

Nichts geht mehr ohne ...

Die Erfindung des Transistors

Klaus Betzler

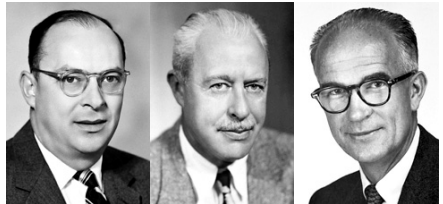
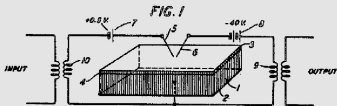
Oct. 3, 1950


J. BARDEEN ET AL.
THREE-ELECTRODE CIRCUIT ELEMENT UTILIZING
SEMICONDUCTIVE MATERIALS

2,524,035

Filed June 17, 1948

3 Sheets-Sheet 1





“The TRANSISTOR was probably the most important invention of the 20th Century, and the story behind the invention is one of clashing egos and top secret research.”
– Ira Flatow, Public Broadcasting Service (PBS)

Inhaltsverzeichnis

1 Die Vorgeschichte(n)

- Gleichrichter, Röhren & Relais
- Die Ideen der Herren Lilienfeld und Heil

Inhaltsverzeichnis

1 Die Vorgeschichte(n)

- Gleichrichter, Röhren & Relais
- Die Ideen der Herren Lilienfeld und Heil

2 Halbleiter

- Energiebänder
- Der Feldeffekt

Inhaltsverzeichnis

1 Die Vorgeschichte(n)

- Gleichrichter, Röhren & Relais
- Die Ideen der Herren Lilienfeld und Heil

2 Halbleiter

- Energiebänder
- Der Feldeffekt

3 Die Erfindung

- AT&T Bell Labs
- Bardeen, Brattain und Shockley

Inhaltsverzeichnis

1 Die Vorgeschichte(n)

- Gleichrichter, Röhren & Relais
- Die Ideen der Herren Lilienfeld und Heil

2 Halbleiter

- Energiebänder
- Der Feldeffekt

3 Die Erfindung

- AT&T Bell Labs
- Bardeen, Brattain und Shockley

4 Und dann ...

- Die ersten kommerziellen Transistoren
- Die handelnden Personen
- Etc.

Ferdinand Braun

- 1874** Entdeckung der Gleichrichtung bei bestimmten Kristallen
⇒ **Kristalldetektor**
- 1897** Kathodenstrahlröhre (Braunsche Röhre)
- 1909** Nobelpreis (zusammen mit Guglielmo Marconi) für seinen Beitrag zur Entwicklung der drahtlosen Telegrafie



de.wikipedia.org/wiki/Ferdinand_Braun

Joseph John Thomson

1897 Entdeckung des **Elektrons**

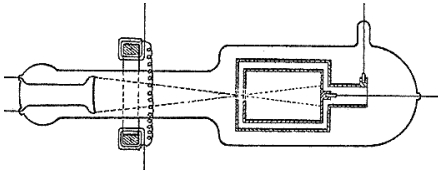
1906 Nobelpreis



de.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson

Robert von Lieben

1906 Kathodenstrahlrelais



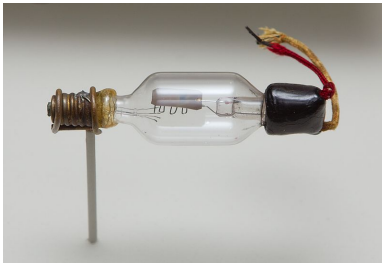
1910 Röhre mit Steuergitter
⇒ **Verstärkerröhre**



www.hts-homepage.de/Lieben/Biografie.html

Lee De Forest

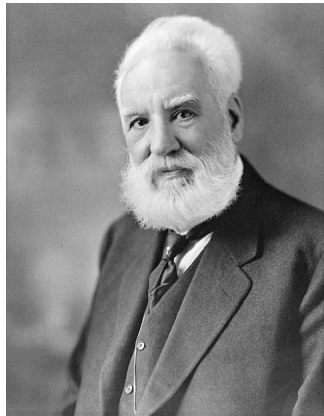
1906 Erfindung der Triode
⇒ **Verstärkerröhre**



de.wikipedia.org/wiki/Lee_De_Forest

Alexander Graham Bell

- 1877** Bell Telephone Company –
Vermarktung des Telefons
- 1885** American Telephone and
Telegraph Company (AT&T)
- 1912** Verstärker mit Röhren
- 1913** New York – Baltimore
- 1914** Transatlantik
- 1925** Bell Telephone Laboratories



de.wikipedia.org/wiki/Alexander_Graham_Bell

Julius Edgar Lilienfeld

1925 Feldeffekttransistor (Prinzip)

Jan. 28, 1930.

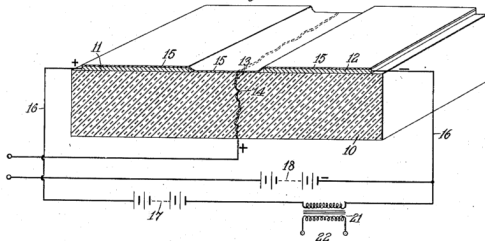
J. E. LILIENFELD

1,745,175

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Filed Oct. 8, 1926

Fig. 1.



en.wikipedia.org/wiki/Julius_Edgar_Lilienfeld

Oskar Heil

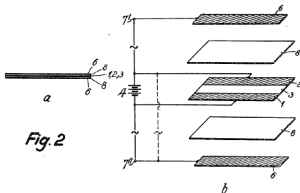
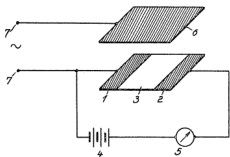
1934 Feldeffekttransistor (Prinzip)



PATENT SPECIFICATION ..

Convention Date (Germany) : March 2, 1934. **439,457**
 Application Date (In United Kingdom) : March 4, 1935. No. 6815/35.
 Complete Specification Accepted : Dec. 6, 1935.

Fig. 1



en.wikipedia.org/wiki/Oskar_Heil

Dann war da noch ...

- 1916** Richard Tolman: bewegliche Elektronen
- 1925** Wolfgang Pauli: Ausschließungsprinzip für Fermionen
- 1926** Enrico Fermi, Paul Dirac: Fermi-Dirac-Statistik
- 1930** Alan Wilson: Bändertheorie der Elektronen
- 1938** Rudolf Hilsch und Robert Wichard Pohl konstruieren den ersten Halbleiterverstärker (Feldeffekt in Alkalihalogeniden)
- 1938** Walter Schottky: Theorie der Randschichten in Halbleitern
- 1939** Russell Shoemaker Ohl entdeckt durch Zufall den p-n-Übergang in Silizium

und, und, und ...

Was sind eigentlich ...

Was sind eigentlich ...

Halbleiter ?

EXPERIMENTE

Experimente

Experimente

Wärmestrahlung

Experimente

Wärmestrahlung

Halbleiter sind durchsichtig ...

Experimente

Wärmestrahlung

Halbleiter sind durchsichtig ...

Licht

Experimente

Wärmestrahlung

Halbleiter sind durchsichtig ...

Licht

Erhöhung der Leitfähigkeit ...

Experimente

Wärmestrahlung

Halbleiter sind durchsichtig ...

Licht

Erhöhung der Leitfähigkeit ...

Magnetfeld

Experimente

Wärmestrahlung

Halbleiter sind durchsichtig ...

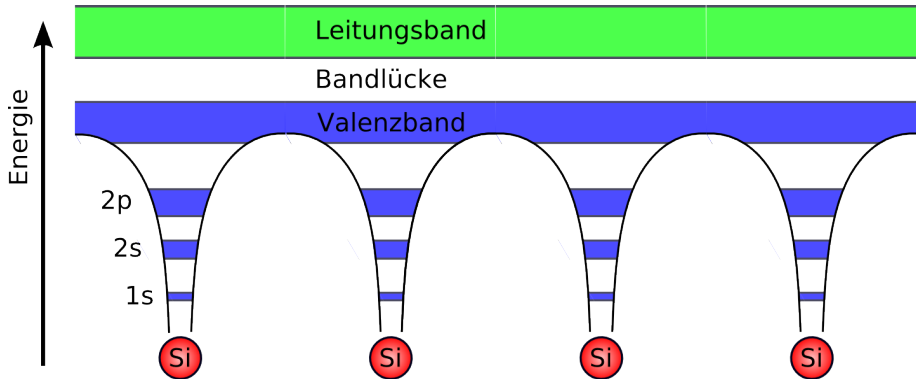
Licht

Erhöhung der Leitfähigkeit ...

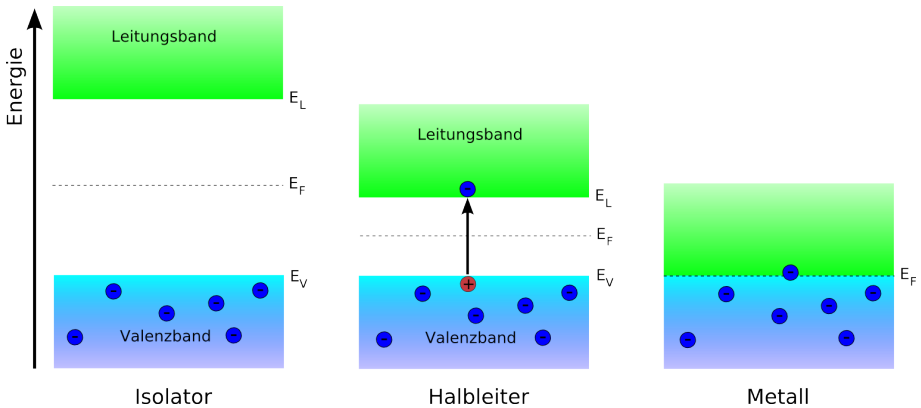
Magnetfeld

Negative und positive Ladungen ...

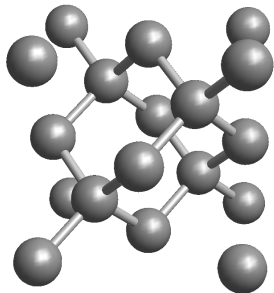
Energiebänder



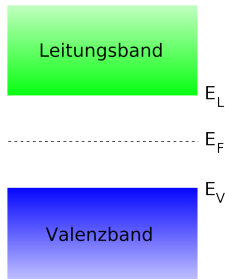
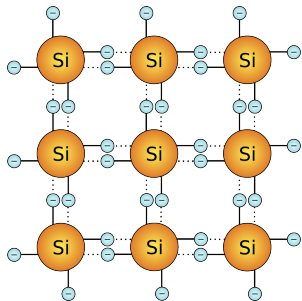
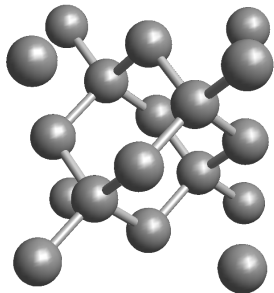
Bandlücken



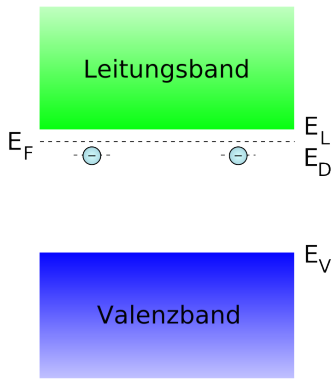
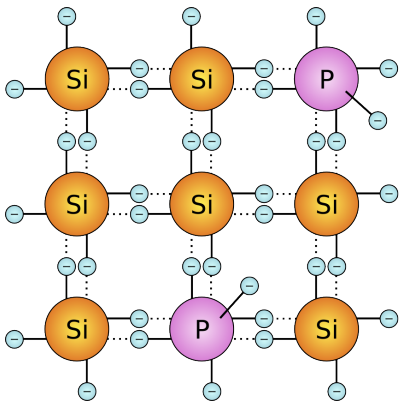
Kristallstruktur



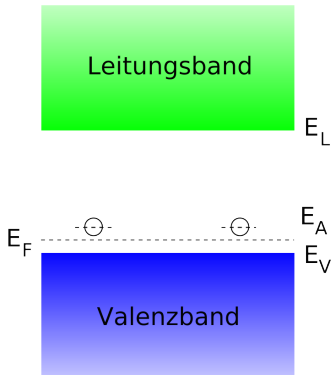
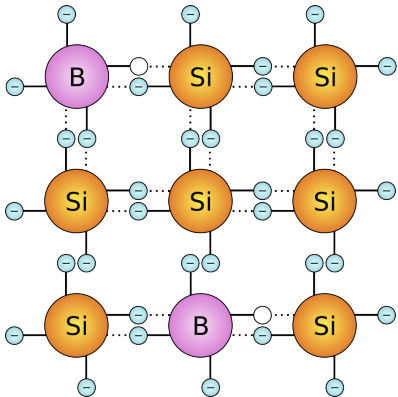
Kristallstruktur



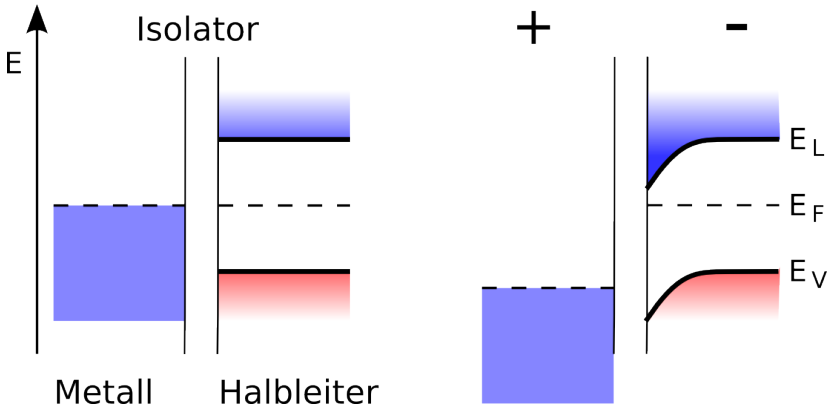
Dotierung – Donator – Elektronenleitung



Dotierung – Akzeptor – Löcherleitung



Der Feldeffekt in Halbleitern



1 Die Vorgeschichte(n)

- Gleichrichter, Röhren & Relais
- Die Ideen der Herren Lilienfeld und Heil

2 Halbleiter

- Energiebänder
- Der Feldeffekt

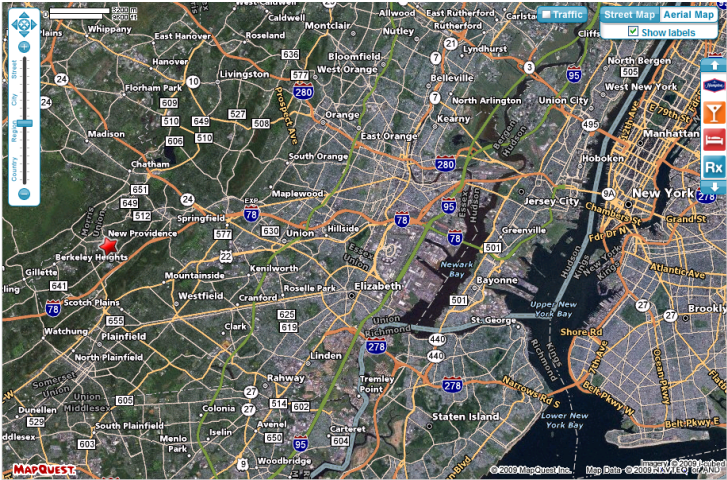
3 Die Erfindung

- AT&T Bell Labs
- Bardeen, Brattain und Shockley

4 Und dann ...

- Die ersten kommerziellen Transistoren
- Die handelnden Personen
- Etc.

Nicht weit von New York ...



Bell Laboratories, Forschungslabor der AT&T



Mervin Kelly

1930 Verstärkerröhren –
1000 \Rightarrow 80.000 h

1933 100.000 W

1936 Bell Labs Forschungsdirektor,
Förderung der
Festkörperphysik

1951-1959 Präsident der Bell Labs,
auswärtiges Mitglied der
schwedischen Akademie der
Wissenschaften



www.pbs.org/transistor/album1/addlbios/kelly.html

William Shockley

Chef der Forschungsgruppe

- 1936** Bell Labs, soll Ersatz für Relais finden
- 1945** Forschungsgruppe für Festkörperverstärker, Shockleys Idee: Feldeffekt
- 1945** Bardeen und Brattain neu in der Gruppe
- 1947** Bardeen und Brattain sollen klären, warum Shockleys Idee nicht funktioniert



de.wikipedia.org/wiki/William_B._Shockley

John Bardeen

Brillianter Theoretiker



de.wikipedia.org/wiki/John_Bardeen

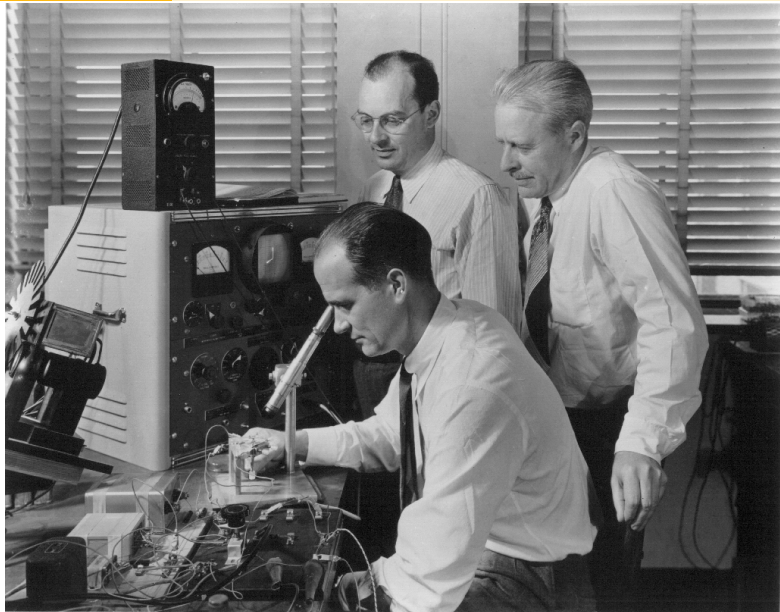
Walter H. Brattain

Exzellenter Experimentator



de.wikipedia.org/wiki/Walter_Brattain

1945 zu Bell Labs,
Arbeitsgruppe Shockley



Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren
- **Shockley kann's nicht verstehen**

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren
- Shockley kann's nicht verstehen
- **Bardeen hat eine Erklärung**

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren
- Shockley kann's nicht verstehen
- Bardeen hat eine Erklärung
- **Bardeen und Brattain haben eine neue Idee**

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

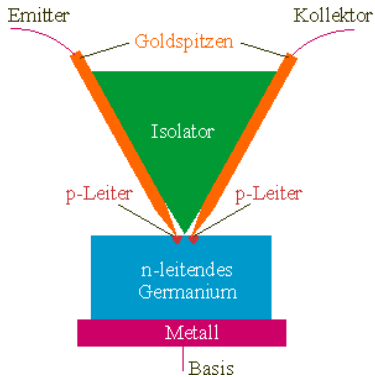
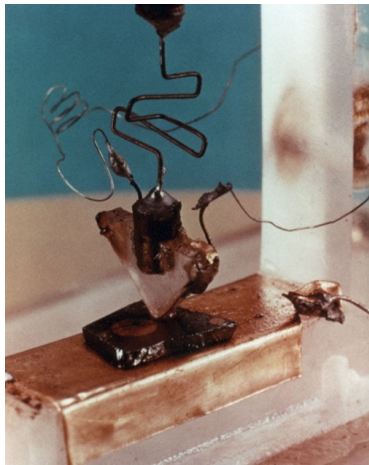
- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren
- Shockley kann's nicht verstehen
- Bardeen hat eine Erklärung
- Bardeen und Brattain haben eine neue Idee
- **Brattain experimentiert ...**

Bardeen und Brattain – Theorie und Experiment

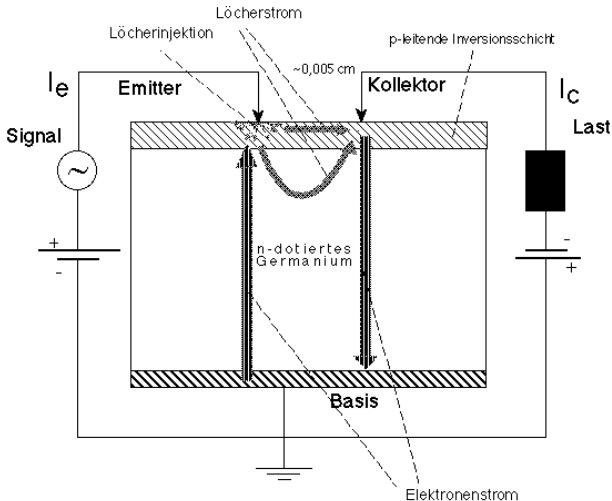
Die erfolgreiche Zusammenarbeit zweier Physiker im Jahr 1947

- Brattain experimentiert ...
- ... ohne Erfolg
- Der Feldeffekt scheint nicht zu funktionieren
- Shockley kann's nicht verstehen
- Bardeen hat eine Erklärung
- Bardeen und Brattain haben eine neue Idee
- Brattain experimentiert ...
- ... diesmal mit Erfolg

Der erste Transistor



Funktionsprinzip



Der erste Transistorverstärker

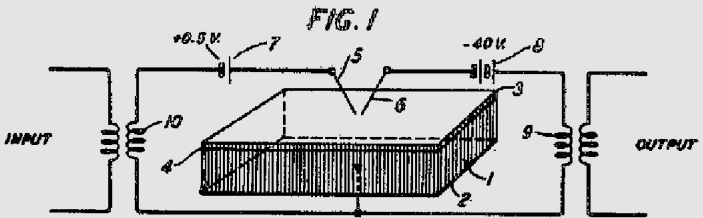
Oct. 3, 1950

J. BARDEEN ET AL
THREE-ELECTRODE CIRCUIT ELEMENT UTILIZING
SEMICONDUCTIVE MATERIALS

2,524,035

Filed June 17, 1948

3 Sheets-Sheet 1



Herr Shockley ist ärgerlich und frustriert

... aber er ist der Chef

- Erfinder ?

Herr Shockley ist ärgerlich und frustriert

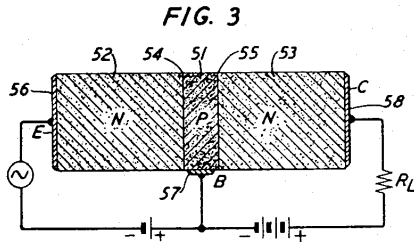
... aber er ist der Chef

- Erfinder ?
- Patent ?

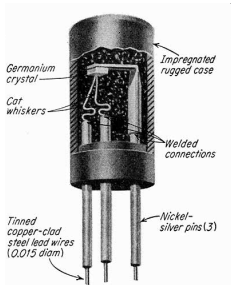
Herr Shockley ist ärgerlich und frustriert

... aber er ist der Chef

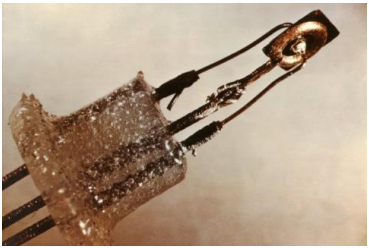
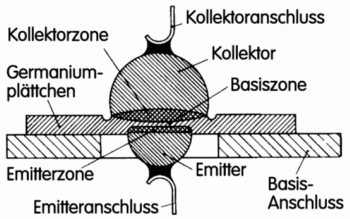
- Erfinder ?
- Patent ?
- Er erfindet einfach noch 'nen Transistor.



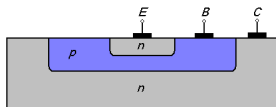
Die ersten kommerziellen Spitzentransistoren



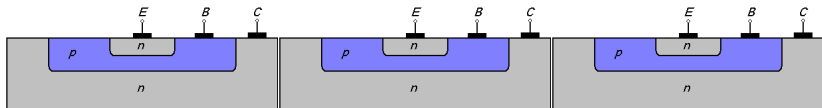
Flächentransistoren – Germanium



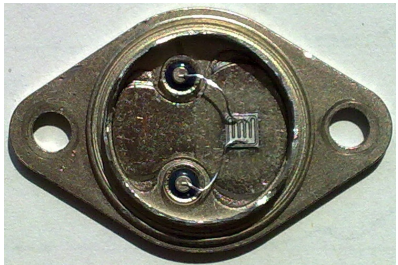
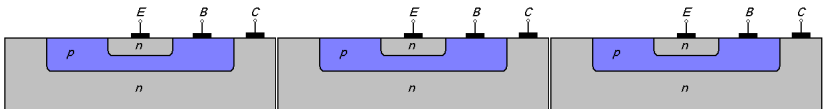
Planartransistoren – Silizium



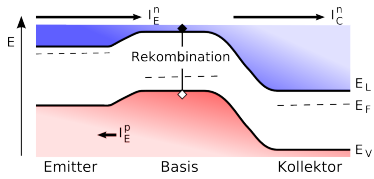
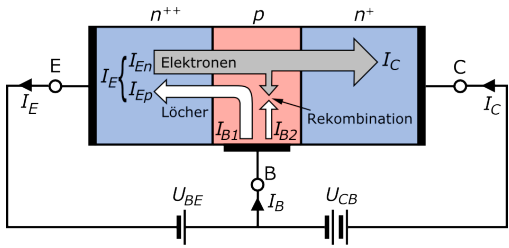
Planartransistoren – Silizium



Planartransistoren – Silizium



Wie funktionieren diese Transistoren ?



John Bardeen

- 1951** Professor an der University of Illinois in Urbana
- 1954** Nick Holonyak als erster Doktorand (Leuchtdiode 1962)
Theorie der **Supraleitung**
(mit Leon N. Cooper und John. R. Schrieffer)
- 1972** Nobelpreis zusammen mit Cooper und Schrieffer
(BCS-Theorie)



nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1972

Walter H. Brattain

1948 Die falsche Aufgabenverteilung
im Bild:

Shockley experimentiert,
Brattain schaut zu

Folge Distanziertes Verhältnis

Bell In anderer Arbeitsgruppe und
dann ohne Shockley weiter bei
Bell

1967 Rente, Professor am Whitman
College

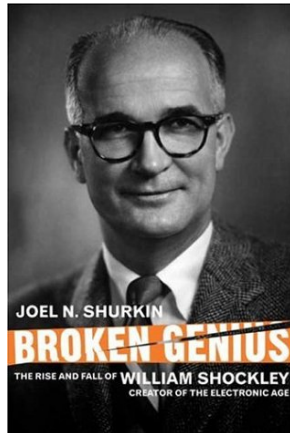


www.pbs.org/transistor/album1/brattain/index.html

William B. Shockley

- 1953** Abschied von Bell Labs
- 1955** Shockley Semiconductors, Silicon Valley
- 1956** Buch: Electrons and holes in semiconductors
- 1957** Acht wichtige Mitarbeiter gehen
- 1963** Professor in Stanford

“Broken Genius”



de.wikipedia.org/wiki/William_B._Shockley

Shockleys Mitarbeiter

1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

Shockleys Mitarbeiter

1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

1959 Planartechnik

Shockleys Mitarbeiter

- 1957** Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten
- 1959** Planartechnik
- 1959** Robert Noyce: Erster monolithischer IC

Shockleys Mitarbeiter

1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

1959 Planartechnik

1959 Robert Noyce: Erster monolithischer IC

1965 Erster kommerzieller Operationsverstärker $\mu\text{A} 709$

Shockleys Mitarbeiter

1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

1959 Planartechnik

1959 Robert Noyce: Erster monolithischer IC

1965 Erster kommerzieller Operationsverstärker $\mu\text{A} 709$

1968 Gordon E. Moore und Robert Noyce verlassen Faichild, zusammen mit Andy Grove gründen sie eine neue Firma, den Namen *Moore Noyce* finden sie unpassend, daher wird's *Integrated Electronics*, abgekürzt

Shockleys Mitarbeiter

1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

1959 Planartechnik

1959 Robert Noyce: Erster monolithischer IC

1965 Erster kommerzieller Operationsverstärker $\mu\text{A} 709$

1968 Gordon E. Moore und Robert Noyce verlassen Faichild, zusammen mit Andy Grove gründen sie eine neue Firma, den Namen *Moore Noyce* finden sie unpassend, daher wird's *Integrated Electronics*, abgekürzt

Shockleys Mitarbeiter

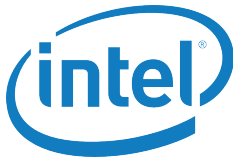
1957 Sherman Mills **Fairchild** unterstützt die acht Dissidenten

1959 Planartechnik

1959 Robert Noyce: Erster monolithischer IC

1965 Erster kommerzieller Operationsverstärker $\mu\text{A} 709$

1968 Gordon E. Moore und Robert Noyce verlassen Faichild, zusammen mit Andy Grove gründen sie eine neue Firma, den Namen *Moore Noyce* finden sie unpassend, daher wird's *Integrated Electronics*, abgekürzt



1955: Eine japanische Firma ändert ihren Namen

1955: Eine japanische Firma ändert ihren Namen

Die Firma **Tokyo Tsushin Kogyo Kabushiki Kaisha** baut das erste japanische Transistorradio



1955: Eine japanische Firma ändert ihren Namen

Die Firma **Tokyo Tsushin Kogyo Kabushiki Kaisha** baut das erste japanische Transistorradio

Aber wie will man mit diesem Namen die Welt erobern ?



1955: Eine japanische Firma ändert ihren Namen

Die Firma **Tokyo Tsushin Kogyo Kabushiki Kaisha** baut das erste japanische Transistorradio

Aber wie will man mit diesem Namen die Welt erobern ?

Sie ändert ihn daher in ...



1955: Eine japanische Firma ändert ihren Namen

Die Firma **Tokyo Tsushin Kogyo Kabushiki Kaisha** baut das erste japanische Transistorradio

Aber wie will man mit diesem Namen die Welt erobern ?

Sie ändert ihn daher in ...

SONY



Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.

Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.

Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.

Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.
- Die anderen Transistoren sind erfolgreich.

Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.
- Die anderen Transistoren sind erfolgreich.
- Technologie wird verbessert, Planartechnik.

Feldeffekttransistoren

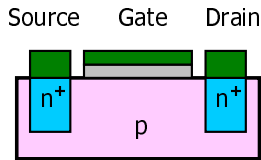
Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.
- Die anderen Transistoren sind erfolgreich.
- Technologie wird verbessert, Planartechnik.
- In den 60er Jahren fangen sie an sich durchzusetzen.

Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

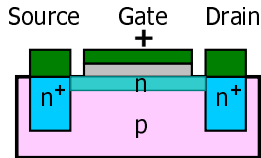
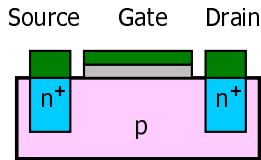
- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.
- Die anderen Transistoren sind erfolgreich.
- Technologie wird verbessert, Planartechnik.
- In den 60er Jahren fangen sie an sich durchzusetzen.



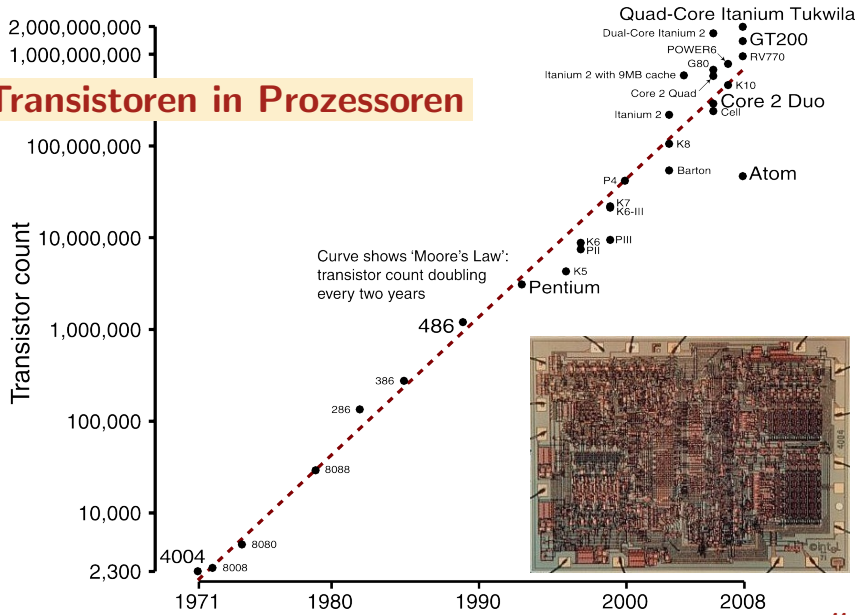
Feldeffekttransistoren

Das einfachere Prinzip braucht länger um sich durchzusetzen

- Prinzip von Lilienfeld und Heil vorgeschlagen.
- Ansätze von Shockley und auch von Mataré und Welker in diese Richtung.
- Kein Ansatz funktioniert.
- Die anderen Transistoren sind erfolgreich.
- Technologie wird verbessert, Planartechnik.
- In den 60er Jahren fangen sie an sich durchzusetzen.



Transistoren in Prozessoren



ICE 3 – ohne Transistoren geht nix

Meinen Drehstrom mach ich mir selbst



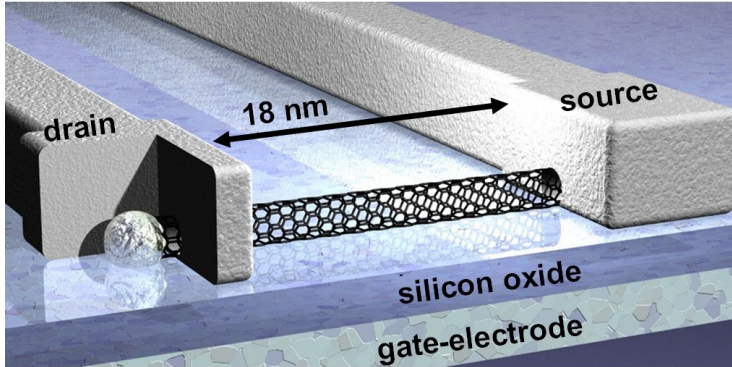
Medizin – Pillen werden intelligent

Die Miniaturisierung der Sensorik und Elektronik macht's möglich



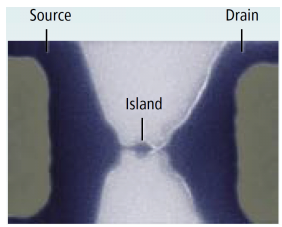
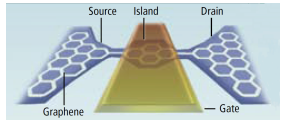
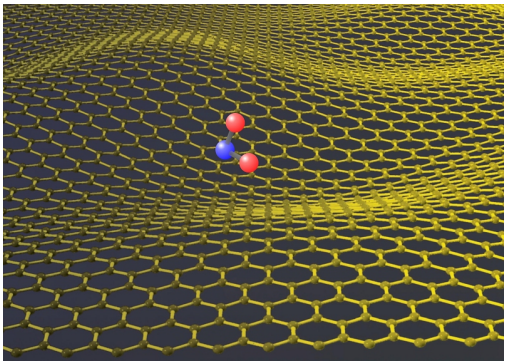
Supermini – Kohlenstoffnanoröhrchen

Gesteuerte Leitfähigkeit in einem nanoskopischen Draht



Graphen – Kohlenstoff in seiner neuesten Form

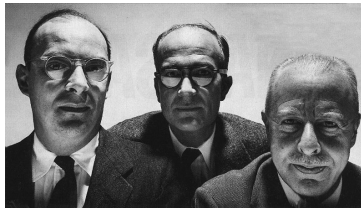
Ein einziges Elektron reicht aus



Zusammenfassung

Was haben wir gelernt?

- Eine Erfindung hat ihre Geschichte
- Halbleiter- und andere Physik
- Transistoren – mal so, mal so
- Nobelpreisträger sind freundliche ältere Menschen ?



Literatur & Links

Lehrbücher zur *Festkörperphysik* und zur *Halbleiterphysik*

Kai Christian Handel: *Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung*. Dissertation RWTH Aachen (1999).

Hans Queisser: *Kristallene Krisen: Mikroelektronik – Wege der Forschung, Kampf um Märkte*. Piper (1985).

Lillian Hoddeson, Michael Riordan: *Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age* (1998).

Joel N. Shurkin: *Broken Genius – The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age*. Macmillan (2006).

Lillian Hoddeson, Vicki Daitch: *True Genius: The Life and Science of John Bardeen*. Henry (2002).

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/bardeen-lecture.pdf

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/brattain-lecture.pdf

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/shockley-lecture.pdf

<http://www.pbs.org/transistor/album1/index.html>

http://semiconductormuseum.com/Museum_Index.htm

http://nobelprize.org/educational_games/physics/transistor/function/index.html

<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/physlist.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>

<http://wapedia.mobi/de/Triode>

http://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor

<http://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET>

<http://www.privateline.com/history.html>

<http://www.radiomuseum.org>

<http://www.computerbase.de/lexikon>

<http://transistorhistory.50webs.com>

<http://home.snafu.de/wumpus>

<http://www.xvcvcorp.com/Electronics%20Museum%20HTML.html>