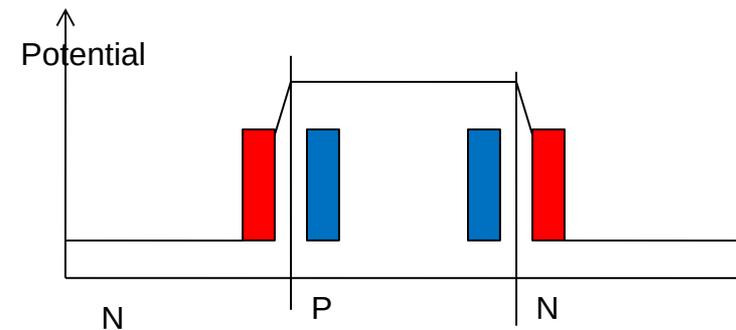
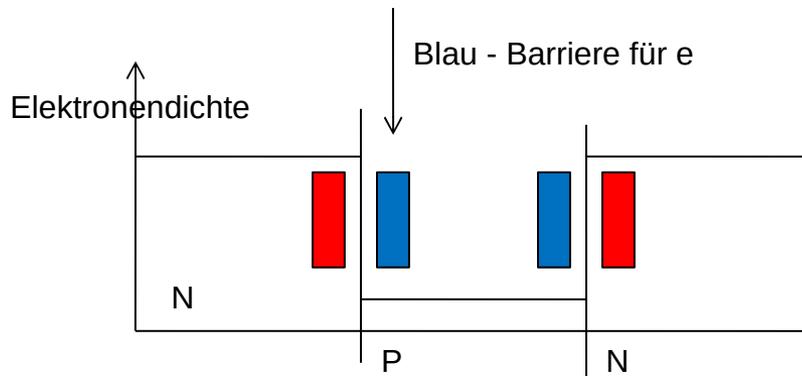
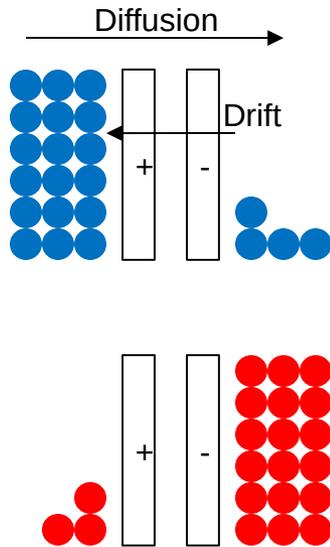


Transistor

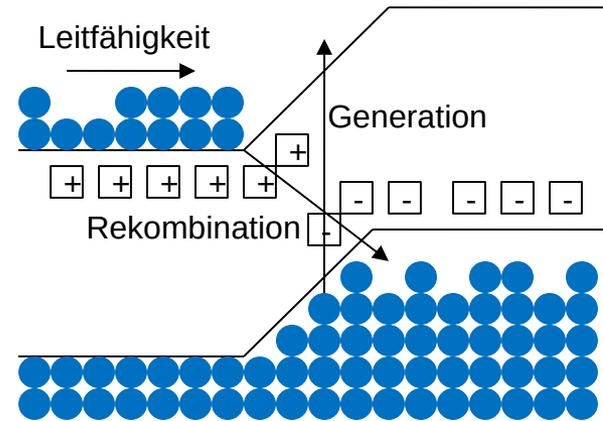
- Transistor: zwei Arten
- Bipolar, FET
- QM, HL
- Bändermodell
- Valenzband voll, Leitungsband leer \rightarrow R
- P \rightarrow e N ($1/1e6$)
- B \leftarrow e P
- Zwei Darstellungen \rightarrow Ladungsdichten/Potentiale



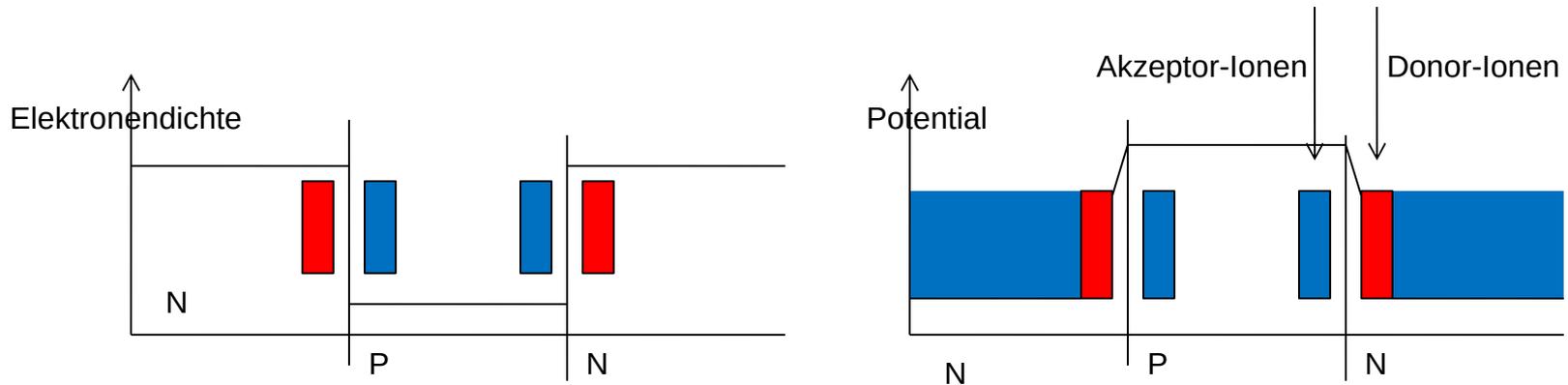
Ingenieur versteht so:



Wissenschaftler so:

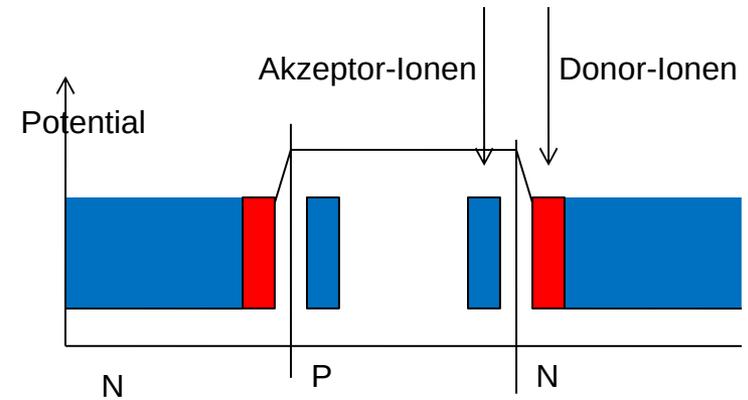
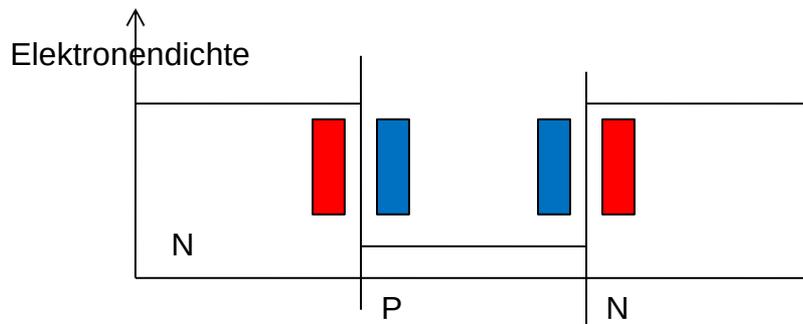
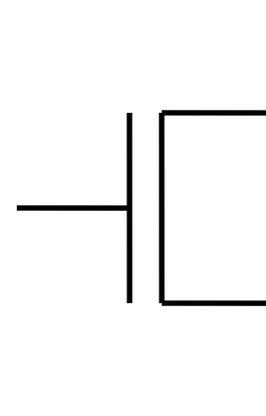


- Transistor: zwei Arten
- Bipolar, FET
- QM, HL
- Bändermodell
- Valenzband voll, Leitungsband leer \rightarrow R
- P \rightarrow e N ($1/1e6$)
- B \leftarrow e P
- Zwei Darstellungen \rightarrow Ladungsdichten/Potentiale

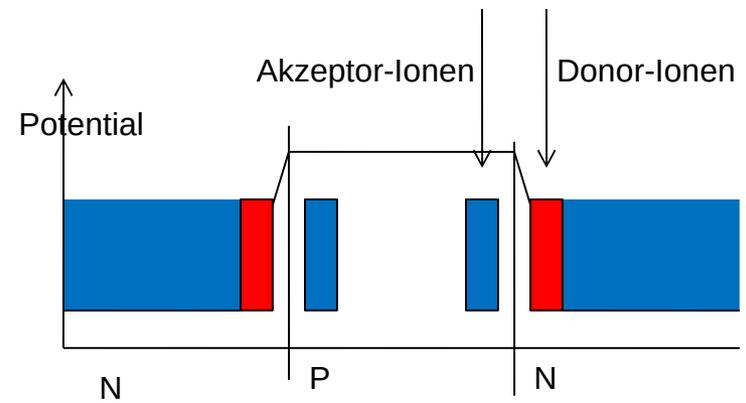
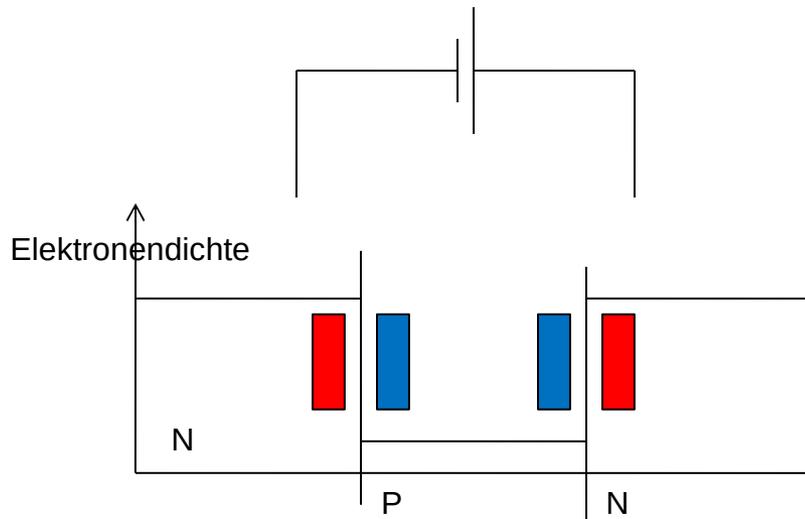


- Transistoreffekt
- Strom zwischen N-N Bereichen durch Spannung am P-bereich kontrollieren
- Verstärkung/Leistung

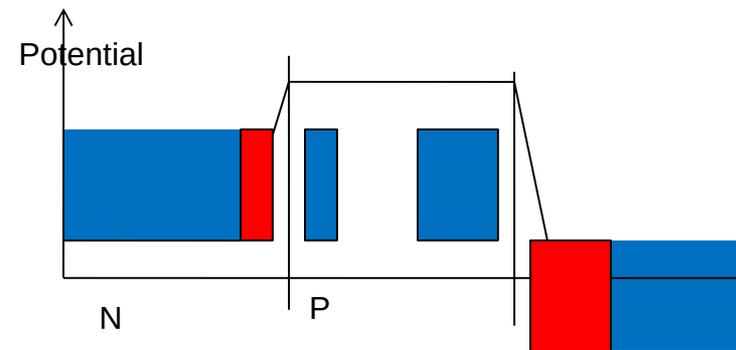
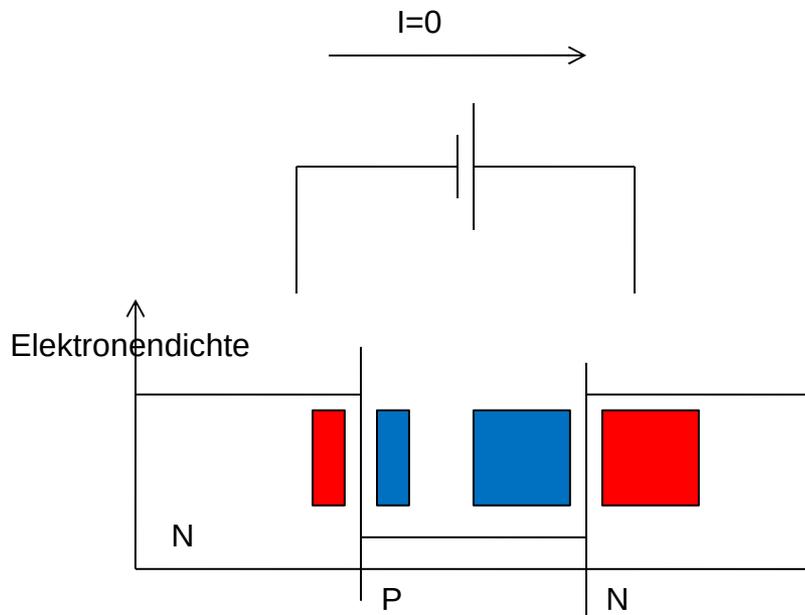
- FET



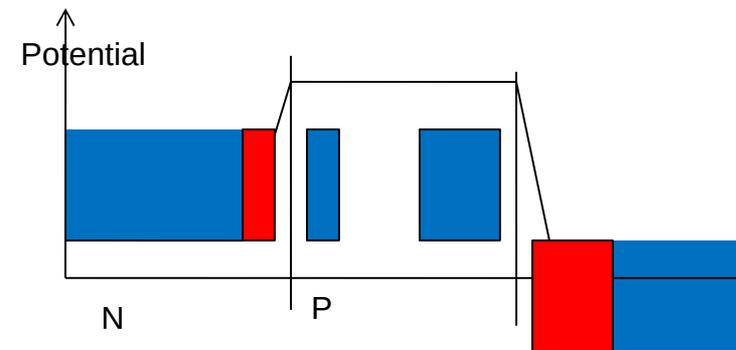
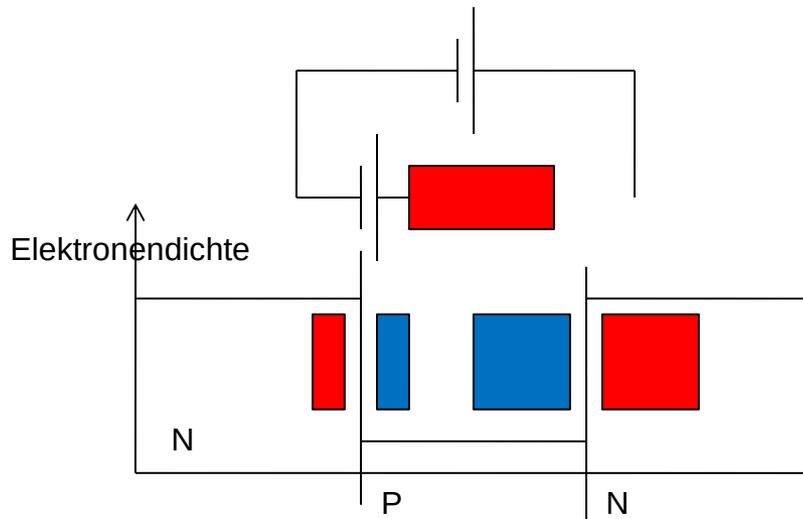
- FET



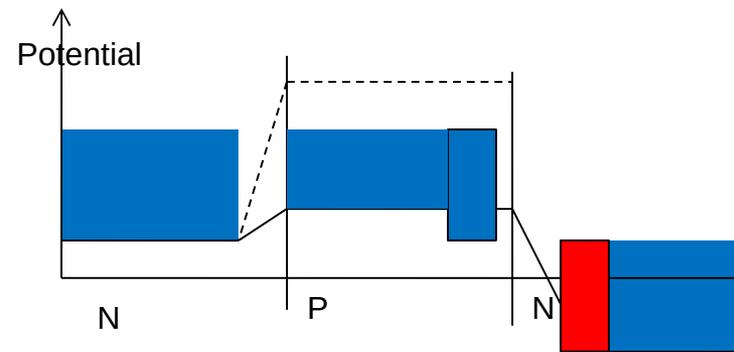
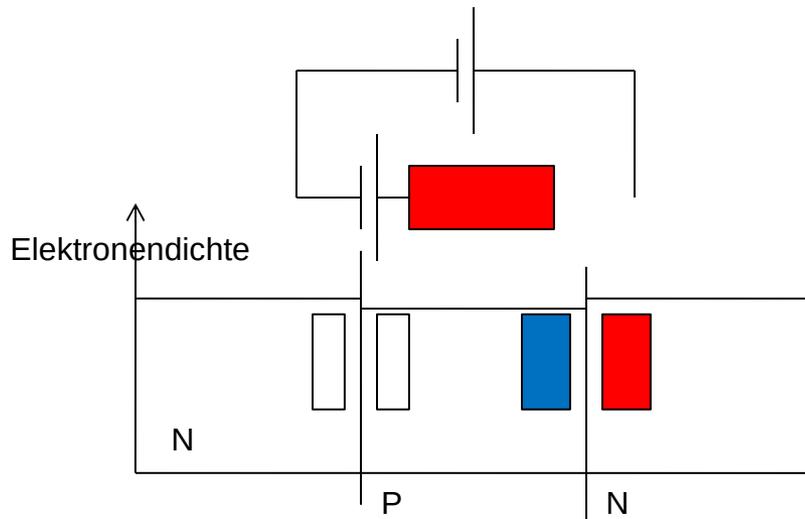
- FET



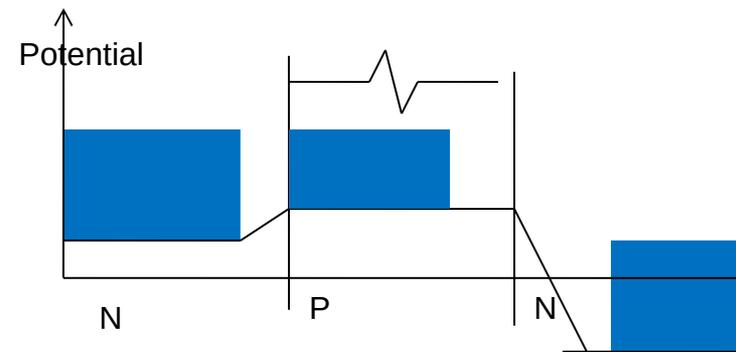
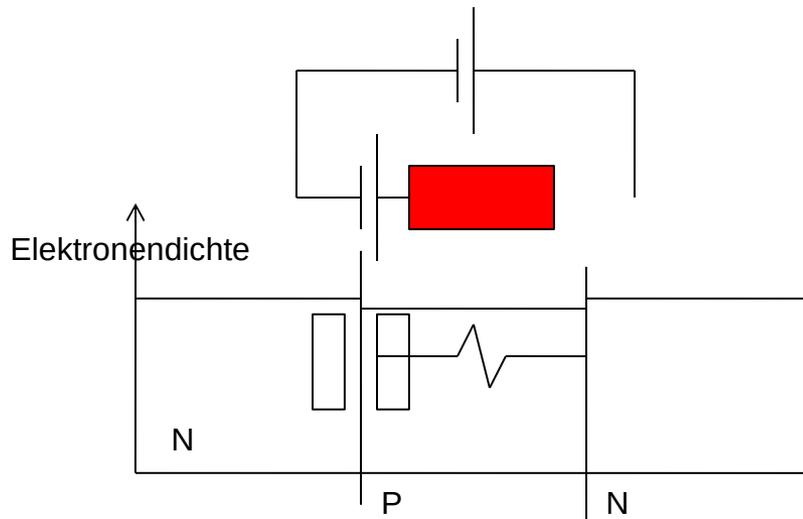
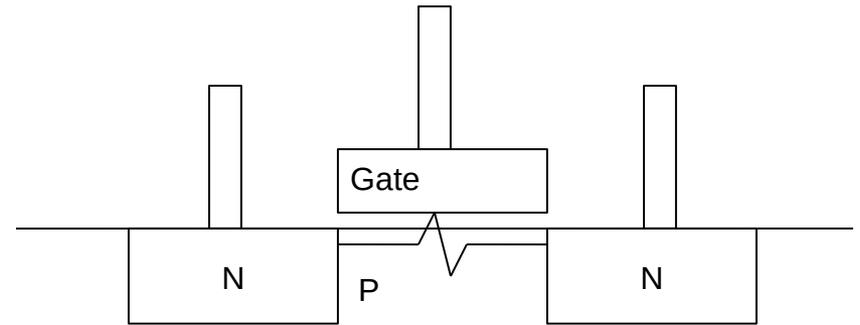
- FET



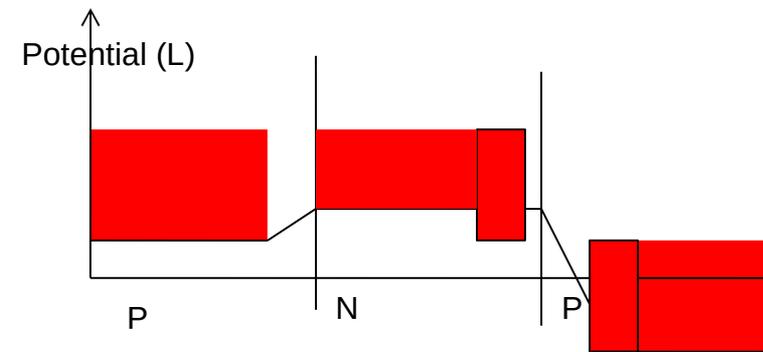
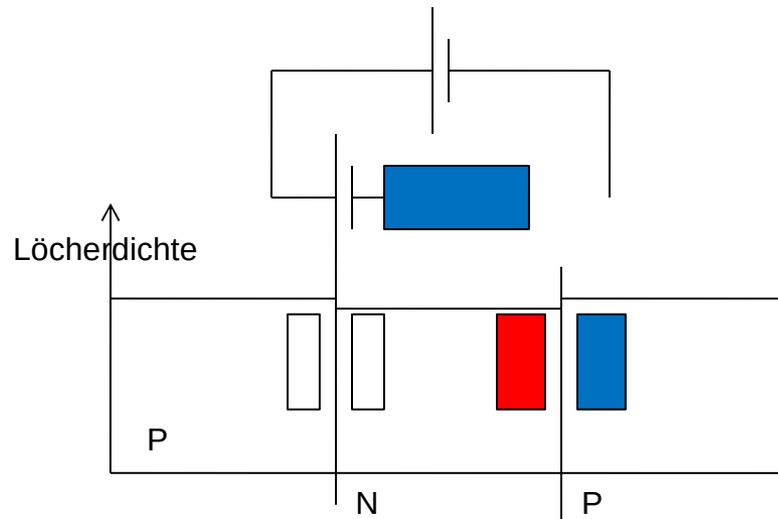
- FET



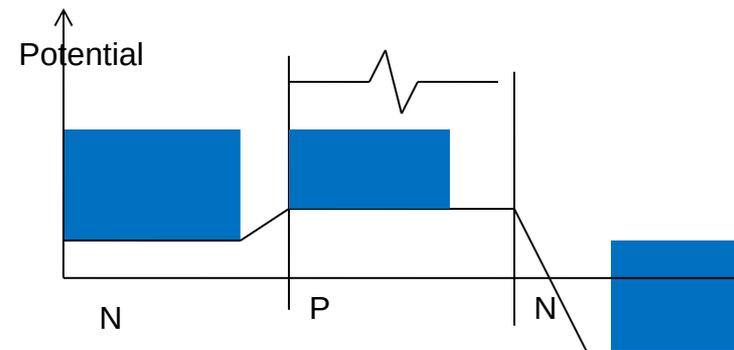
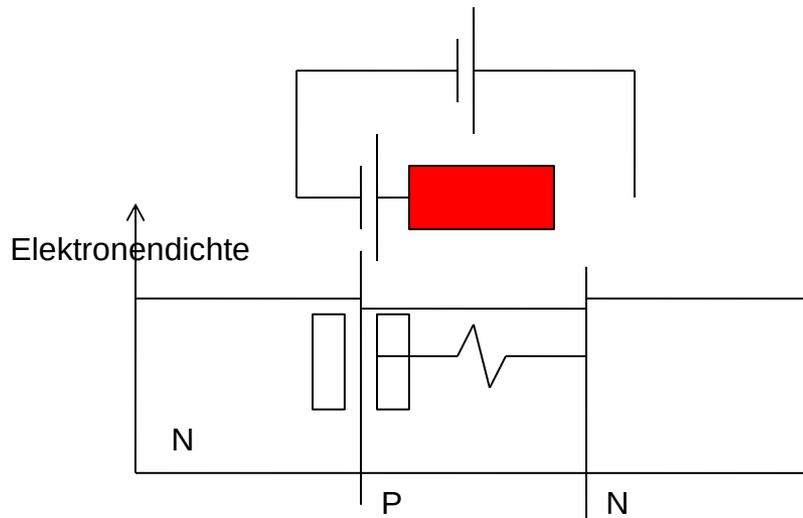
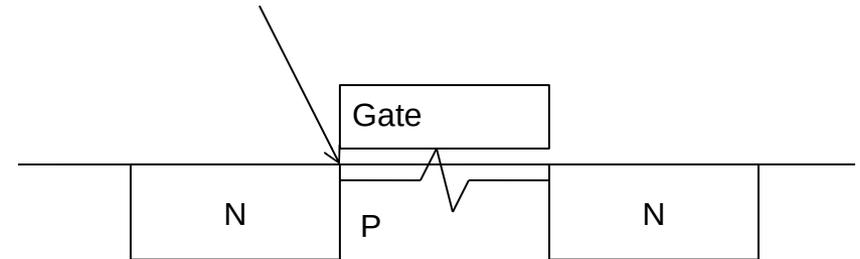
- FET
- Oberflächenstruktur
- Schalter
- NMOS



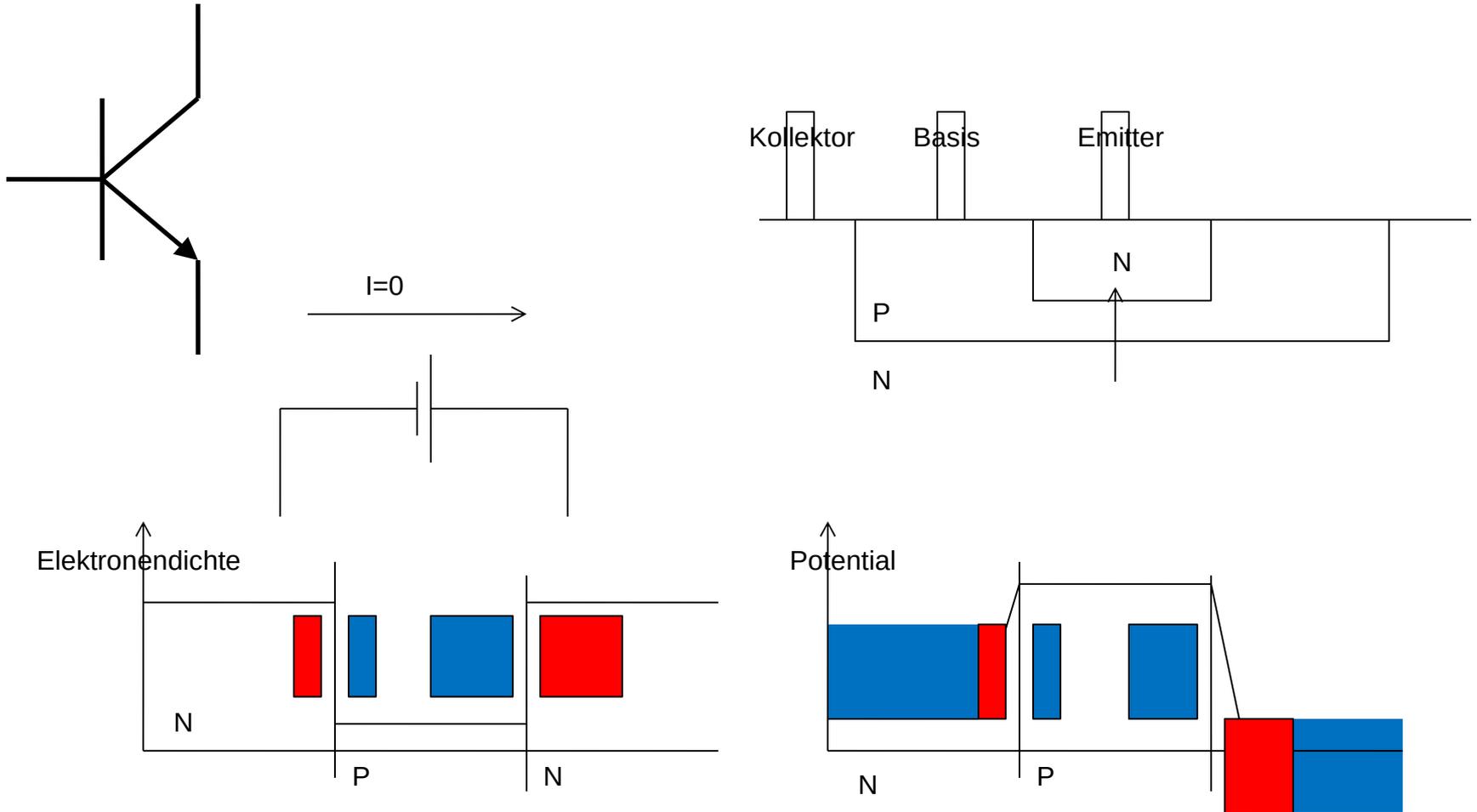
- PMOS



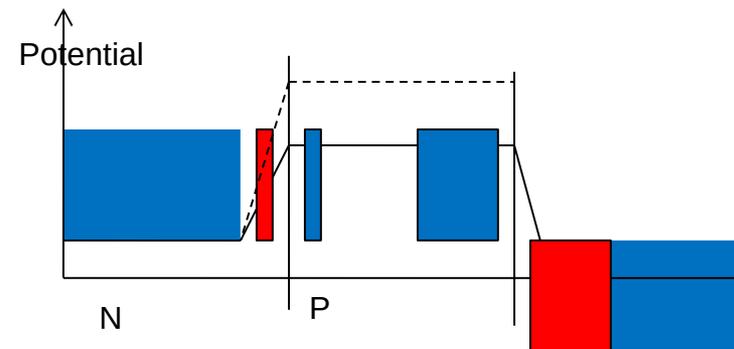
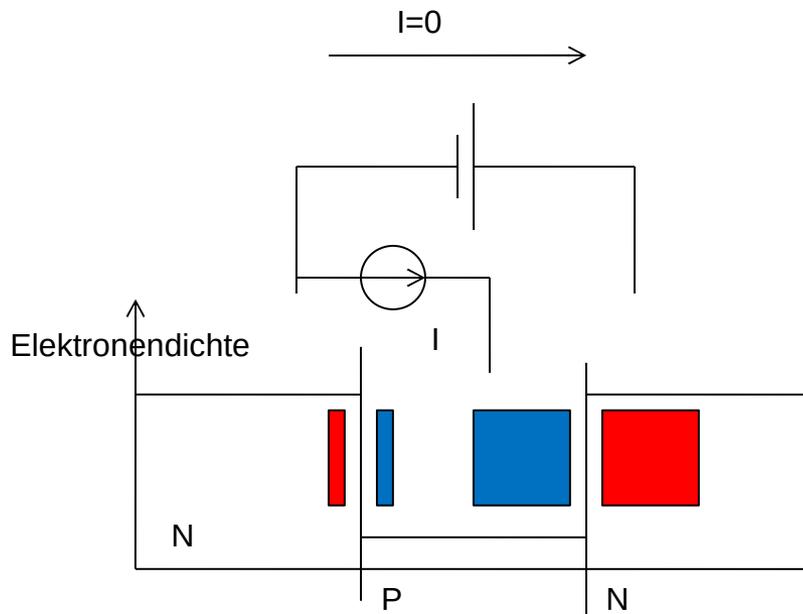
- Nur eine Art der Ladungsträger ist relevant für den Strom
- Der Strom fließt nur unmittelbar unter dem Isolator – Oberflächenstrom
- Eine dünne, Isolator-Lage ohne Verunreinigungen ist für die Funktionalität entscheidend



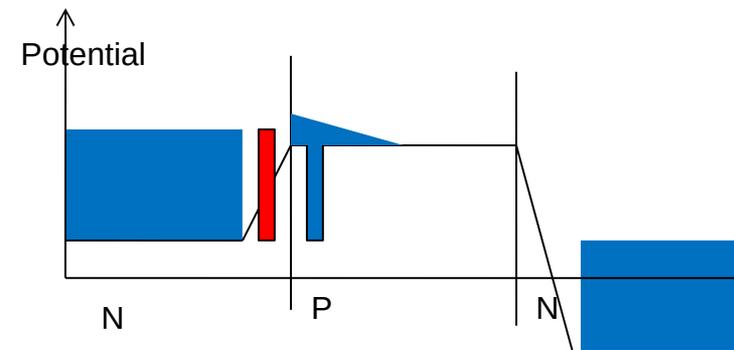
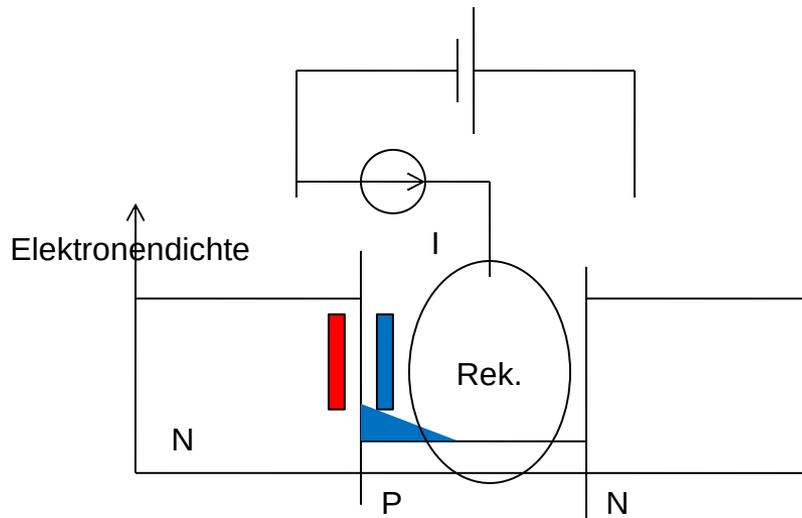
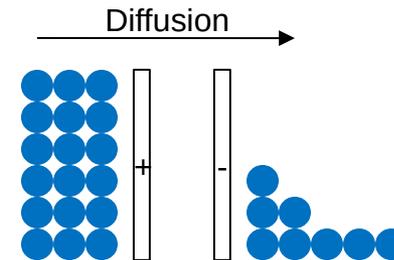
- Bipolartransistor



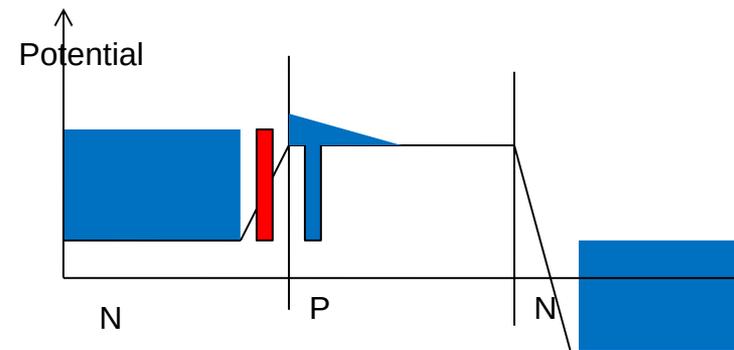
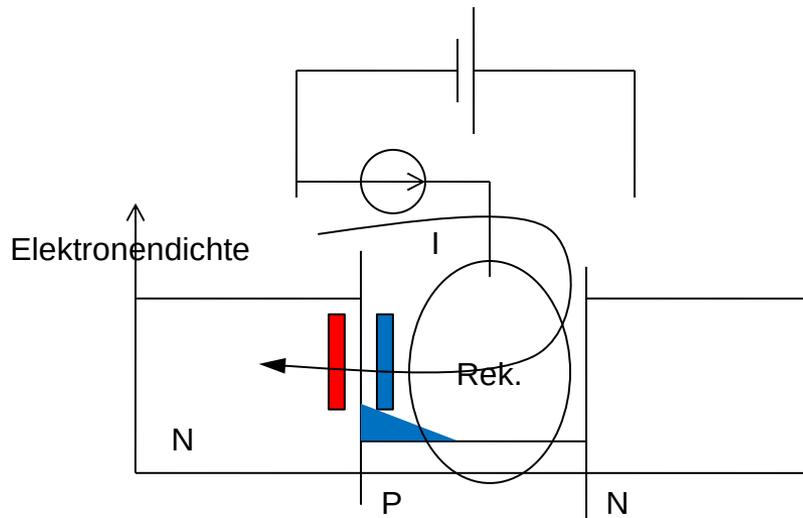
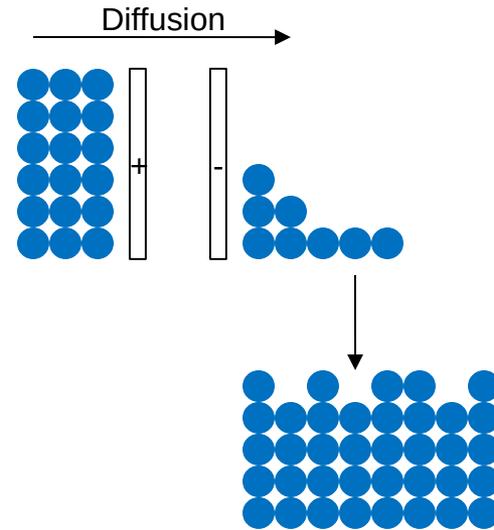
- Bipolartransistor
- Stromquelle, PN Diode leitet, Potentialbarriere niedriger



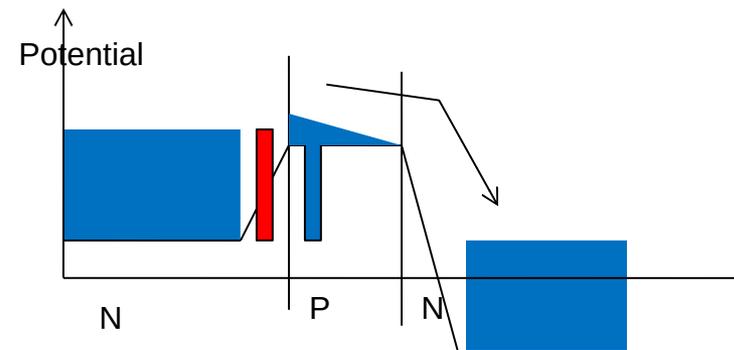
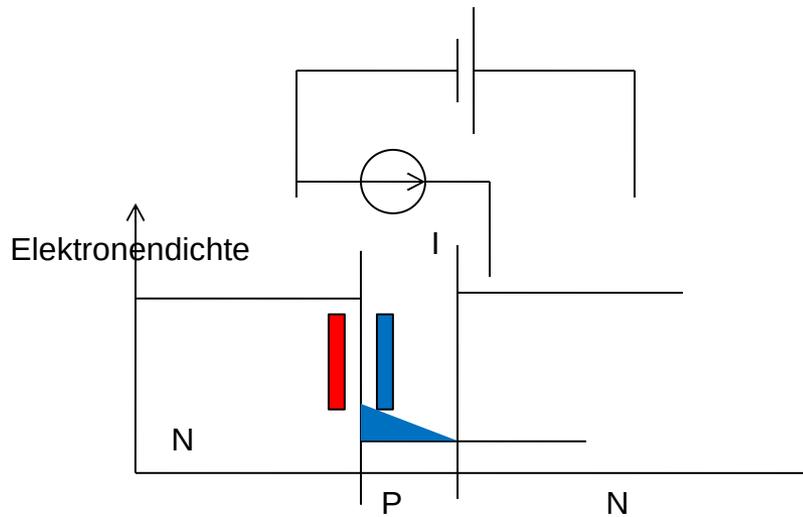
- Bipolartransistor
- Elektronen werden als Minoritätsträger in P Bereich injiziert
- Diffusion/Rekombination



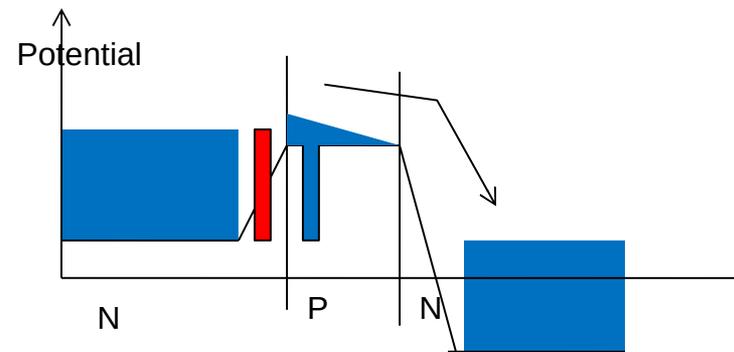
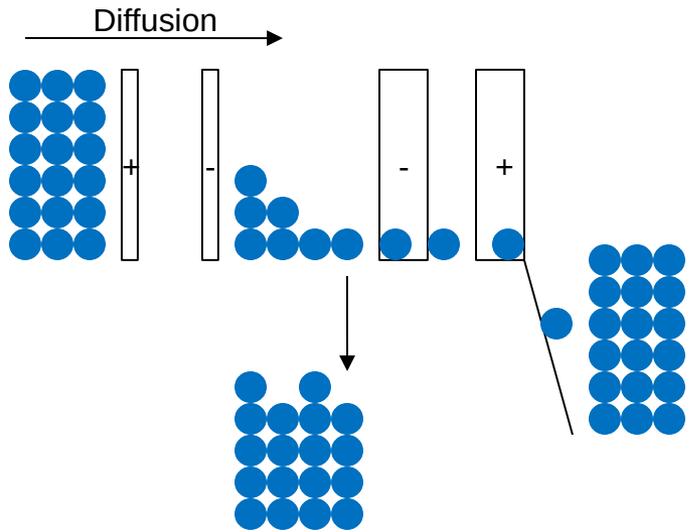
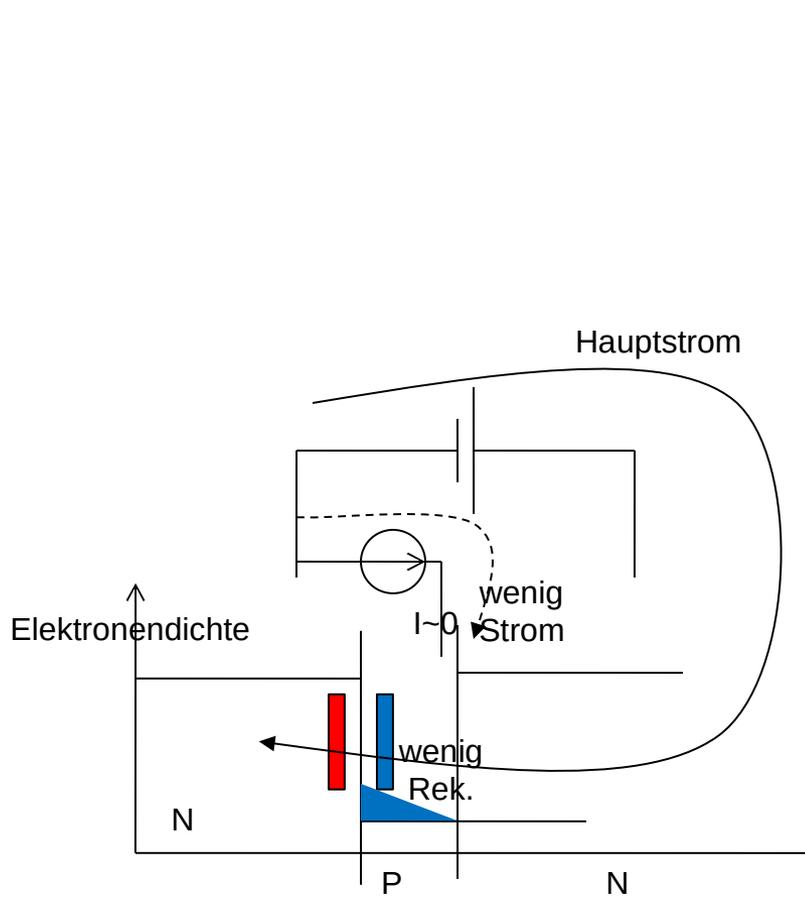
- Bipolartransistor
- Elektronen werden als Minoritätsträger in P Bereich injiziert
- Diffusion/Rekombination
- Noch kein Transistoreffekt



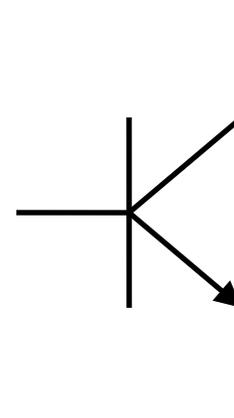
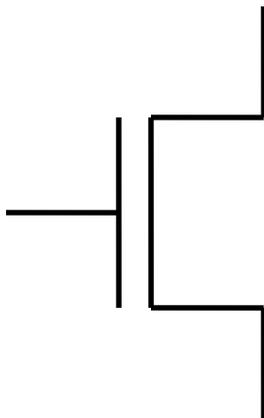
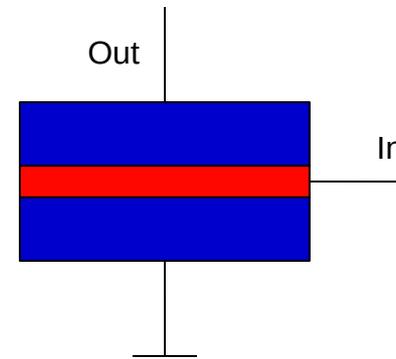
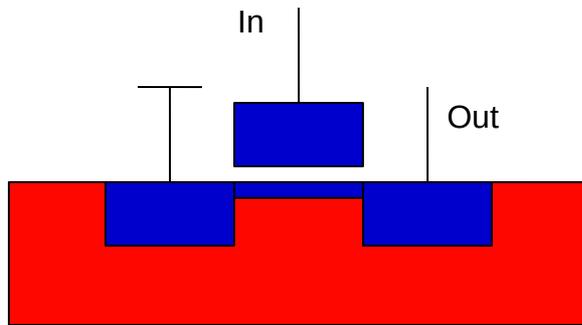
- Wenn Basis dünn ist, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein injiziertes Elektron am Rande des Kollektors gelangt, ohne vorher zu rekombinieren.
- Kollektorstrom



• ...



- Bipolar -> Diffusionsstrom
- FET -> Driftstrom (wie Widerstand)
- Bipolar -> Stromverstärker
- FET -> Strom durch Spannung kontrolliert
- Bipolar -> kein richtiger Schalter
- FET -> Schalter
- FET -> Strom an der Halbleiteroberfläche
- Bipolar -> Strom im Bulk (Körper/Volumen) des Transistors
- FET -> dünnes Isolator wichtig
- Bipolar -> dünne Basisschicht wichtig



Transistor - Geschichte

- Aus dem IEEE Paper: “The Invention of the Transistor”, Ian M. Ross
- Es gab komplexe Elektronik auch vor der Erfindung des Transistors (1947)
- **Elektronenröhren** oder elektromechanische **Relais**
- Radio (FM, AM), Mikrowellen, kleine Radioempfänger, Fernsehen, Faxgeräte, Video und Audiorekorder, Computer
- Im Sommer 1945, Mervin Kelly gründet die Gruppe am **Bell Labor** mit dem Ziel Untersuchung von Halbleitern und Suche nach dem Ersatz für Elektronenröhren und Relais
- *Kelly’s vision triggered one of the **most remarkable technical odysseys** in the history of mankind, a journey that has continued through 50 years. The semiconductor odyssey produced **a revolution in our society at least as profound as the introduction of steel, of steam engines, and the total industrial revolution.***
- *Electronics today pervades our lives and affects everything we do, whether at work or at home.*

- Zwei Bauteile vor T.
- **Relais**
- Magnetfeld wird benutzt um ein Stück Metall zu bewegen und Kontakt herzustellen
- Kleine Leistung im Magnet steuert viel größere Leistung in der Kontaktschaltung an
- Nachteil – langsam \sim ms
- **Elektronenröhren**
- Elektronen fliegen im Vakuum, werden von heisser Glühkatode emittiert und fliegen zur positiven Anode
- Schalter und Verstärker, schnell
- Elektronenfluss wird mit dem Potential am Gitter angesteuert
- Nachteil DC Leistung, kurze Lebensdauer (Vakuum), groß
- Halbleitertransistor sollte zuverlässiger sein (kein Vakuum, keine Glühkathoden)

- Bell Labors – NJ
- Gruppe Shockley, Brattain, Bardeen (Bardeen 2 x Nobelpreis – Transistor/Supraleiter)
- Ziel: Entwicklung des Transistors
- Dahmaliger Stand der Technik und Wissenschaft:
- Grundlagen der **Halbleiterphysik** bekannt (p, n, Energiebänder), **Dotierungstechnik**
- *In the case of germanium, it was Theuerer who first identified the presence of phosphorus as an n-type agent as a result of smelling traces of phosphine during ingot preparation.*
- Erste PN Dioden hergestellt
- Beste Siliziumqualität 99.8%, alles polykristalline Pulver, keine große Kristalle verfügbar



John Bardeen, William Shockley, and Walter Brattain.

- Anfangsidee: Feldeffekt-Transistor. Konzept seit in 1925 bekannt (Lilienfeld) aber nie hergestellt
- E-Feld sollte die Leitfähigkeit vom Halbleiter verändern
- 1946 Entscheidung: die Gruppe konzentriert sich auf Si und Ge und FET

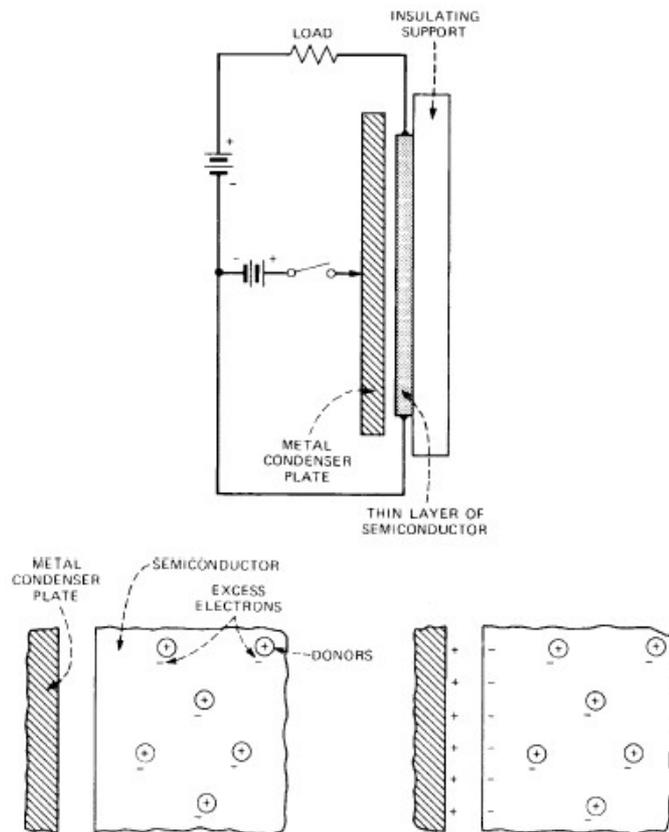
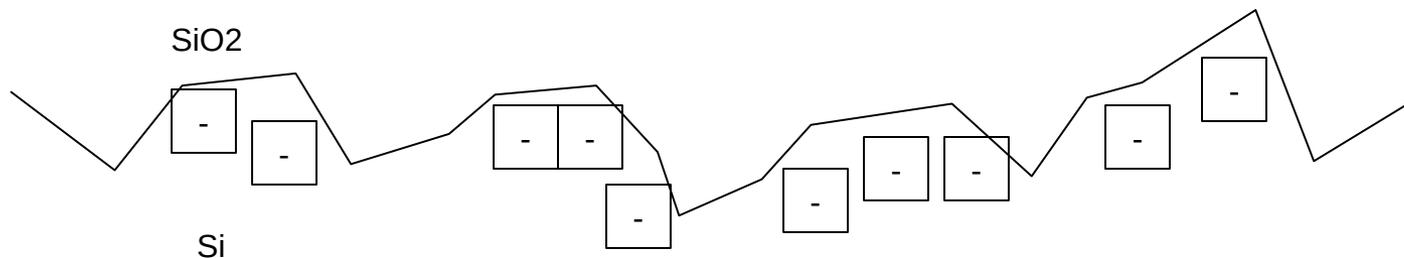
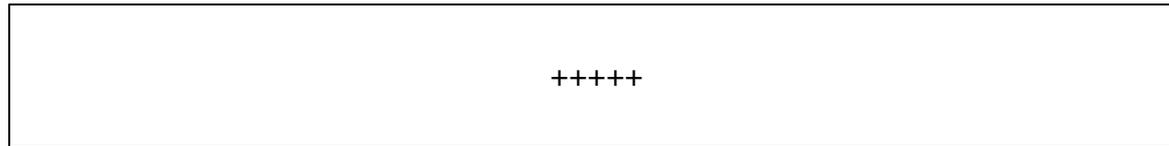


Fig. 1. Schematic of Shockley's field-effect idea. [12].

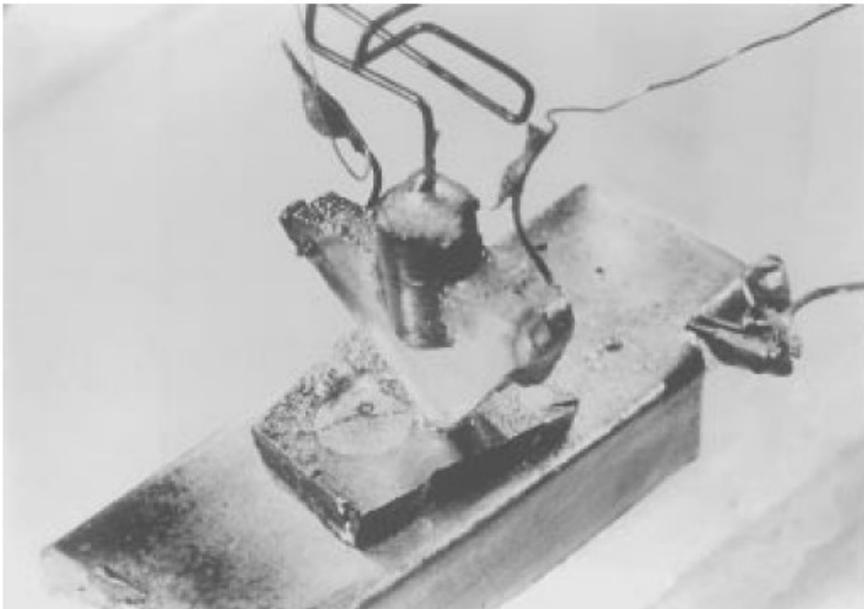
FET: Skizze von Schockley

- Kein Ergebnis
- Erklärung von Bardeen – Ladung an der Halbleiteroberfläche schirmt das Feld ab, Quantenzustände an der Oberfläche, unbewegliche Ladung
- Die Forscher versuchen die Oberfläche zu modifizieren...

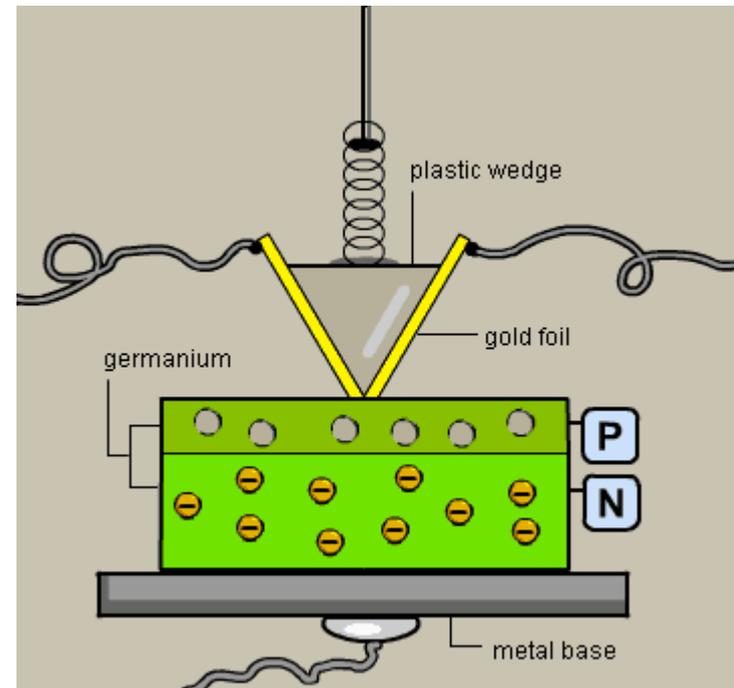


- „Spitzentransistor“
- Ein Keil, mit zwei goldenen Metallschichten (Emitter, Kollektor)
- Germanium Basis
- Ein Kontakt direkt gepolt, der andere in Sperrrichtung
- Dezember 1947

Original-Photo

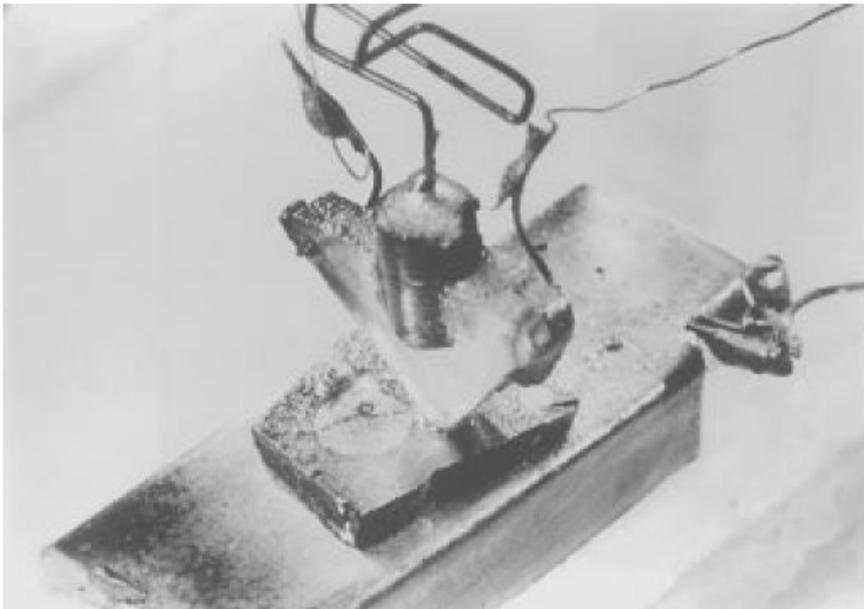


Prinzip

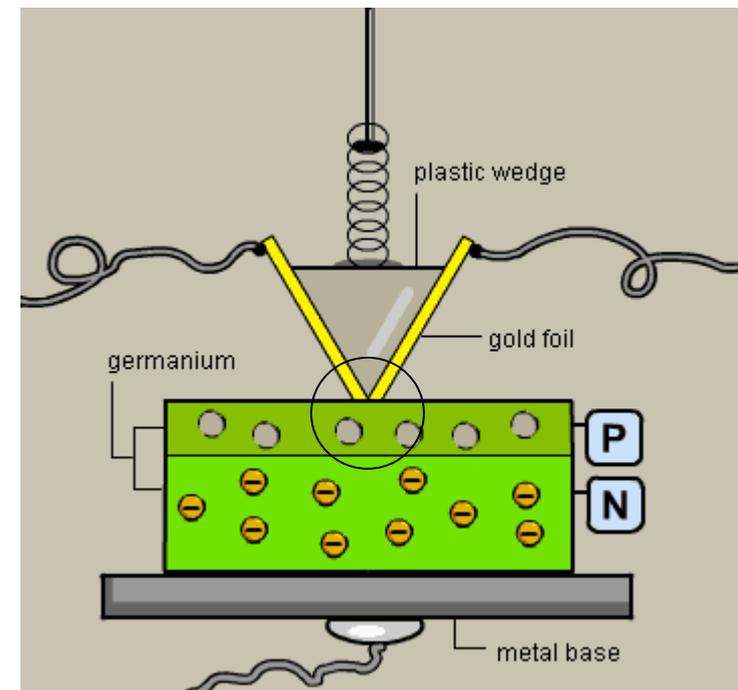


- „Transistoreffekt“
- 100x Leistungsverstärkung, Audioverstärker wurde gebaut
- Brattain, Bardeen dachen, es handelt sich um die Oberflächeneffekte, also FET

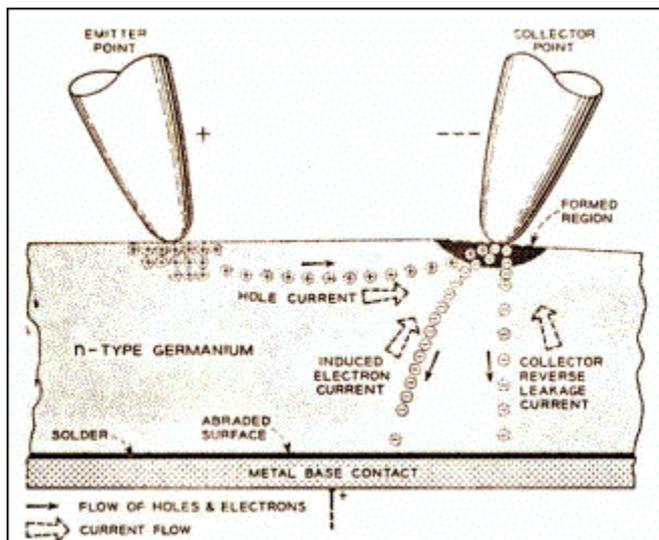
Original-Photo



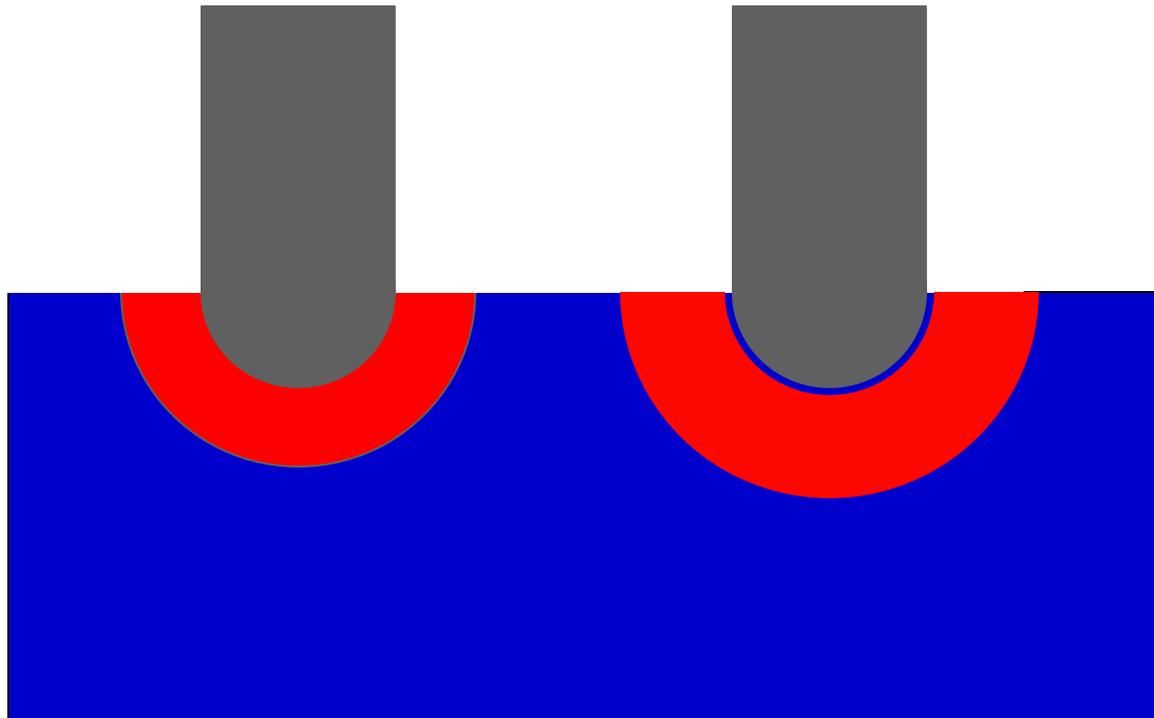
Prinzip



- Shockley vermutete etwas anderes:
- Strom im Substrat, Injektion von Minoritätsträger (P) aus Emitter in Basis
- Die Minoritätsträger können zum Kollektor diffundieren falls der n-Bereich dünn genug ist
- Er entwickelte innerhalb von Wochen die Theorie des bipolaren Transistors
- Beweisexperiment vorgeschlagen



- ...

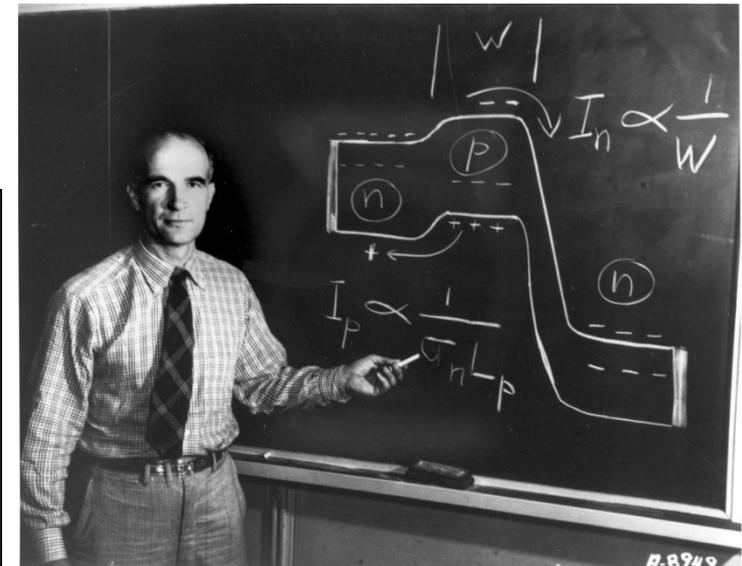
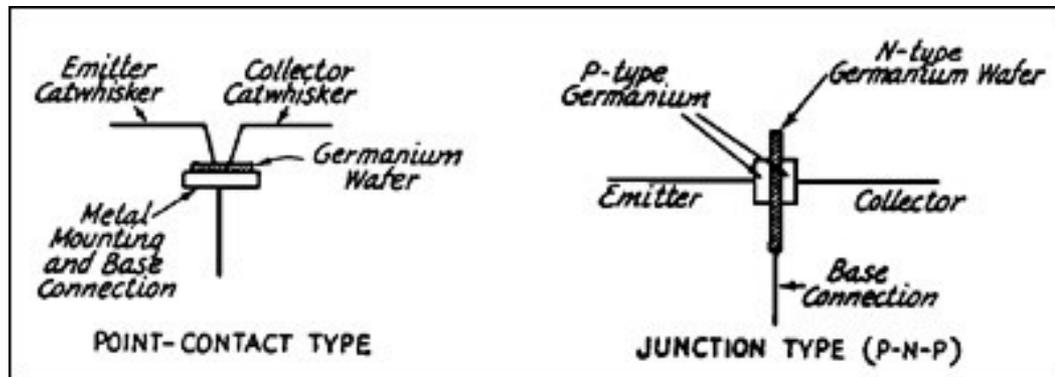


Durch starke Stromstöße wird der Einkristall unter der Spitze aufgeschmolzen und rekristallisiert dann wieder.^[11] Es bleiben aber Fehlstellen im Kristallgitter übrig, die wie eine p-Dotierung wirken und eine [Sperrschicht](#) zum Einkristall ausbilden.

- Anfang 1948 J. Shive – zwei Phosphorbronze Kontakte auf verschiedenen Seiten vom 0.1mm dickem Germanium (Junction Type)
- Transistoreffekt – es ist offensichtlich ein Substrateffekt - der lange Weg auf der Oberfläche schließt Oberflächeneffekte aus
- *After Shive's presentation, Shockley went to the blackboard and described his recently developed theory of the junction transistor. The Shockley theory nicely explained Shive's observations.*

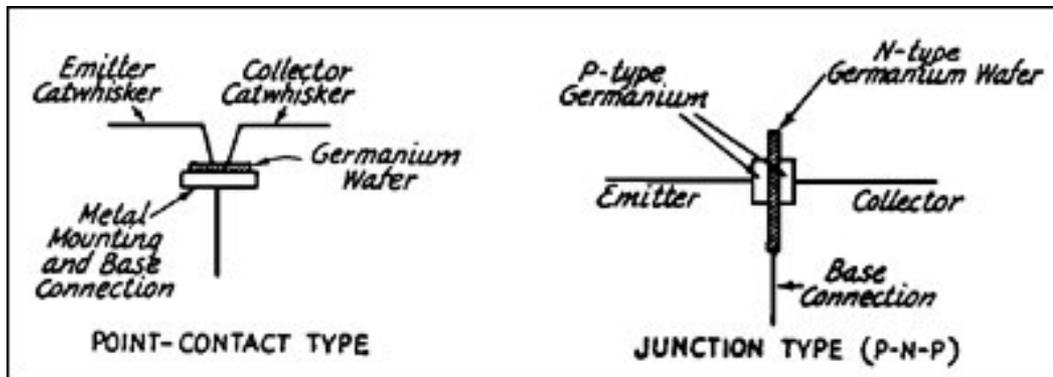
https://de.wikipedia.org/wiki/Gezogener_Transistor

Die Kontaktierung der schmalen Transistorbasis ist weniger einfach, da sie nicht sichtbar ist. Ihre Lage lässt sich jedoch über eine elektrische Messung gut bestimmen und mittels eines Mikromanipulators per [Drahtbonden](#) kontaktieren.

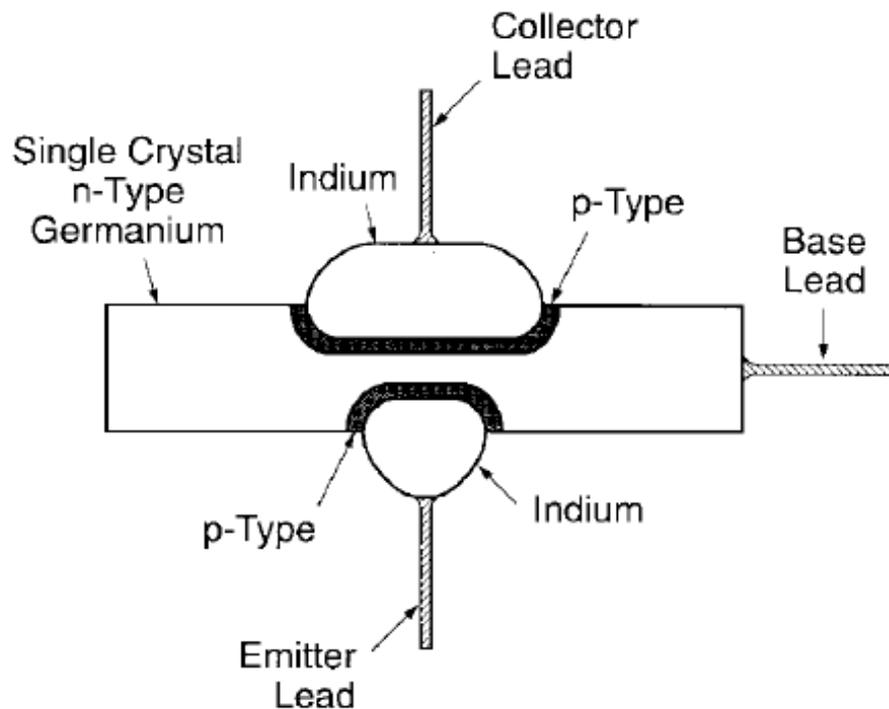


- Die Gruppe hat weiter die Germanium-Verarbeitung entwickelt (Czochralski Methode) (Gordon Teal), Parameter wie Mobilität, Lebenszeit, Diffusion wurden gemessen
- Techniken für Dotierung wurden verbessert, NPN Stäbe hergestellt
- Bell Labor hat die Ergebnisse veröffentlicht, Kurse organisiert, Buch von Shockley
- Die Entdeckung wurde innerhalb von 5 Jahren verstanden, dokumentiert. Wissenschaftliche Phase war abgeschlossen. Ab jetzt sollten die Ingenieure Innovationen vorantreiben.

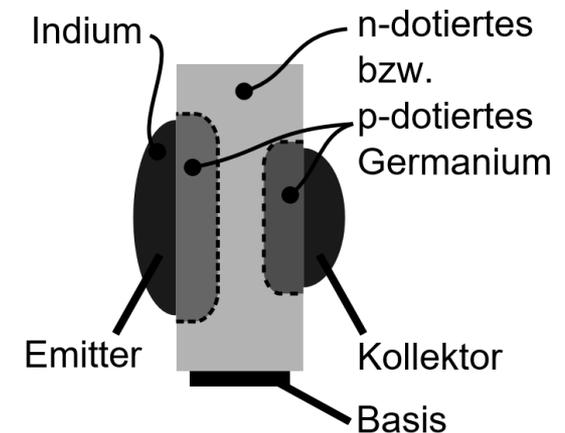
- Anfangs 1951 existieren zwei Strukturen die für die **wenig** Serienproduktion geeignet waren
- **Spitzen transistor** (point contact transistor)
- Wurde zwar in Geräten benutzt aber die Produktion ist schwierig zu kontrollieren.
- **Bipolar transistor** (**junction**-transistor) – gute Kontrolle, zwei Kristalle mit jeweils einem Basis-Teil verbunden
- Basisteil (P-Typ) wird auf den Kristallen gewachsen
- Der Prozess kann nicht automatisiert werden



- 1952 J.E Saby hat at GE den ersten Alloy Junction Transistor hergestellt
- n-Typ Germanium, zwei Indium Punkte (P-Typ) auf verschiedenen Seiten
- Erster Transistor der einfach hergestellt werden konnte
- Zuerst werden Kristalle hergestellt, Scheiben geschnitten, Indium Kontakte gemacht (Schablonen) und die einzelnen Transistoren ausgesägt.

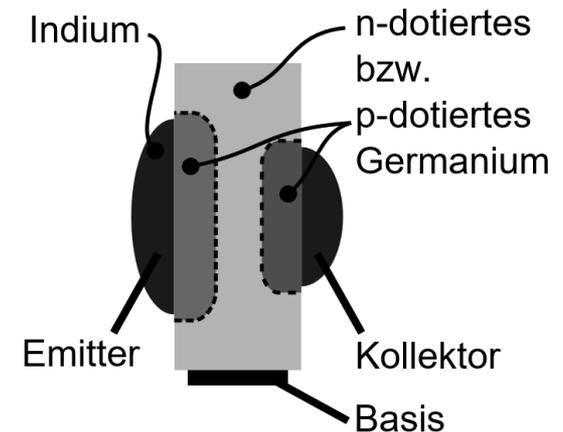


<https://de.wikipedia.org/wiki/Legierungstransistor>

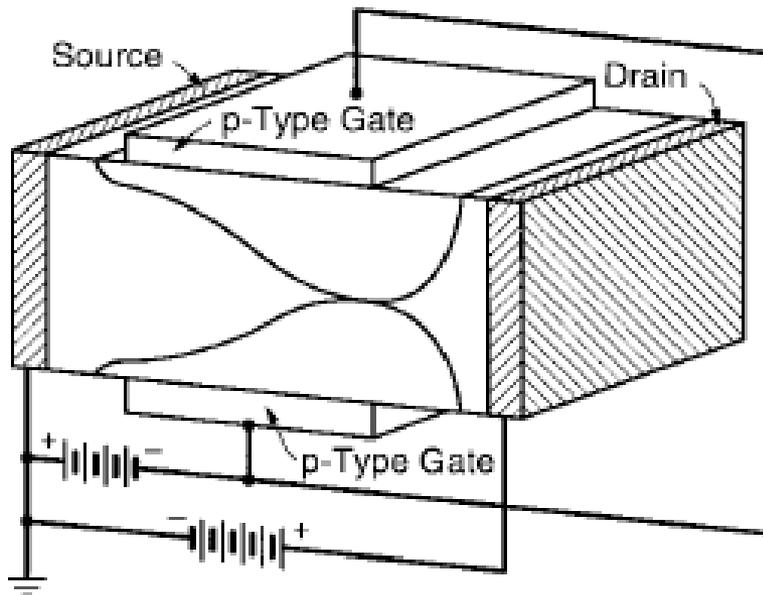


- Im ersten Schritt **wird je eine Pille (kleine Kugel) aus dreiwertigem Metall** auf eine Seite eines n-dotiertes Halbleiterplättchens (das Substrat, in der Regel Germanium) **aufgebracht**. Im zweiten Schritt wird das Substrat mit den aufgetragenen Emitter- und Kollektorpillen **einer Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Metalls**, aber unterhalb der des Halbleiters **ausgesetzt**. Dabei bildet sich an der Grenzfläche zwischen Substrat und Metall eine Legierung. Die Größe dieser Legierungsschicht nimmt dabei mit der Prozesszeit zu und die der dazwischen liegenden Transistor-Basis mit der Zeit ab. Der Temperaturprozess wird beendet, wenn Basis dünn genug ist, das heißt, der Transistor die gewünschten elektrischen Kenndaten aufweist. Im letzten Fertigungsschritt wird der Basis-Kontakt hergestellt.[3]

<https://de.wikipedia.org/wiki/Legierungstransistor>



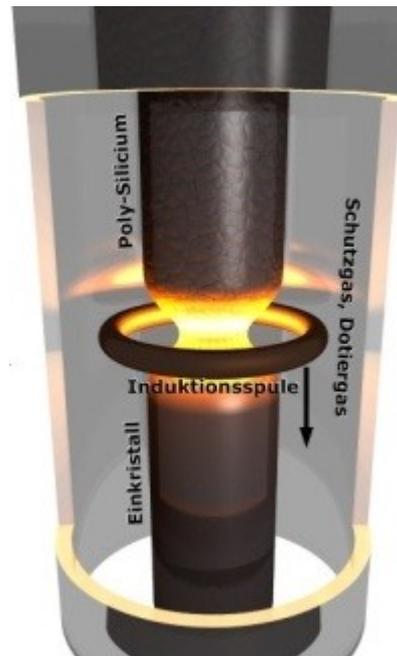
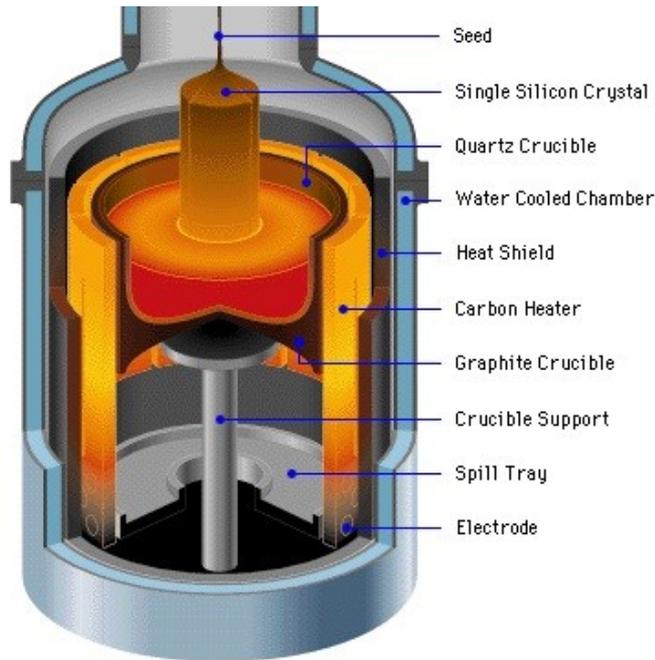
- Auch: erster FET (JFET) wurde mithilfe von alloy junction Struktur gemacht
- Shockley, G. C. Dacey, I. M. Ross (Bell Labors)
- Damals keine Vorteile gegenüber BJT, FET wird wieder (wie 1925) „vergessen“



I.M. Ross, front, and G.C. Dacey jointly responsible for this development measuring the characteristics of a field effect transistor

- Es war vom Anfang an klar, dass Silizium für Transistoren besser wäre als Ge
- Grund: höhere Bandlücke 1.1eV (Si) statt 0.67eV (Ge)
- Germanium: höhere Leckströme bei Sperrpolung
- Silizium wäre deutlich besser für Schalter, würde seine Eigenschaften auch auf höheren Temperaturen und Leistungen behalten
- Einige Nachteile von Silizium – niedrigere Mobilität $\sim 3x$ – kann durch kleinere Dimensionen kompensiert werden
- Ein größerer Nachteil von Silizium gegenüber Germanium ist es, dass die Chemische Prozesse auf deutlich höheren Temperaturen stattfinden
- Schmelztemperatur 1415C (Si), gegenüber 937C (Ge)
- Außerdem: Silizium ist chemisch deutlich reaktiver als Germanium
- Es ist schwer Materiale für Ofen zu finden, in den Silizium Kristalle hergestellt werden.
- Wegen dieser Schwierigkeiten war Germanium anfangs bevorzugt

- Anfang 50's gab es eine Reihe von Innovationen bei der Herstellung von reinen Silizium Kristallen.
- Gordon Teal hat es gelungen die reinen Si Kristalle aus der Silizium Schmelze zu bekommen, er benutzte ein Impfkristall, der in die Schmelze eingetaucht wird und gezogen wird. Der Ofen war aus Quarz.
- Theurer und Pfann haben die (float zone) Zonenschmelzverfahren Verfahren entwickelt, damit lassen sich die Verunreinigungen aus Silizium (bzw. Germanium) entfernen.



- 1954 Gordon Teal bei TI erste marktreife Siliziumtransistoren – Junction Methode.
- <http://www.ti.com/corp/docs/company/history/timeline/semicon/1950/docs/54commercial.htm>
- Semiconductor R&D chief Gordon Teal was scheduled to speak that day at the Institute of Radio Engineers National Convention in Dayton, Ohio.
- (T. had already built about 150 very good transistors)
- “During the morning sessions, the speakers had unwittingly set the stage for us. One after the other, ... remarked about how hopeless it was to expect the development of a silicon transistor in less than several years. They advised the industry to be satisfied with germanium transistors for the present.
- As Teal began his presentation, he read through 24 of the 31 pages without mentioning his team's achievement at TI. The crowd was less than attentive...
- Then Teal dropped his bombshell.
- “Contrary to what my colleagues have told you...,” he began. His message stunned everyone who heard it: Silicon transistors were a fact. TI was producing them.... I happen to have a few in my pocket....

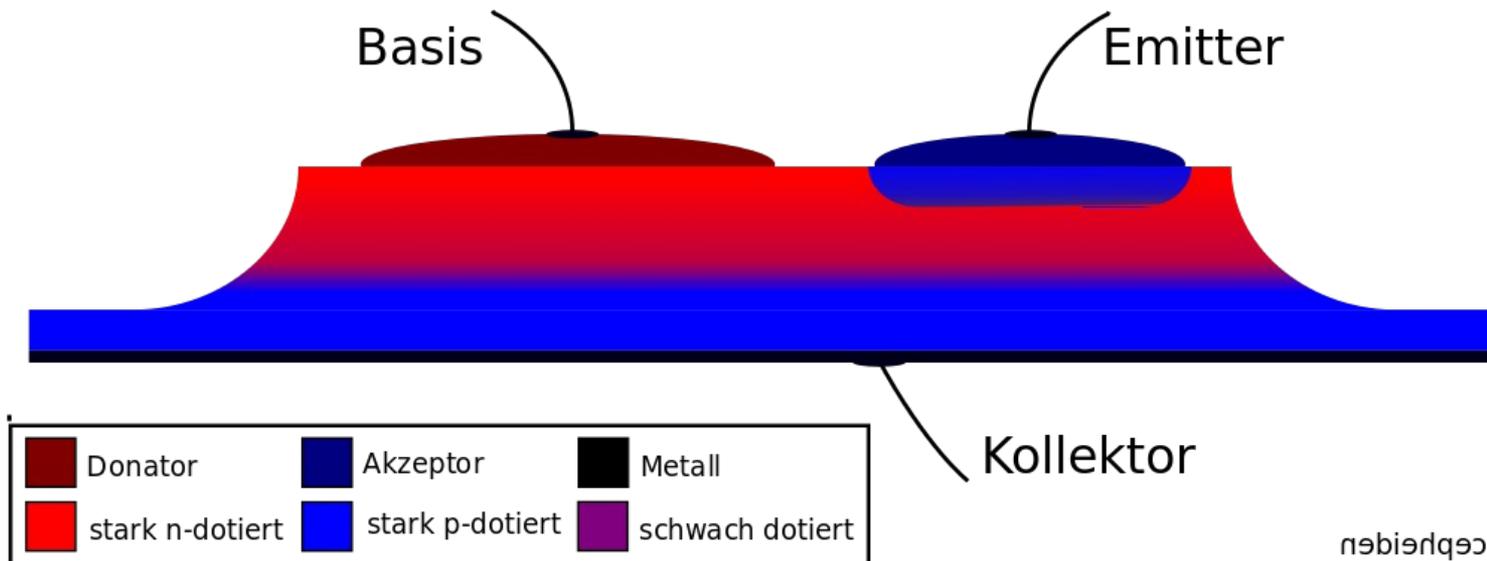


- Anfangs dachte man Silizium wird nur in digitalen Schaltungen (als Schalter) dominieren, Germanium wird in linearer Elektronik „die erste Wahl“ bleiben. Aber:
- Mit der Entwicklung von Siliziumtechnologie wurde Germanium immer wieder verdrängt
- Heute – nur Nischenprodukte verwenden Germanium

- Ein großes Problem bei den ersten Transistoren war niedrige Geschwindigkeit – die war die Folge von langer Transitzeit durch Basis Kontakt. Diese war hauptsächlich wegen der Größe der Basis in den ersten Transistoren lang. 10µm Basisgröße entspricht 10MHz.
- 1952 wurde erkannt dass man Donor-Ionen durch **Diffusion** von der Oberfläche des Halbleiters implantieren kann, und auf diese Weise dünne Bereiche erzeugen kann. Erste Verfahren haben Dämpfe mit Donor-Ionen verwendet. Man konnte auf diese Weise die Dicke des dotierten Bereichs genau kontrollieren.



- 1954 wurde der erste Germanium Diffusionstransistor hergestellt (Charles A. Lee) – „Mesa“ Transistor
- Lee nahm p-dotiertes Kristall, erzeugte n-Basis durch Diffusion mit Arsen (1.5µm) und dann Emitter (n-Typ) indem er Aluminium in n-Bereich diffundierte.
- Zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften (u. a. Reduzierung von Sperrschicht-Kapazitäten, Verbesserung der Hochfrequenzleistung) werden nun die oberen Schichten des Transistors bis zur Kontaktstelle der Dotierungsmaterialien mit dem Halbleiterkristall nasschemisch geätzt.



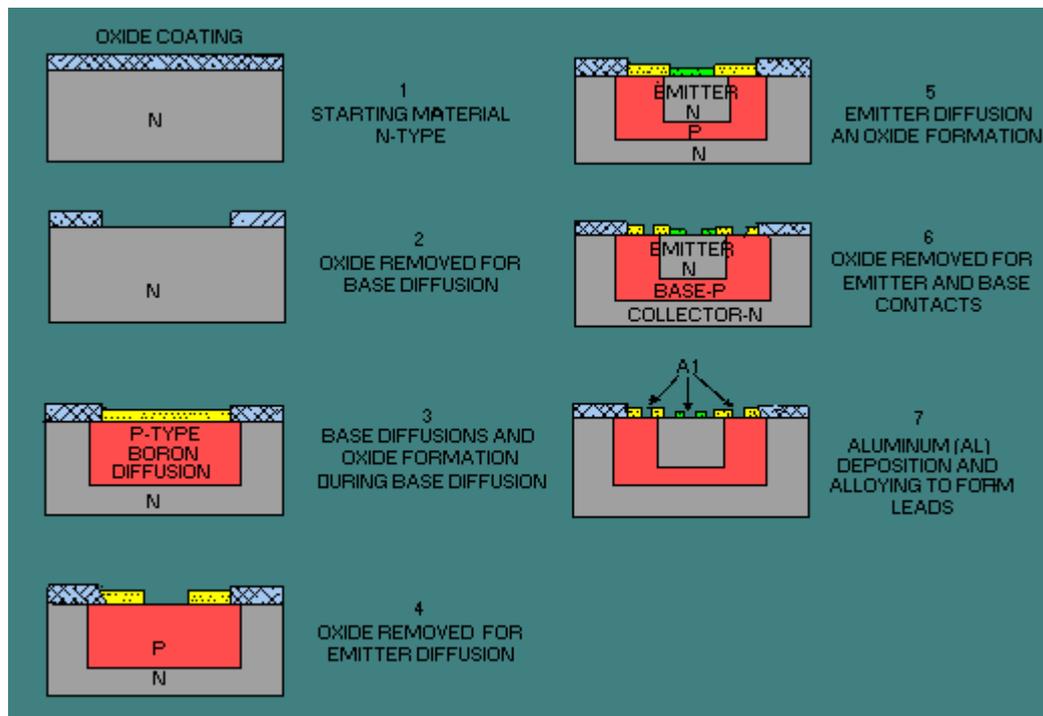
gebühren

- 1954 wurde der erste Germanium Diffusionstransistor hergestellt (Charles A. Lee) – „Mesa“ Transistor
- Lee nahm p-dotiertes Kristall, erzeugte n-Basis durch Diffusion mit Arsen (1.5 μ m) und dann Emitter (n-Typ) indem er Aluminium in n-Bereich diffundierte.
- Zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften (u. a. Reduzierung von Sperrschicht-Kapazitäten, Verbesserung der Hochfrequenzleistung) werden nun die oberen Schichten des Transistors bis zur Kontaktstelle der Dotierungsmaterialien mit dem Halbleiterkristall nasschemisch geätzt.



- Es konnte auf diese Weise die Basisdicken von $1\mu\text{m}$ erreicht werden und die Frequenzen von 500MHz .
- Ein Jahr später wurde auch der erste Silizium Mesa Transistor hergestellt - 120MHz .

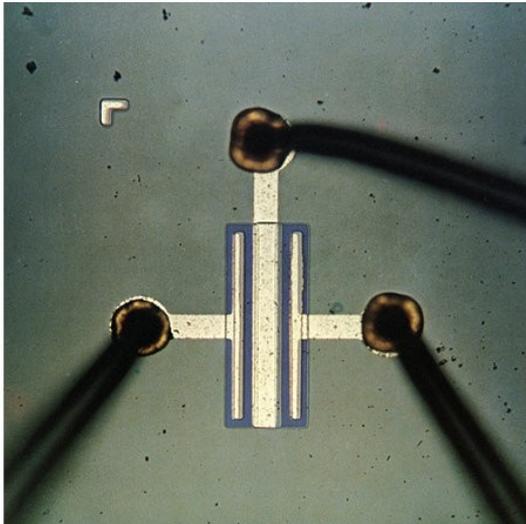
- Weitere Innovation 1955
- SiO₂ Lage auf der Oberfläche kann als die Maske für die Diffusion verwendet werden -> „Geburt“ von Lithographie
- Fotolack wird für die Strukturierung von Oxid verwendet, auf diese Weise werden Fenster im Oxid gemacht, die dann verwendet werden um Diffusion zu kontrollieren.



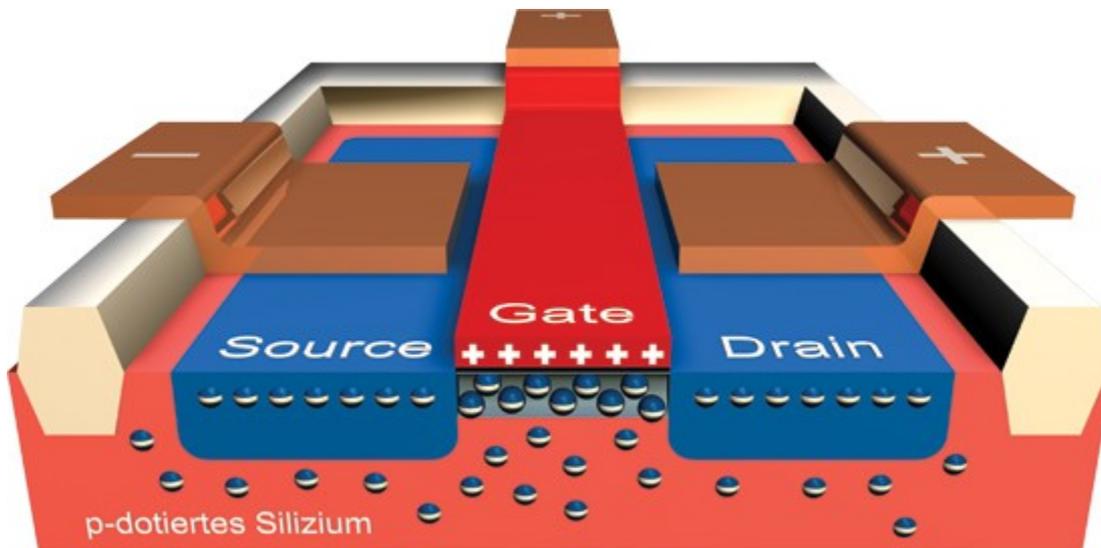
- Bald wurde es möglich die Diffusionsbereiche horizontal genauso gut zu kontrollieren als vertikal.
- Dies ermöglichte planare Transistoren
- Diese Innovation beendete die Zeit des Germaniums. Es konnte kein Material gefunden werden das die Diffusion ins Germanium maskiert. Germanium Oxide ist sehr brüchig und in Wasser löslich. So hatte Silizium einen entscheidenden Vorteil.

- SiO_2 hat auch ein weiteres Problem gelöst – es diente als Schutzlage und verhinderte dass z.B. die Feuchtigkeit aus der Luft die Transistoren beeinflusst.
- Um das zu erreichen, sollte SiO_2 nach der Diffusionsschritten auf der Oberfläche gelassen werden.
- Frühen Transistoren waren sehr feuchteempfindlich. Es dauerte 20 Jahre dies in Griff zu bekommen.

- M. M. Atalla und Dawon Kahng (Bell L.) haben die Schutzwirkung von SiO_2 untersucht.
- 1959 ist es ihnen gelungen durch die Verwendung von SiO_2 die Dichte der Verunreinigungen an der Silizium Oberfläche so zu verringern, dass sie ein Feldeffekt erreicht konnten.
- Der Feldeffekt MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Transistor wurde zum ersten Mal erzeugt.

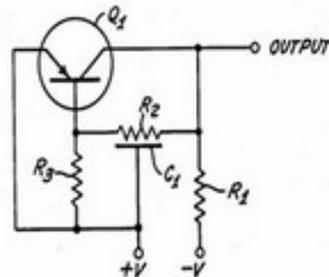
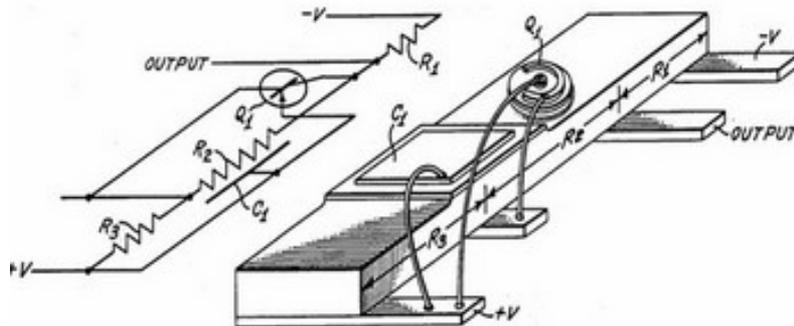


- Die ersten MOS Transistoren hatten schlechtere Eigenschaften als die bipolaren. Hauptproblem war zu hohe Schwelle-Spannung. Dies konnte durch Silizium Gates verbessert werden.

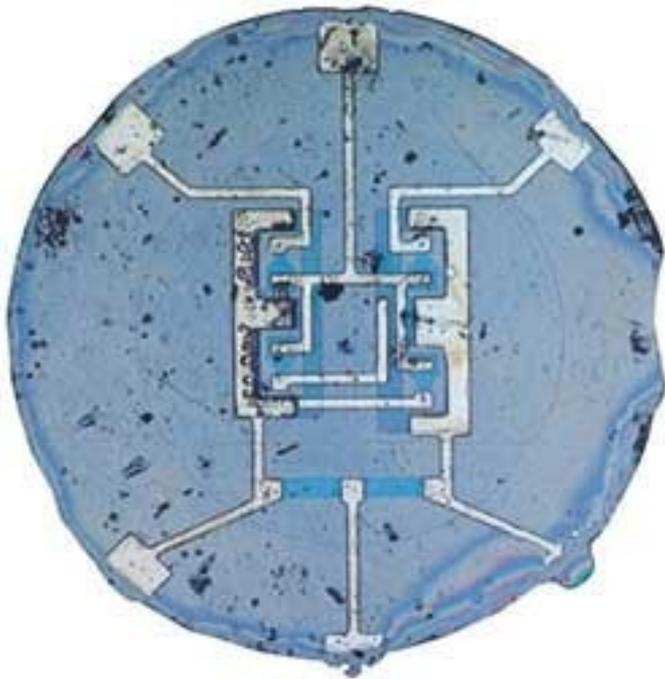


- Ab 1960 werden planare Transistoren serienmäßig hergestellt – alle Kontakte sind auf der Oberseite.
- Ohmsche Kontakte durch die Öffnungen im Oxid. (Moore and Noyce)
- Alle grundlegende Technologien für die Herstellung von integrierten Schaltungen waren da.
- Die erste IC wurde von Kilby (TI) in 1958 hergestellt. Seine erste Schaltungen hatten etwa zehn Komponenten (Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerstände) und wurden mit Drahtbonds verbunden.

Kilby's germanium IC



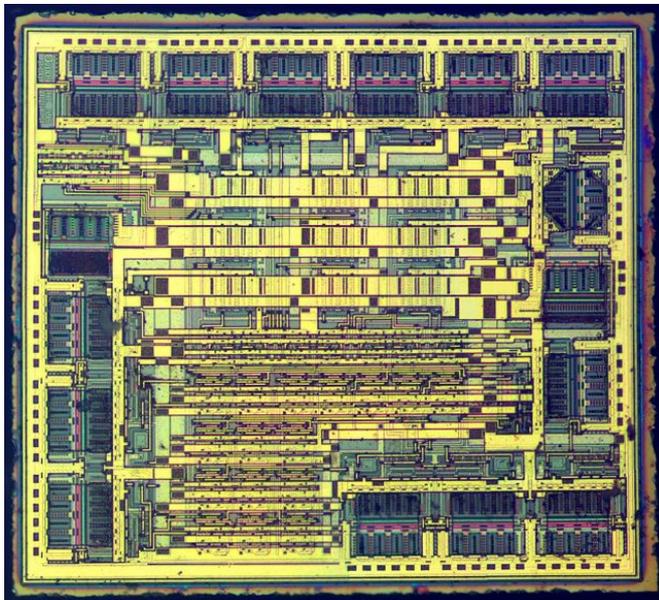
- Drahtbonden war nur die vorläufige Lösung, und Kilby hat in seinem Patent vorgeschlagen die Metallleitungen auf die Oxid-Isolierung per Abscheidung zu erzeugen. Ähnliche Idee hatte auch Noyce (Fairchild), unabhängig von Kilby.
- Noyce hat späte Intel gegründet



Flip-flop – TR Logic

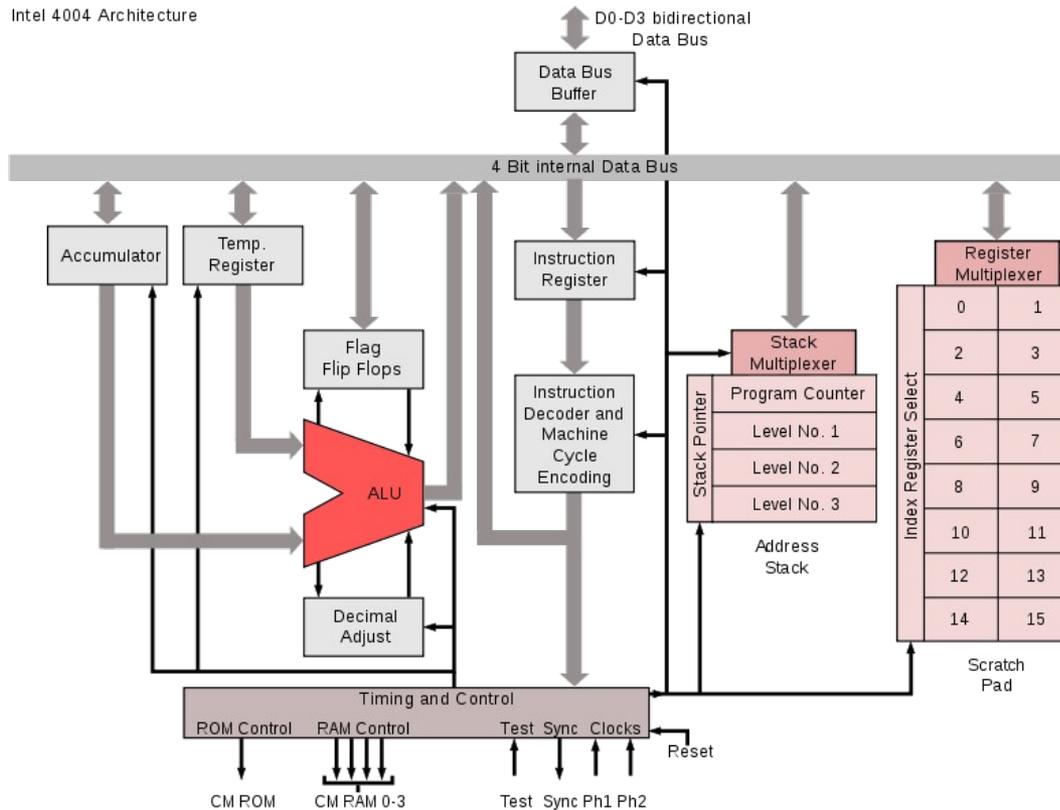
- Es ist interessant dass die Kilbys Idee am Anfang wenig Zustimmung in Industrie hatte. Man hat argumentiert dass die ICs schlechte Ausbeute hätten wegen vielen Komponenten und gab es Sicherheitsbedenken.
- Wenn ein Transistor 90% Ausbeute hätte, hätte die ganze IC nur 0.9 hoch Zahl der Transistoren.
- Man hat nach alternativen für ICs gesucht – z.B. nach funktionalen Bauteilen die viele Transistoren ersetzen. Ein Beispiel ist der Quarzoszillator, ein anderes CCD.
- Es hat sich aber gezeigt dass die ICs deutlich robuster als gedacht sind. Ausbeute war nicht eine Zufallsvariable. Es gab immer Bereiche auf dem Siliziumscheibe mit 100% Ausbeute.

- Es musste aber die Entscheidung über die beste Transistorart für IC fallen.
- Es war klar dass ein planarer Transistor für IC optimal ist. MOS Transistor ist besonders praktisch da seine Struktur einfacher ist. Er ist kleiner als der bipolare Transistor. Man kann auf einer IC deutlich mehr MOSFETs herstellen.
- Es ist interessant das historisch zu betrachten. Das Konzept FET besteht seit 1925. FET wurde zweimal hergestellt und wieder vergessen. Erst mit Entwicklung von ICs, 40 Jahre nach der Entdeckung des Konzepts, bekommt MOSFET die Hauptrolle in Elektronik.

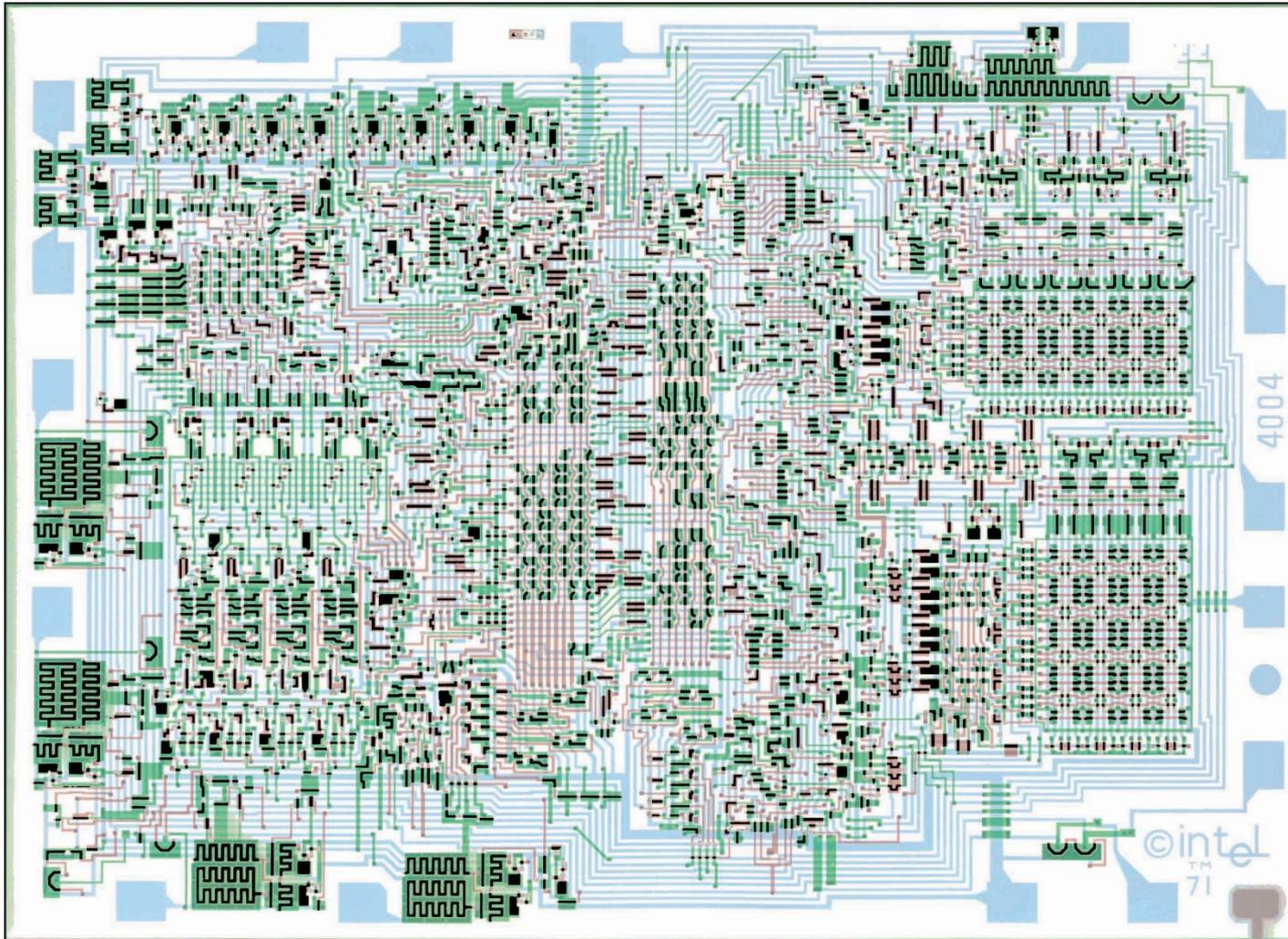


Die of a 74HC595 8-bit [shift register](#)

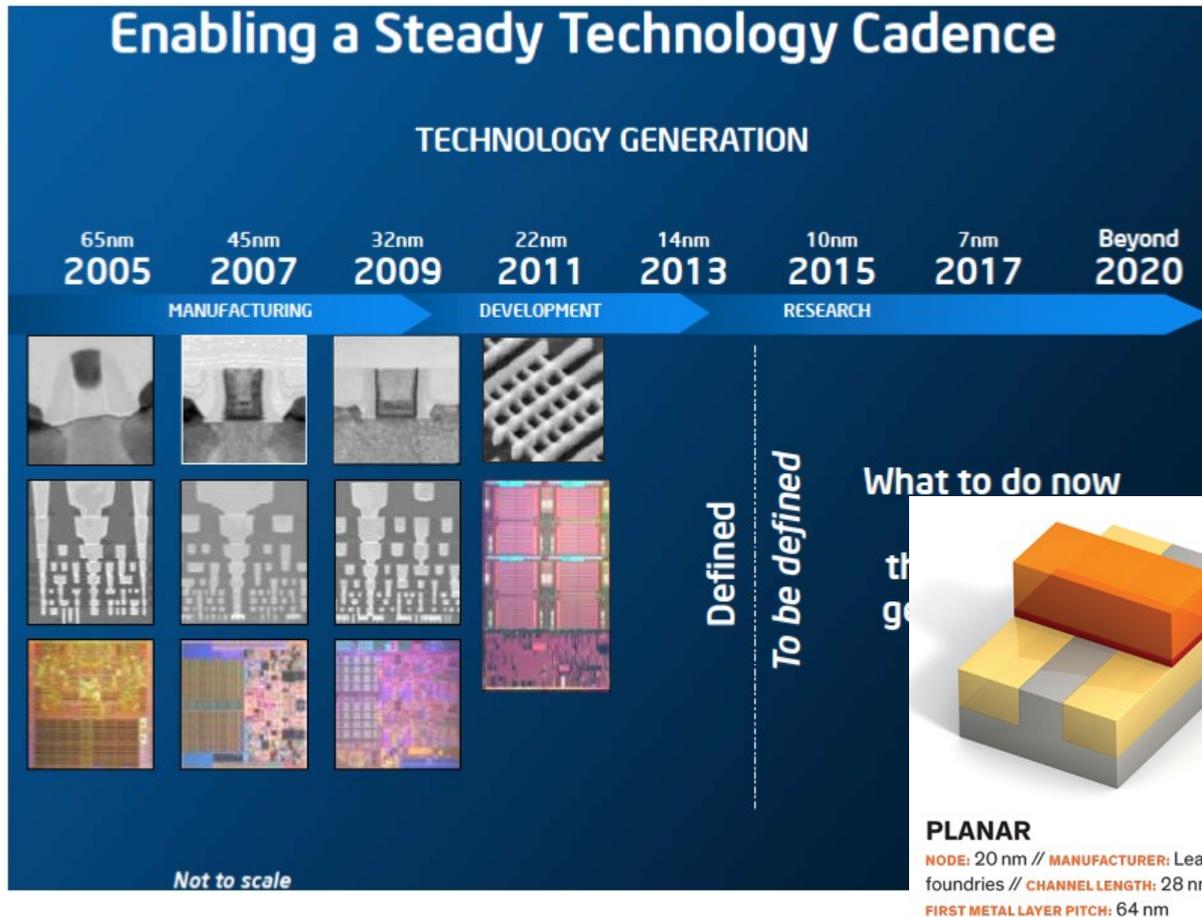
- 1971: Erster Mikroprozessor Intel 4004
- Paper: William Aspray „The Intel 4004 Microprocessor: What Constituted Invention? “



- 1971: Erster Mikroprozessor Intel 4004



- Seit dem Anfang der ICs verdoppelt sich die maximale Zahl der Transistoren etwa 18 Monate. Diesen Trend hat Moore schon in 1965 erkannt, und er setzt sich bis heute vor.



- Seit dem Anfang der ICs verdoppelt sich die maximale Zahl der Transistoren etwa 18 Monate. Diesen Trend hat Moore schon in 1965 erkannt, und er setzt sich bis heute vor.

5th Gen Intel® Core™ Processor Die Map

Intel® HD Graphics 6000 or Intel® Iris™ Graphics 6100

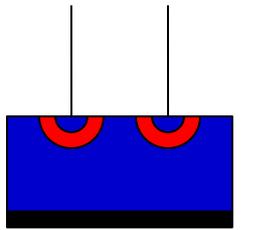
The die map shows a central area labeled 'Processor Graphics' in yellow and orange. To the right, two vertical columns represent 'Core' units. Below the cores is a 'Shared L3 Cache**'. At the bottom, a horizontal bar represents 'Memory Controller I/O'. The Intel Iris Graphics logo is in the top right corner.

Dual Core Die Shown Above | **Transistor Count: 1.9 Billion** | **Die Size: 133 mm²**

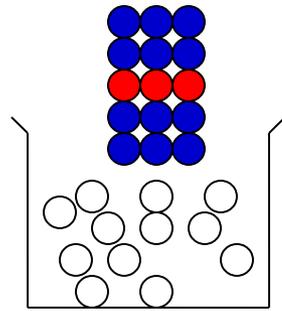
4th Gen Core Processor (U series): 1.3B
4th Gen Core Processor (U series): 181mm²

** Cache is shared across both cores and processor graphics

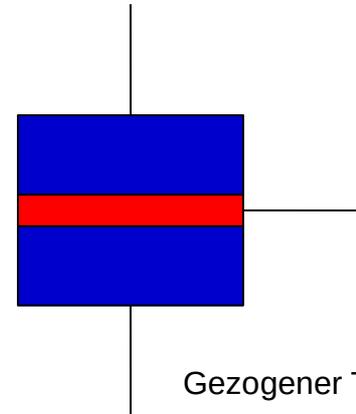
Intel Confidential – UNCLASSIFIED | 5, 2015 7:00AM PT
All products, dates, and figures specified are preliminary based on current expectations, and are subject to change without notice.



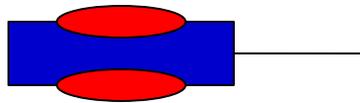
Spitzentransistor



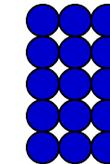
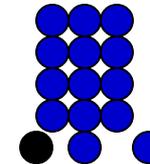
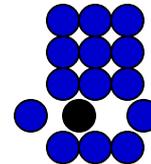
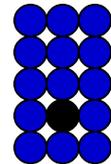
Czochralski-Verfahren



Gezogener Transistor

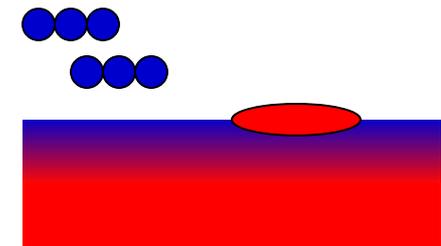
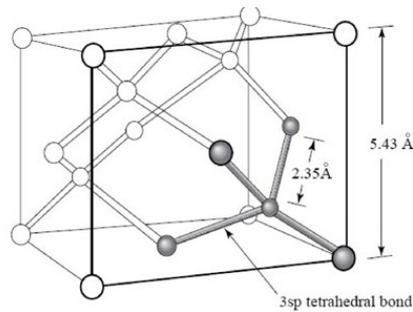
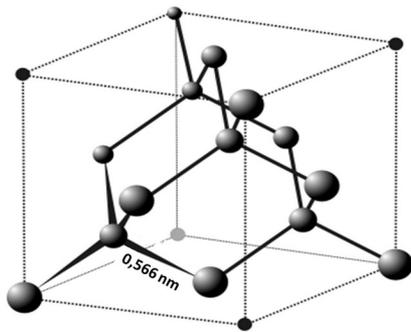
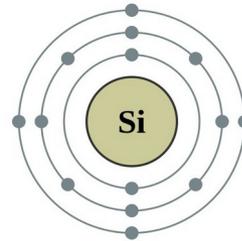
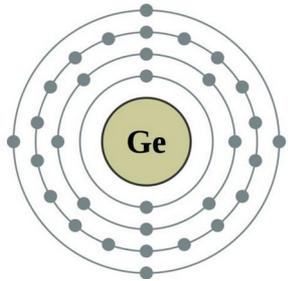


Legierungstransistor

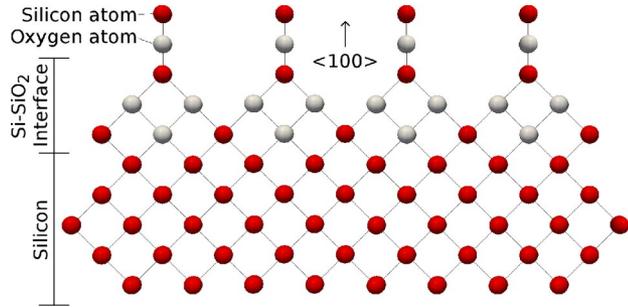


Float Zone

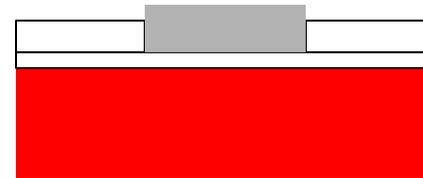
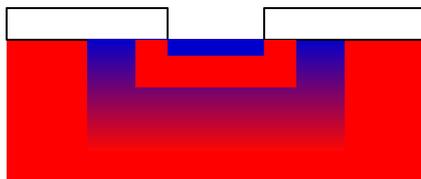
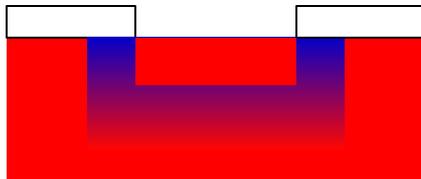




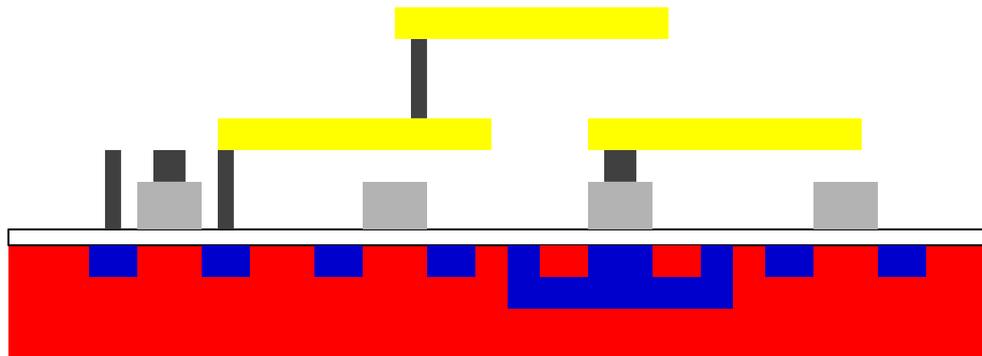
Diffusionstransistor



Oxide Masking und Photo-Lithographie



MOS Transistor



IC

- 1926: Field Effect Semiconductor Device Concepts Patented
- Julius Lilienfeld files a patent describing a three-electrode amplifying device based on the semiconducting properties of copper sulfide. Attempts to build such a device continue through the 1930s.
- 1931: "The Theory Of Electronic Semi-Conductors" is Published
- Alan Wilson uses quantum mechanics to explain basic semiconductor properties. Seven years later Boris Davydov (USSR), Nevill Mott (UK), and Walter Schottky (Germany) independently explain rectification.
- 1940: Discovery of the p-n Junction
- Russell Ohl discovers the p-n junction and photovoltaic effects in silicon that lead to the development of junction transistors and solar cells.
- 1947: Invention of the Point-Contact Transistor
- John Bardeen & Walter Brattain achieve transistor action in a germanium point-contact device in December 1947.
- 1948: Conception of the Junction Transistor
- William Shockley conceives an improved transistor structure based on a theoretical understanding of the p-n junction effect.
- 1948: The European Transistor Invention
- Herbert Mataré & Heinrich Welker independently create a germanium point-contact transistor in France.
- 1951: First Grown-Junction Transistors Fabricated
- Gordon Teal grows large single crystals of germanium and works with Morgan Sparks to fabricate an n-p-n junction transistor.
- <http://www.computerhistory.org/>

- 1951: Development of Zone Refining
- William Pfann and Henry Theurer develop zone refining techniques for production of ultra-pure semiconductor materials.

- 1952: Bell Labs Licenses Transistor Technology
- Bell Labs technology symposia and licensing of transistor patents encourages semiconductor development.

- 1952: Transistorized Consumer Products Appear
- Semiconductors appear in battery-powered hearing aids and pocket radios where consumers are willing to pay a premium for portability and low power consumption.

- Intermetall Corp. of Dusseldorf, West Germany, co-founded by Herbert Mataré (1948 Milestone), gave a public demonstration of a radio powered by four point-contact transistors at the Dusseldorf Radio Fair in 1953.

- 1953: Transistorized Computers Emerge
- A transistorized computer prototype demonstrates the small size and low-power advantages of semiconductors compared to vacuum tubes.

- 1954: Silicon Transistors Offer Superior Operating Characteristics

- 1954: Diffusion Process Developed for Transistors
- Following the production of solar cells using high-temperature diffusion methods, Charles Lee and Morris Tanenbaum apply the technique to fabricate high-speed transistors.

- 1955: Photolithography Techniques Are Used to Make Silicon Devices
- Jules Andrus and Walter Bond adapt photoengraving techniques from printing technology to enable precise etching of diffusion "windows" in silicon wafers.
- 1958: Silicon Mesa Transistors Enter Commercial Production
- 1958: All Semiconductor "Solid Circuit" is Demonstrated
- Jack Kilby produces a microcircuit with both active and passive components fabricated from semiconductor material.
- 1959: Invention of the "Planar" Manufacturing Process
- Jean Hoerni develops the planar process to solve reliability problems of the mesa transistor, thereby revolutionizing semiconductor manufacturing.
- 1959: Practical Monolithic Integrated Circuit Concept Patented
- Robert Noyce builds on Jean Hoerni's planar process to patent a monolithic integrated circuit structure that can be manufactured in high volume.
- 1960: First Planar Integrated Circuit is Fabricated
- Jay Last leads development of the first commercial IC based on Hoerni's planar process and Noyce's monolithic approach.
- 1960: Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor Demonstrated
- John Atalla and Dawon Kahng fabricate working transistors and demonstrate the first successful MOS field-effect amplifier.

- 1963: Complementary MOS Circuit Configuration is Invented
- Frank Wanlass invents the lowest power logic configuration but performance limitations impede early acceptance of today's dominant manufacturing technology.

- 1964: First Commercial MOS IC Introduced
- General Microelectronics uses a Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) process to pack more transistors on a chip than bipolar ICs and builds the first calculator chip set using the technology.

- 1965: "Moore's Law" Predicts the Future of Integrated Circuits
- Fairchild's Director of R & D predicts the rate of increase of transistor density on an integrated circuit and establishes a yardstick for technology progress.

- 1971: Microprocessor Integrates CPU Function onto a Single Chip
- Silicon-gate process technology and design advances squeeze computer central processing units (CPU) onto single chips.