallgehäuse untergebrachten „Type A“ (Bild 8), der danach in einer ersten Serie vieltausendfach hergestellt wurde. Zunächst interessierte sich vor allem das Militär für die neue Erfindung, später vergab Bell Produktionslizenzen, u. a. auch an Siemens.

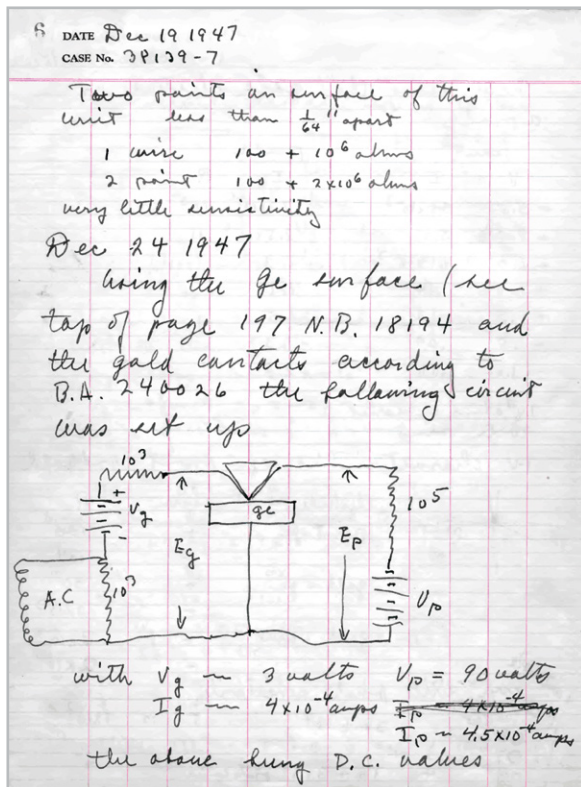


Bild 9: Der Auszug aus Walter Brattains Labortagebuch zeugt von der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Geburtstagskinds vom 23.12.1947. Quelle: [5]

Im Internet-Archiv findet man zur weiteren unmittelbar nach der internen Vorstellung weiterlaufenden Entwicklung ein lesenswertes Dokument – einen längeren Labortagebuch-Auszug von Walter Brattain (Bild 9 zeigt einen Ausschnitt, [5]), dem man die Dynamik der Entwicklung entnehmen kann. Das Dokument ist auch ein Nachweis für die zeitliche Abfolge der Erfindung, da Bell zunächst damit nicht an die Öffentlichkeit ging. Kuriosum am Rande: Da Shockley nicht involviert war und am Flächentransistor arbeitete, war das Tagebuch für ihn tabu. Denn Bardeen und Brattain spielten bei der Umsetzung des Spitzentransistors die Hauptrolle, parallel dazu arbeitete Shockley, der an der praktischen Umsetzung des Spitzentransistors kaum einen Anteil hatte (und deshalb auch nicht in der Patentschrift erscheint), am heute genutzten Flächentransistor (Bild 10, [6]), den er Anfang 1948 vorstellen konnte.

Apropos „Transistor“. Zur Vorstellung gab es den Namen noch nicht, sondern allerhand Umschreibungen wie z. B. „Semiconductor Triode“. Erst nach einer internen Ausschreibung zur Namensfindung gewann der Begriff „Transistor“, ein Kunstwort aus „Transfer“ und „Varistor“. John R. Pierce, der Forschungsleiter, gab den neuen Namen bekannt. [7]

### Gleichzeitig oder Zweiter?

Wir erinnern uns: Herbert Mataré und Heinrich Welker arbeiteten in Frankreich ebenfalls an der Entwicklung eines praktisch einsetzbaren Transistors. Mataré hatte, ähnlich wie Brattain und Bardeen, das Defektelektronen-Phänomen beobachtet, aber nicht weiter erforschen können. Die beiden deutschen Physiker entwickelten quasi parallel zu

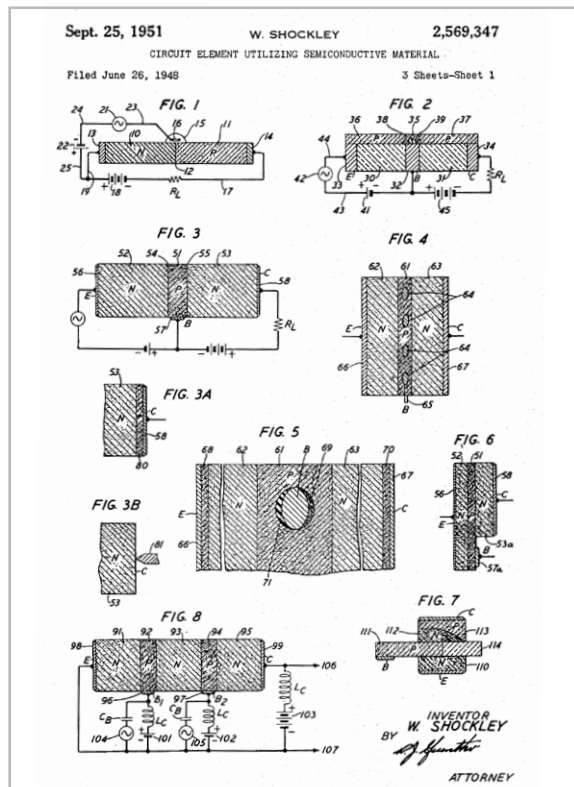


Bild 10: William Shockleys Patent für die Erfindung des Flächentransistors. Bild: Patent US2569347A [6]

den US-Amerikanern im Laufe des Jahres 1947 den signalverstärkenden Transistor. Beide Forschergruppen wussten anscheinend nichts voneinander, zumindest findet man nirgends Hinweise darauf, zudem hat Bell die Erfindung zunächst tatsächlich geheim gehalten.

Anfang 1948 hatte es Mataré nach der Entwicklung einer Germaniumdioden-Serie geschafft, einen stabil arbeitenden Spitzentransistor auf Basis des von Welker hergestellten hochreinen Germaniums zu bauen. Aber er hatte, rein zeitlich gesehen, den Wettlauf verloren, denn bereits am 30. Juni 1948 machte Bell die Erfindung gleichzeitig mit der Patenteinreichung bei einer Pressekonferenz öffentlich, während Mataré sein Patent erst am 13. August 1948 einreichte. Erst im Mai 1949 wurde auch seine Erfindung in Paris veröffentlicht. Da das Wort „Transistor“ schon durch Bell besetzt war, bezeichnete man den auch „Europäischen Transistor“ (Bild 11, [8]) genannten Spitzentransistor von Mataré zunächst als „Transistron“. Er ging sofort in Produktion, arbeitete hauptsächlich als Verstärker im französischen Telefonsystem, erlangte aber trotz besserer Daten als sein US-Pendant keinen wirtschaftlichen Erfolg. Herbert Mataré, der insgesamt mehr als 80 Patente anmeldete, ging später zurück nach Deutschland und baute hier die Firma Intermetall auf, die in der Folge Halbleiter in Massenproduktion herstellte und vertrieb und sich u. a. unter Matarés Leitung um die Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von Germanium- und Silizium-Halbleitern verdient machte. Unter Herbert Mataré hat Intermetall allerdings auch einen Meilenstein der Elektronik gesetzt – 1953 stellte

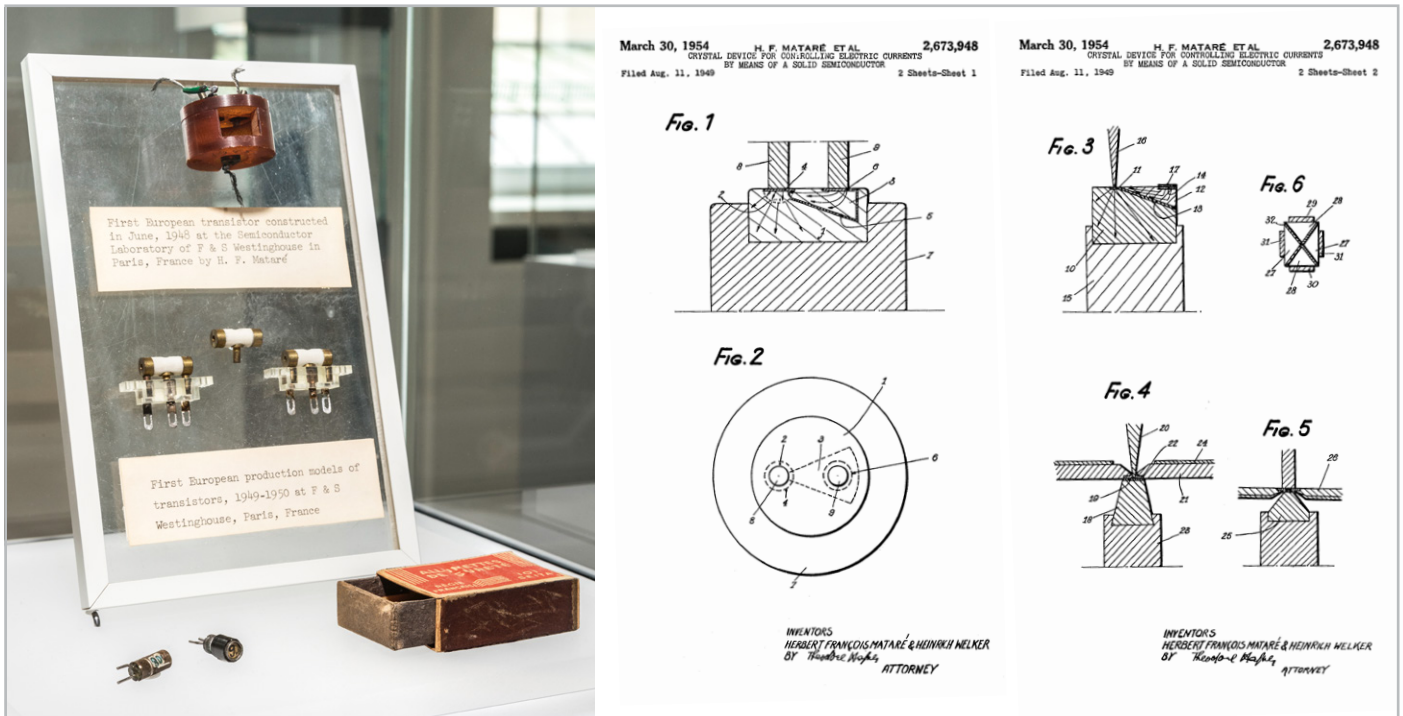


Bild 11: Der Prototyp und die Produktionsmodelle des ersten europäischen Transistors von Herbert Mataré und Heinrich Welker. Darunter sind ein Original-Type-A-Transistor von Bell und ein Siemens-Nachbau des Type A zu sehen. Bild: Deutsches Museum München, CD86869/ [8]

die Firma auf der Düsseldorfer Funkausstellung das erste Mittelwellen-Transistorradio der Welt vor, allerdings nur als Labormuster. Es war ein Audionempfänger mit vier Transistoren und erschien ein Jahr vor dem ersten US-Transistorradio von Texas Instruments. Man kann es also als eine Posse der Forschungsgeschichte betrachten, dass der Transistor quasi in zwei Laboren gleichzeitig erfunden wurde.

Den Lohn ernteten die Ersten: Bardeen, Brattain und Shockley erhielten 1956 den Nobelpreis der Physik für ihre Forschung und die Erfindung des Transistors.

Mataré wurde erst eine späte Ehrung zuteil – er erhielt für seine Erfindung 2008 den „inoffiziellen Nobelpreis für Technik“, den Eduard-Rhein-Preis der gleichnamigen Stiftung.

Die Geschichte des Transistors entwickelte sich rasant weiter: Silizium löste bald Germanium als Halbleitermaterial ab, der Flächen-(Junction-)Transistor erschien produktionsreif, der MOSFET in seinen vielen Bauformen ...

Herzlichen Glückwunsch der Erfindung des 20. Jahrhunderts!

ELV

## i Weitere Infos

- [1] Patent CA272437A  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/035202468/publication/CA272437A?q=pn%3DCA272437>
- [2] Patent GB439457A  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/006507313/publication/GB439457A?q=pn%3DGB439457>
- [3] Herbert F. Mataré  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3450964>
- [4] Patent US2524035A  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/026682082/publication/US2524035A?q=pn%3DUS2524035>
- [5] Labortagebuch von Walter Brattain  
[https://web.archive.org/web/20120725100038/http://www.porticus.org/bell/pdf/brattain\\_lab\\_notebook.pdf](https://web.archive.org/web/20120725100038/http://www.porticus.org/bell/pdf/brattain_lab_notebook.pdf)
- [6] Patent US2569347A  
<https://patents.google.com/patent/US2569347A>
- [7] Das Memorandum zur Namensfindung von J. R. Pierce  
[https://www.smecc.org/bell\\_labs\\_holding\\_page.htm](https://www.smecc.org/bell_labs_holding_page.htm)
- [8] Patent US2673948A  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/009568994/publication/US2673948A?q=pn%3DUS2673948>

Alle Links finden Sie auch online unter: [de.elv.com/elvjournals-links](http://de.elv.com/elvjournals-links)