



Leibniz  
Universität  
Hannover

# **Halbleiterbauelemente**

## **- eine Einführung -**

**H. Jörg Osten**

**Institut für Materialien und Bauelemente  
der Elektronik**

**- MBE -**

**Leibniz Universität Hannover  
Schneiderberg 32, 30167 Hannover**

---

**nur für den LUH-internen Gebrauch**

# Die Welt wird digitaler....

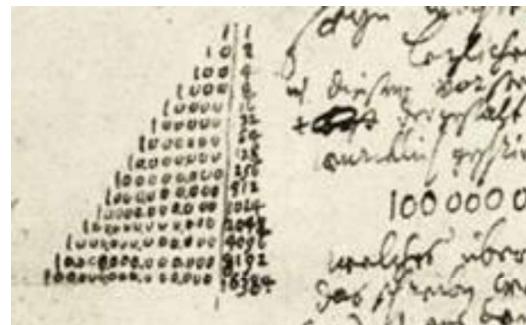
0 und 1 werden dargestellt durch:

- Mechanik
- Elektrischen Strom (an/aus)
- Gespeicherte Ladungen
- Widerstandsänderungen
- Ausrichtung kleiner Magnete
- Verschiedene optische Reflektionen
- Spinorientierungen
- .....





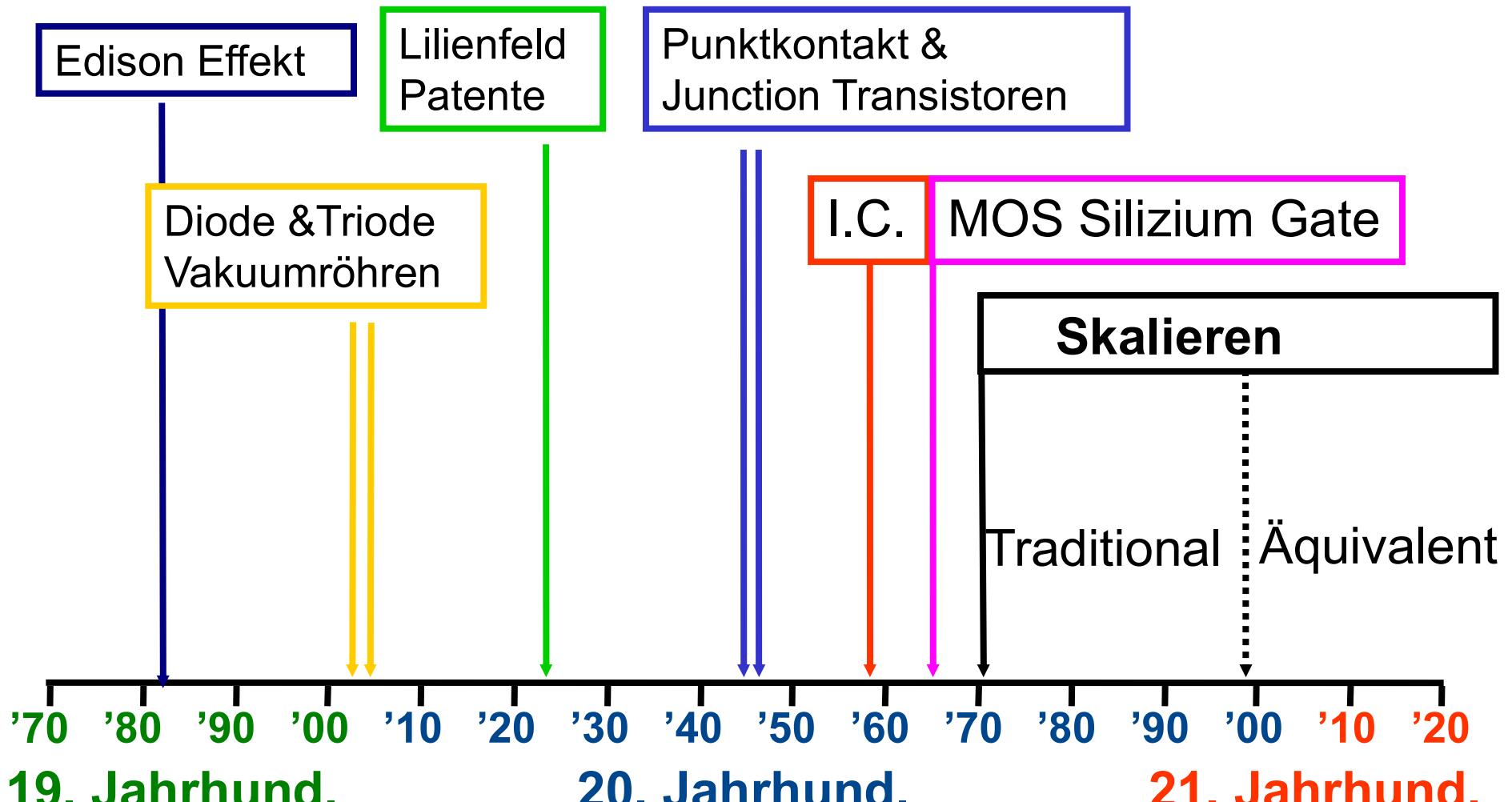
Das binäre Zahlensystem wurde durch Gottfried Wilhelm Leibniz zum ersten Mal in seinem **Neujahrsbrief** vom Januar 1697 an Herzog Rudolf August von Wolfenbüttel skizzierte.



1 1 1  
1 0 2  
1 0 0 4

Leibniz  
Universität  
Hannover

## Binäre Zahlen - Grundlage aller elektronischen Rechensysteme

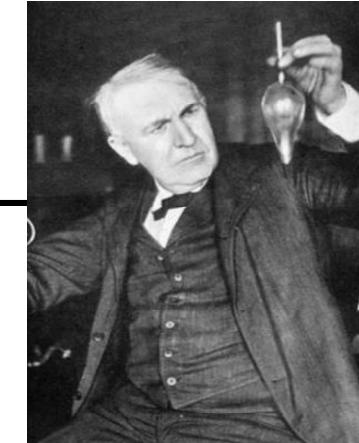


## Edison Effekt (1883)

**Thomas Alva Edison entdeckte die Glühemission bei Versuchen mit Glühlampen, die eine zusätzliche Elektrode im Glaskörper enthielten**

**Dabei erkannte er, dass der Elektronenfluss zwischen Glühdraht und Elektrode mit dem Heizstrom zunimmt.**

**Die erste elektronische Schaltung, die diesen Zusammenhang ausnutzte, war ein Gleichspannungsregler, den Edison 1883 patentierte**



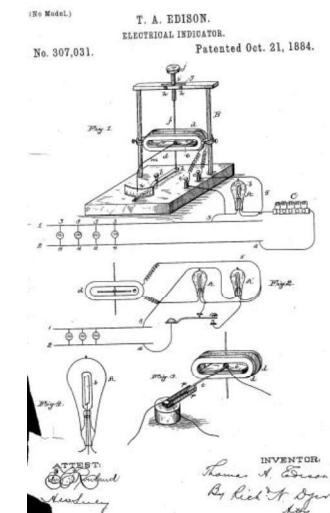
UNITED STATES PATENT OFFICE.

THOMAS A. EDISON, OF MENLO PARK, NEW JERSEY.

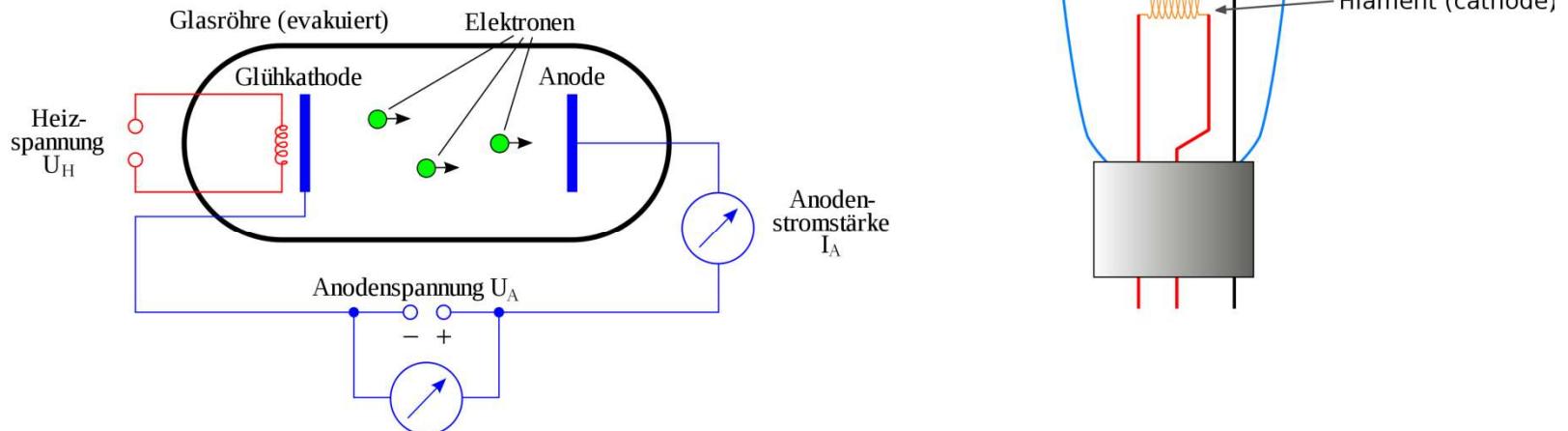
ELECTRICAL INDICATOR.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 307,031, dated October 21, 1884.

Application filed November 15, 1883. (No model.)

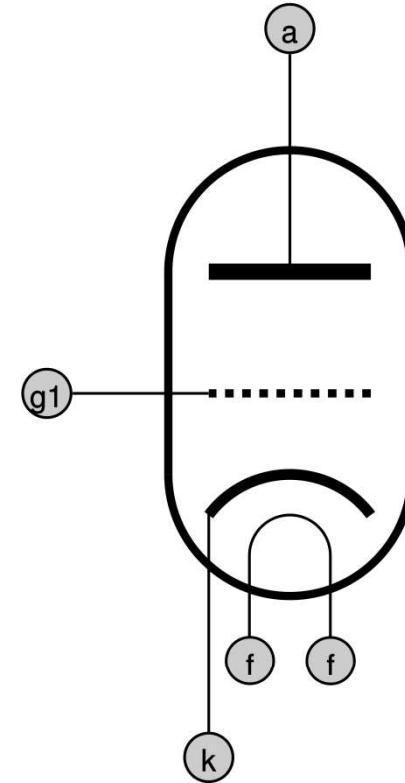


# Vakuumdiode



- Aus der Kathode treten Elektronen aufgrund von thermischer Emission aus
  - werden von der Anode wieder eingefangen  
besonders stark, wenn die Anode gegenüber der Kathode positives Potenzial hat.  
bei negativer werdender Anode nur solange möglich, wie die Energie der austretenden Elektronen noch ausreicht, die Potentialbarriere zur (negativen) Anode zu überwinden.
- Wirkung eines Einweg-Gleichrichters

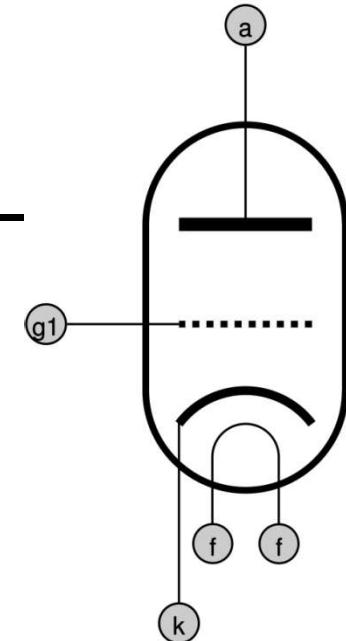
## Triode der 1920er/30er Jahre



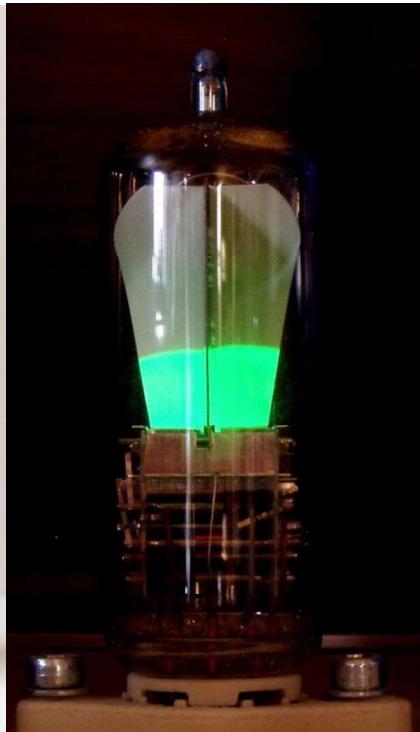
Die Triode oder Eingitterröhre verfügt über eine zusätzliche Elektrode, das so genannte Steuergitter ( $g_1$ ), welches zwischen Kathode und Anode angebracht ist.

## Triode der 1920er/30er Jahre

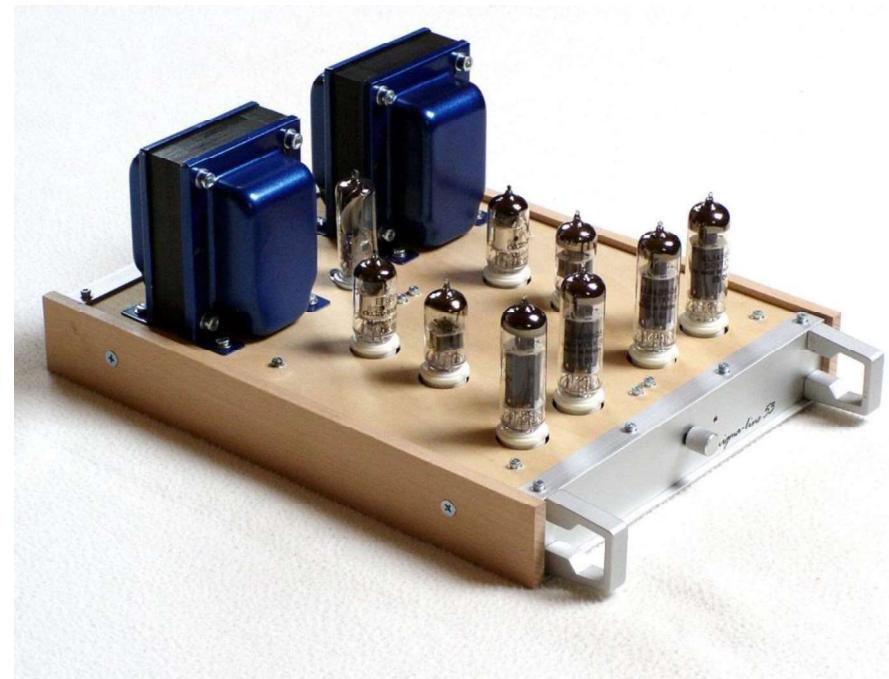
- Die Menge der zwischen Kathode und Anode fließenden Elektronen lässt sich durch die Höhe einer am Gitter anliegenden, gegenüber der Kathode negativen Spannung stromlos steuern.  
**gilt nur bis zu Frequenzen im unteren zweistelligen Megahertzbereich.**
- Da das Gitter nahe an der Kathode liegt, erzeugen schon kleine Variationen der Gitterspannung große Stromschwankungen zwischen Anode und Kathode  
**Einige Elektronen gelangen durch das Gitter und werden dann weiter zur Anode beschleunigt.**  
**Die Menge dieser Elektronen ist dabei von der Spannung am Gitter abhängig, so dass der Stromfluss Anode-Kathode durch die Spannung am Gitter gesteuert wird und es zu einer Verstärkung kommt.**
- Triode: historisch erster elektronischer Verstärker
- Heute finden sich Trioden vor allem in Vorverstärkerstufen von Hi-End-Audiogeräten



## Modernere Röhrenverstärker



EM83 ist eine  
Anzeigeröhre



Gegentakt Stereo HiFi-Röhrenverstärker  
ohne Netzteil elektronik

## Julius Edgar Lilienfeld

- \* 18. April 1882 in Lemberg (heute Lwiw)
- † 28. August 1963 in Charlotte Amalie  
Virgin Islands
- österreichisch-ungarischer Abstammung
- Maschinenbaustudium in Berlin
- danach Studium der experimentellen Physik
- Maßgeblich an der Entwicklung von Röntgenröhren  
beteiligt
- 1927 wanderte Lilienfeld wegen des zunehmenden  
Antisemitismus endgültig in die USA aus
- Seit 1934 Staatsangehöriger der USA
- Leiter der Ergon Research Laboratories in Malden (Mass.)
- seit 1989 wird der Julius-Edgar-Lilienfeld-Preis vergeben



## Lilienfeld Patent von 1928

---

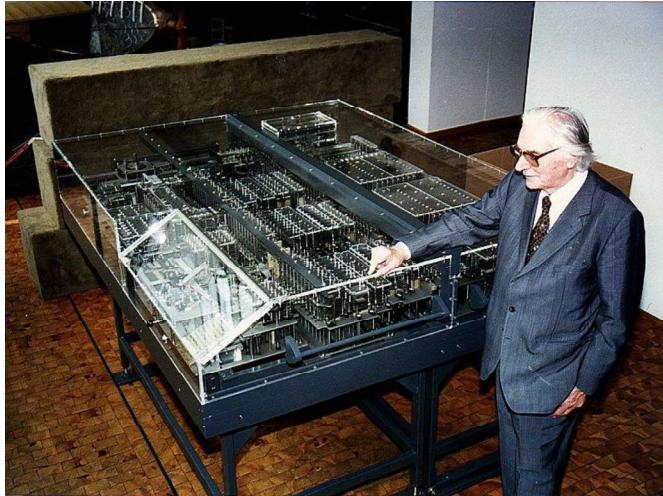
- Er erfand 1925 den Feldeffekttransistor  
**Obwohl das zum Bau eines funktionsfähigen Transistors notwendige reine Halbleitermaterial damals fehlte, beschrieb er Konstruktion und Funktion von Transistoren bereits genau**
- Es ist außerdem erwiesen, dass die US-amerikanischen Entwickler des Transistors (1947) die entsprechenden Lilienfeld-Patente kannten.  
**Sie unterließen es, diese grundlegenden Lilienfeld-Patente in ihren Veröffentlichungen, späteren Forschungsberichten oder historischen Berichten zu erwähnen.**

## Erfindungen von Julius Edgar Lilienfeld

---

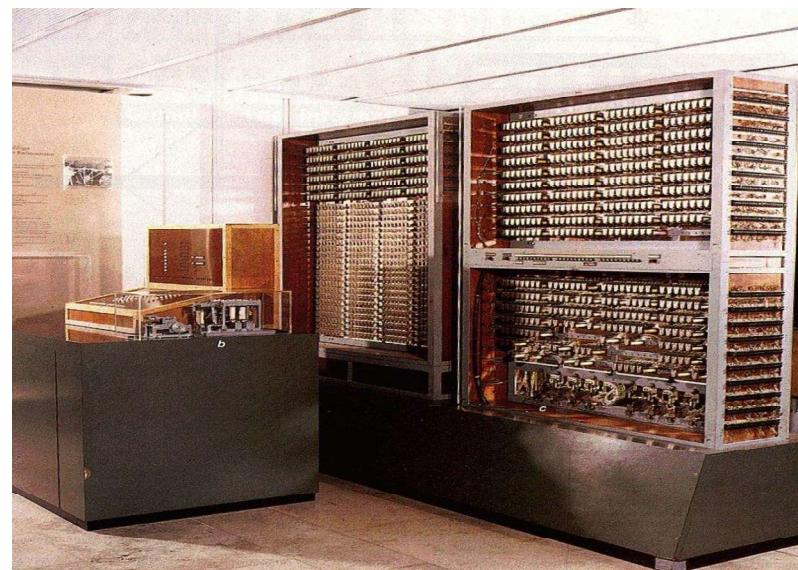
- Lilienfeld besaß 15 deutsche und 60 US-Patente, z. B.
- Patent CA272437: Electric Current Control Mechanism  
*Angemeldet am 22. Oktober 1925, veröffentlicht am 19. Juli 1927, (Eintrag beim kanadischen Patentamt).*
- Patent US1745175: Method and Apparatus For Controlling Electric Currents.  
*Veröffentlicht am 28. Januar 1930*
- Patent US1900018: Device for controlling electric current.  
*Angemeldet am 28. März 1928, (Dünnfilm-MOSFET).*
- Patent US1877140: Amplifier for electric currents.  
*Angemeldet am 8. Dezember 1928, (Halbleiterversion der Vakuumröhre).*
- Patent US2013564: Electrolytic condenser.  
*Angemeldet am 29. August 1931, (Elektrolytkondensator).*

## Wie alles anfing ... Deutschland



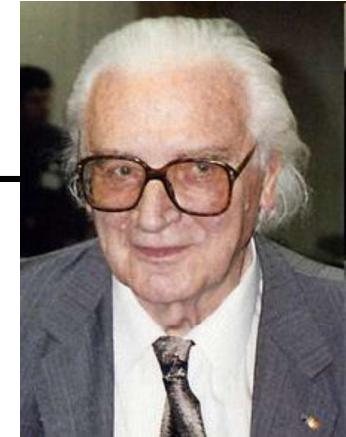
**Z3: 1941 von Konrad Zuse gebaut  
war die erste frei  
programmierbare, auf dem  
binären Zahlensystem basierende  
Rechenmaschine der Welt,  
ca. 2 000 Relais  
Taktrate: 5.3 Hz**

**Konrad Zuses „Z1“  
erster programmierbarer  
Rechner der Welt  
Funktionierte mechanisch,  
ca 20 000 Einzelteile  
1936-1938**

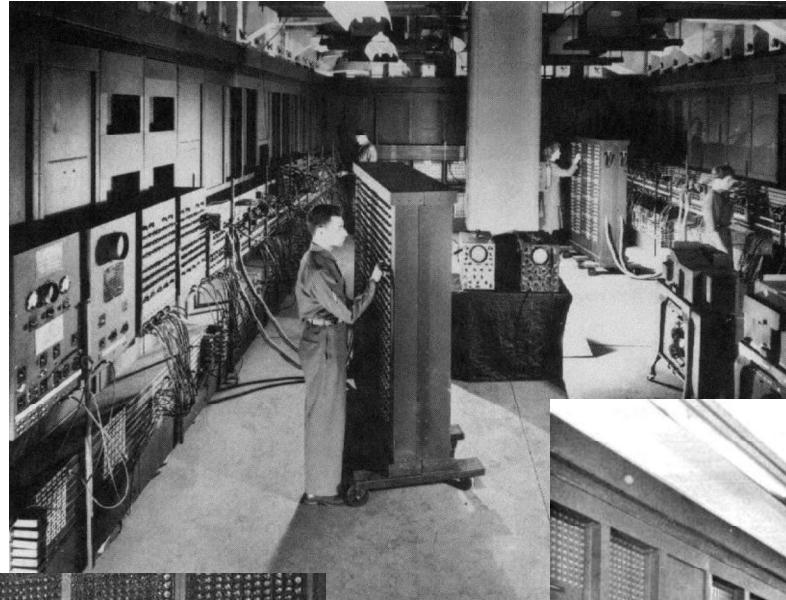


## Konrad Zuse: Lebenslauf

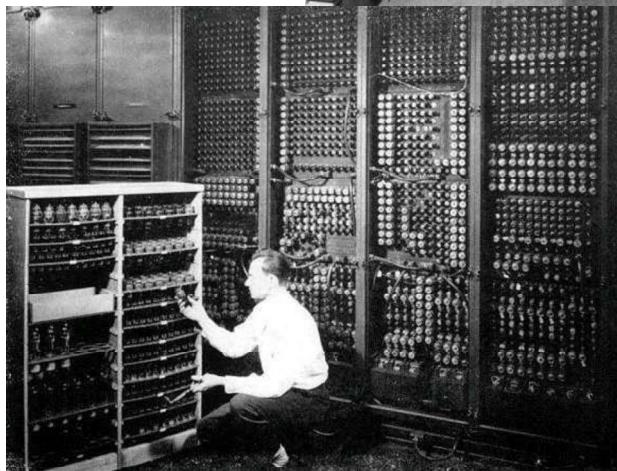
- Geboren am 22. Juni 1910 in Berlin (Wilmersdorf)
- 1928: Abitur am Reform-Real-Gymnasium in Hoyerswerda.
- 1935: Diplom an der Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Berlin Charlottenburg.  
**Nach dem Studium Statiker bei den Henschel-Flugzeugwerken in Berlin-Schönefeld.**
- 1938: Fertigstellung der ersten noch ganz mechanisch arbeitenden Rechenmaschine, die **Zuse Z1 Versuchsmodell**  
**Nachbau steht seit 1989 im Museum für Verkehr und Technik in Berlin**
- 1941: entstand das Gerät Z3, der erste voll funktionsfähige programmgesteuerte Rechner der Welt  
**in elektromechanischer Technik**  
**Nachbau befindet sich heute im Deutschen Museum in München.**



## Wie alles anfing ... USA



ENIAC, University of Pennsylvania



## ENIAC: electronic numeric integrator and computer

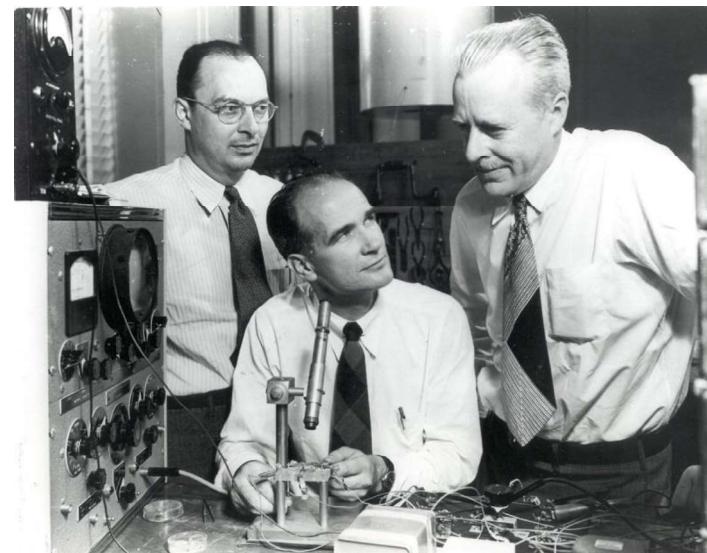
- gilt als der erste große vollelektronische Rechner.  
militärisches Geheimprojekt an der *University of Pennsylvania's Moore School of Electrical Engineering*.  
sollte ballistische Forschungen unterstützen  
1943 begannen die Arbeiten, bis 1945 wurde er fertig gestellt.  
1946 wurde er dann der Öffentlichkeit vorgestellt.
- Einige Zahlen:  
30 Tonnen schwer  
5000 Additionen oder 500 Multiplikationen pro Sekunde  
kostete damals ca. 400000 \$.

	ENIAC	„ENIAC-on-a Chip“
Vakuum Röhren	18000	none
Transistoren	none	250000
Wiederstände	70000	none
Kondensatoren	10000	none
Größe	30m x3m x1m	8x8 mm
Speed	100 kHz	20 MHz
Strom	174 kW	0,5 W

## Der Beginn der Mikroelektronik



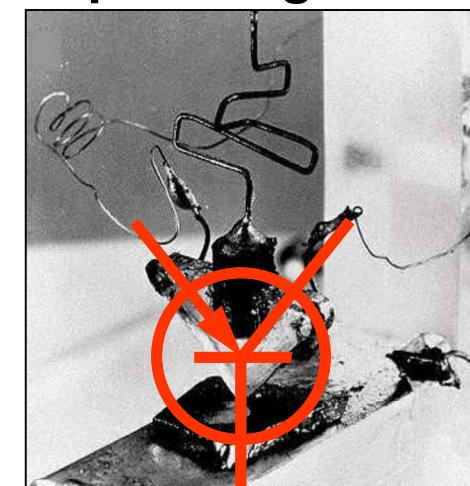
23.12. 1947:  
Der erste Ge-Punktkontakt-  
Transistor erreicht eine  
Stromverstärkung von 18  
(Bell Laboratories)



**Current Transfer + Resistor = Transistor**

## Der erste Transistor

- Dieser erste Transistor war ein Punktkontakt-Transistor, in dem zwei Kontaktpunkte auf der Oberfläche eines kleinen n-dotierten Germanium-Blocks dicht nebeneinander befestigt waren.
- Einer dieser Kontakte (Emitter) besaß eine positive Vorspannung, der zweite Kontakt (Kollektor) eine negative Vorspannung.
- Der Emitter injizierte aufgrund seiner Vorspannung Löcher, die zum Kollektor flossen.
- **23.12. 1947: offizielle Vorführung**  
der Transistor wurde eigentlich schon am **16.12.1947 "geboren"**  
an diesem Tag erzielten die Forscher erstmals eine Spannungs- und Leistungsverstärkung mit Hilfe eines Halbleiters.



## Nobelpreis in Physik 1956

**"for their researches on semiconductors  
and their discovery of the transistor effect"**



William Bradford  
**Shockley**  
1910–1989



John  
**Bardeen**  
1908–1991



Walter Houser  
**Brattain**  
1902–1987



# Der CK 722 von Raytheon 1953

*Perfect Pair...*

**RAYTHEON**

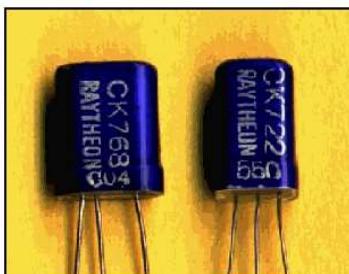
**CK722 and CK768 TRANSISTORS**

You won't find a better performing, easier to use, less expensive combination than these two, top-quality Raytheon Transistors.

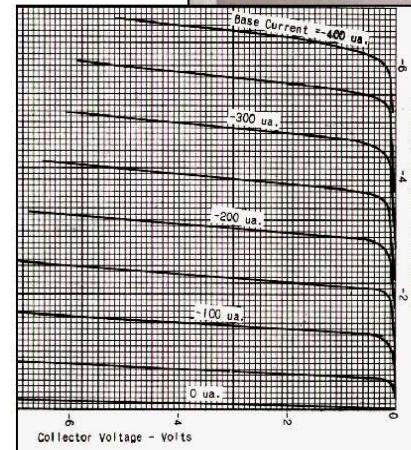
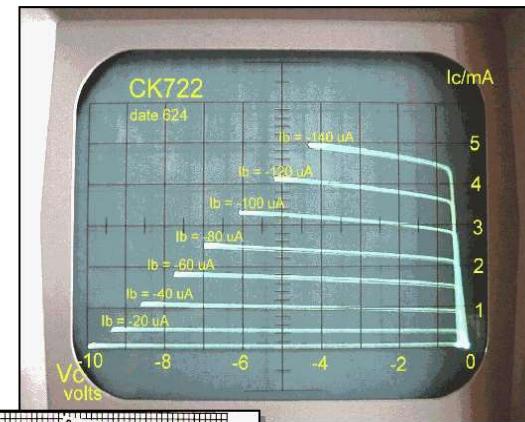
The CK768 is specially designed for RF application with the Raytheon CK722 for audio circuits. They pair up perfectly. Yet the CK722 costs but 99¢, the CK768 only \$1.50 — \$2.49 for the best transistor combination that money can buy. Available from stock through your Raytheon Tube Supplier.

Get the Raytheon TRANSISTOR APPLICATIONS BOOK 116 pages — over 50 practical circuits — using low cost Raytheon Transistors. For your copy send 50¢ to Raytheon, Dept. P7.

**RAYTHEON**  
Excellence in Electronics  
**RAYTHEON MFG. CO.**  
Receiving and Cathode Ray Tube Operations  
Newton 38, Massachusetts



The CK768 germanium junction transistor was introduced in 1955/56 by Raytheon as a low-cost "companion" for the CK722. The CK768 had an advertised upper frequency limit of 3.5 MHZ, and so qualified as an RF unit, at least when compared with the audio frequency capability of the CK722. Check out Volume II of the Raytheon Transistor Applications Book for a few circuits using these two units. I've also shown several in the Construction Articles section of this webpage.



## Erste Massenprodukte

---



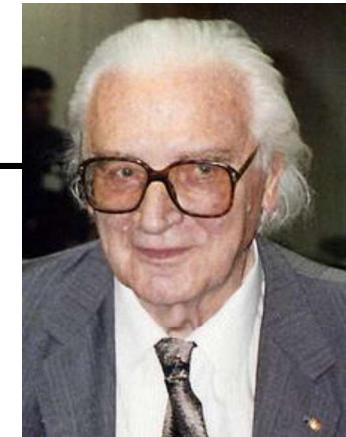
Erstes “Pocket”-Radio mit Ge-  
Transistoren  
Regency 1954



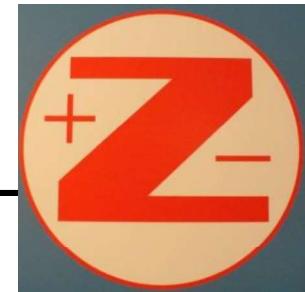
Sony's erstes  
volltransistorisiertes  
Radio 1955

## Konrad Zuse: Lebenslauf

- 1941-1945: Entwicklung einer universellen algorithmischen Sprache („Plankalkül“)  
**Endgültige Niederschrift 1945**
- 1947: Gründung des Zuse-Ingenieurbüro in Hopferau im Allgäu.
- 1949: Gründung der ZUSE KG in Neukirchen
- 1957 wurde der Betrieb nach Bad Hersfeld verlegt.  
**Entwicklung weiterer programmgesteuerter Rechengeräte in elektromechanischer Technik, Röhren- und Transistortechnik (Modelle Z11, Z22, Z23, Z25 und Z31, Z64 und andere).**
- 1956: Entwicklung eines sehr genau arbeitenden automatischen Zeichentisches Graphomat Z64  
**Demonstration der Anwendung von Rechenmaschinen im graphischen Bereich**
- Gestorben am 18. Dezember 1995 in Hünfeld.



## Die Zuse KG



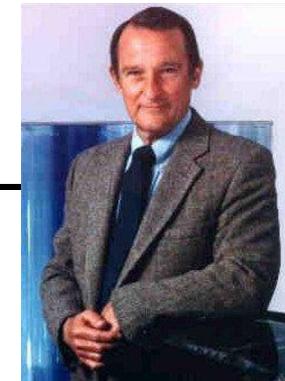
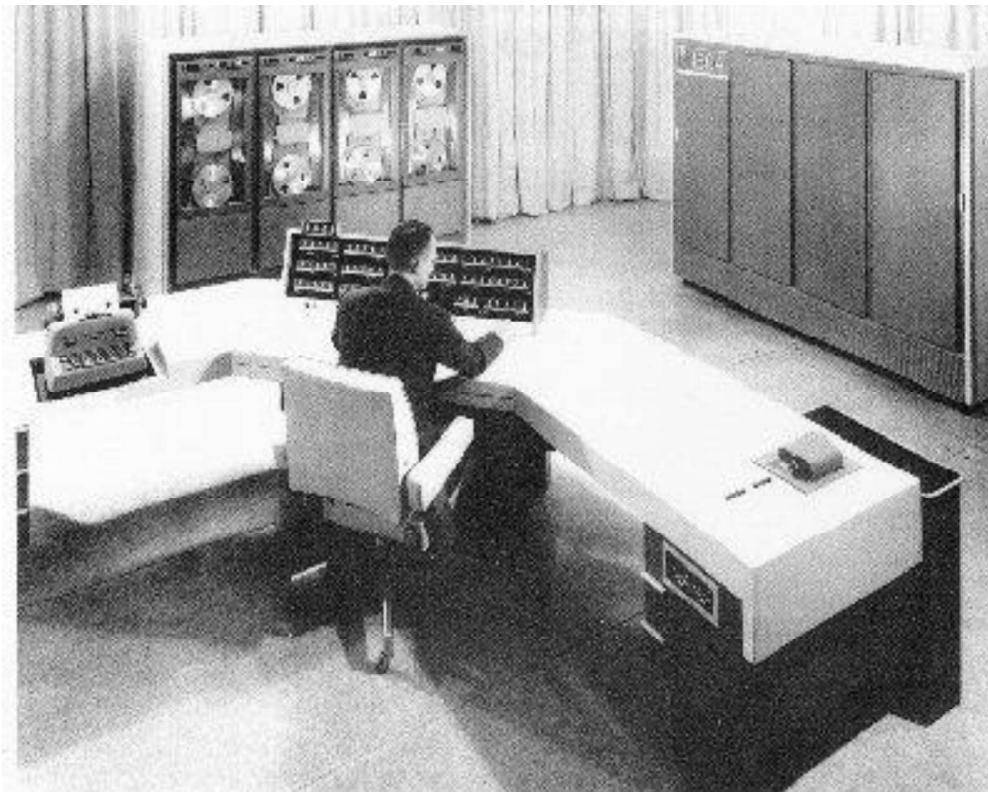
- Gegründet 1949 in Neukirchen Kreis Hünfeld von Konrad Zuse, Harro Stucken und Alfred Eckhard
    - Erste Tätigkeit der Firma war die Instandsetzung der Zuse Z4 und deren Verkauf an die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
    - damit war die Z4 der erste kommerziell gehandelte Computer und der erste funktionierende Computer in Europa.
  - 1956: Beginn der Serienfertigung von Computern (Z11)
  - 1961: Z23 war der erste Computer auf Basis von Transistoren (2900 Transistoren + 7700 Dioden, Preis ab 180 TDM)
  - 1964 wurde die Zuse KG komplett von Brown, Boveri & Cie (BBC) übernommen
  - 1967 übernahm die Siemens AG 70% der Anteile an der Zuse KG von BBC und zwei Jahre später die verbleibenden 30%.
- Von 1949 bis 1969 stellte die Zuse KG 251 Rechner im Wert von 102 Millionen DM her
- Die Zuse KG war die erste Computerfirma weltweit, die kommerzielle Computer produzierte.



## Z 23: erster Transistorrechner in Deutschland

Taktfrequenz	ca. 140.000 Hertz
Rechenwerk	Gleitkommarechenwerk, Festkommarechenwerk, binär.
Mittlere Rechengeschwindigkeit	Festes Komma: Addition 0,3ms, Multiplikation 13ms, Division 13ms, Gleitkomma: Addition 10,6 ms, Division 20ms.
Eingabe	5-Kanallochstreifen, Siemens Teletype Writer
Ausgabe	5-Kanallochstreifen, Siemens Teletype Writer
Wortlänge	40 Bit, entspricht ca. 8 Dezimalstellen
Transistoren	~ 2900
Dioden	~ 7700
Speicheraufbau	8192 Worte zu 40 Dualstellen, Ferritkernspeicher mit 248 Worten zu 40 Dualstellen. Ausbaubar auf 8192 Worte (Z23VK).
Leistungsaufnahme	~ 4000W
Gewicht	~ 1 Tonne
Einsatzgebiete	Bautechnik, Maschinenbau, Schiffbau, Elektrotechnik, Elektronik, Hydro- und Gasdynamik, Reaktorphysik, Ballistik, Vermessungstechnik, Optik, Energieversorgung, Verkehrstechnik, Bergbau, Behörden, Hoch- und Fachhochschulen, Chemische Produktion
Anzahl verkaufter Rechner	98
Preis	ab 180.000 DM oder Monatsmiete von 15.000 DM

## Ein früher Transistorrechner 1960



Seymour Cray  
1925-1996

**Seymour Cray's erster Computer, die CDC 1604, mit dem Meister an der Konsole, 1960.**

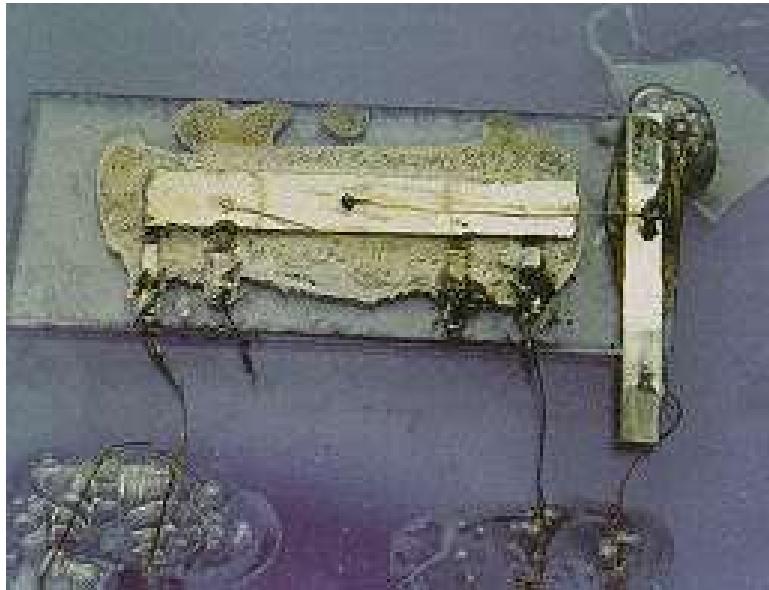
**Die 1604 basierte auf Germanium-Transistoren und lief mit einer Frequenz von 0.2 MHz**

## Vom Einzeltransistor zum Chip auf Silizium

---

- Bei Texas Instruments wurde 1954 der erste Silizium Transistor von **Gordon Kidd Teal** entwickelt und produziert.
- 1959 kam **Jack Kilby** ebenfalls bei TI auf die Idee, nicht nur einen einzelnen Transistor, sondern eine komplette elektronische Schaltung auf einer kleinen Siliziumscheibe zu integrieren  
**→ Beginn der Integration**

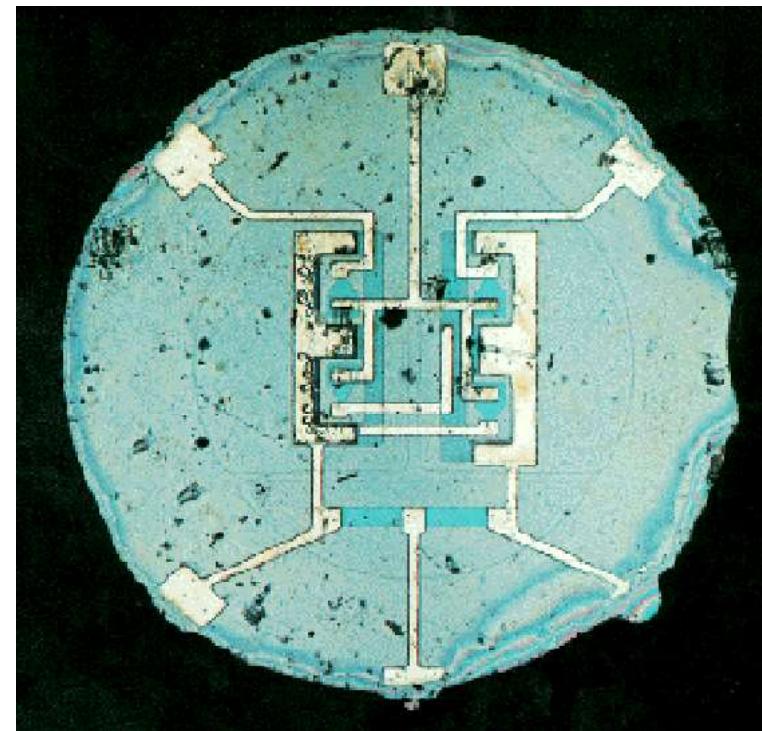
# Vom Einzeltransistor zum Chip auf Silizium



**Erste “Integration”**

**J. Kilby, Texas Instruments 1959**

**Erste integrierte Schaltung**  
**R. Noyce, Fairchild 1959**



## Vom Einzeltransistor zum Chip auf Silizium

---

- 1957 beschlossen acht Ingenieure von William B. Shockleys Semiconductor Laboratory, die Einrichtung zu verlassen und ein eigenes Unternehmen, Fairchild Semiconductor, zu gründen.

Die Gruppe wurde später bekannt als die *Traitorous Eight* (deutsch »Die Verräterischen Acht«).

Die acht Männer waren Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce und Sheldon Roberts.

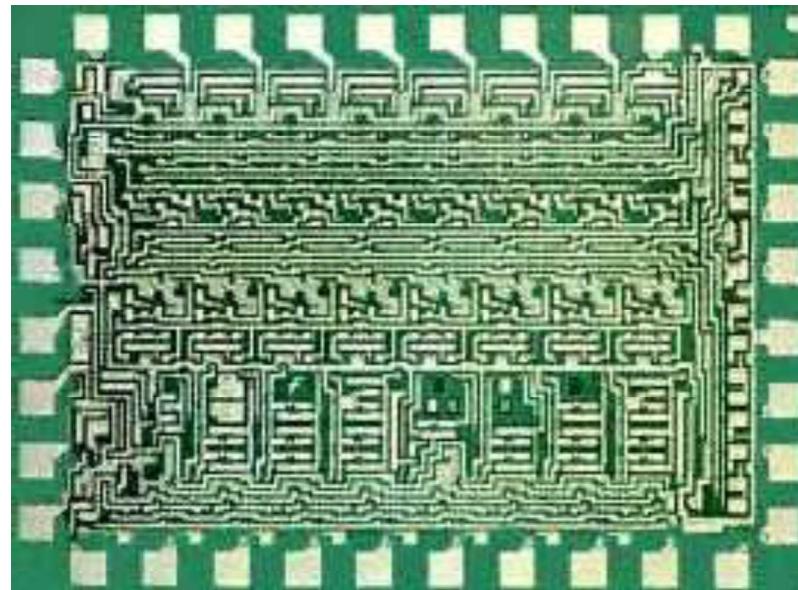
Für die Finanzierung ihres Projekts wandten sie sich an Sherman Mills Fairchild von *Fairchild Camera and Instruments*. Er finanzierte das Projekt mit 1,5 Millionen US-Dollar und Fairchild Semiconductor wurde eine Tochterfirma von Fairchild Camera. Am 1. Oktober 1957 wurde Fairchild Semiconductor gegründet.

- 1958 hatten sie den planaren Transistor fertig entwickelt  
(Leitung: Jean Hoerni )
- 1958 gelang es Robert Noyce, den ersten monolithisch gefertigten integrierten Schaltkreis herzustellen.  
→ diese Entwicklung wurde 1961 patentiert
- 1961 wird bei Fairchild die Resistor-Transistor-Logik entwickelt  
→ Es ist der erste IC auf einem einkristallinen Siliziumchip
- Zwei der Gründungsmitglieder von Fairchild, Robert Noyce und Gordon Moore gründeten später die *Intel Corporation*.

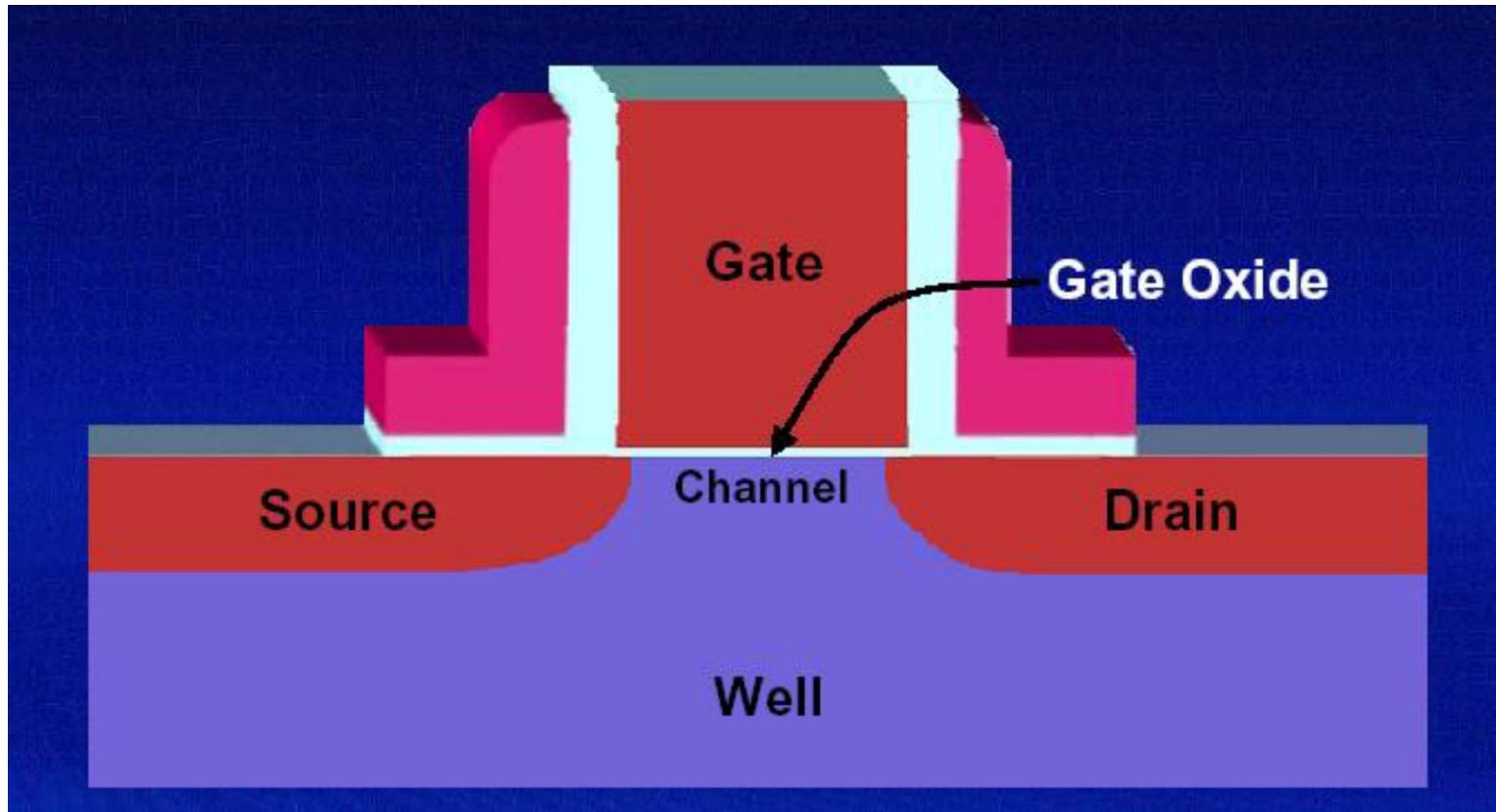
## Weitere wichtige Entwicklungen

---

- 1960: Atalla und Kahng, Bell Labs, MOSFET
- 1967: Fairchild, erstes Standard MOS Produkt für Datenverarbeitung
- 1970: Intel, der erste DRAM i1103, 1k PMOS)

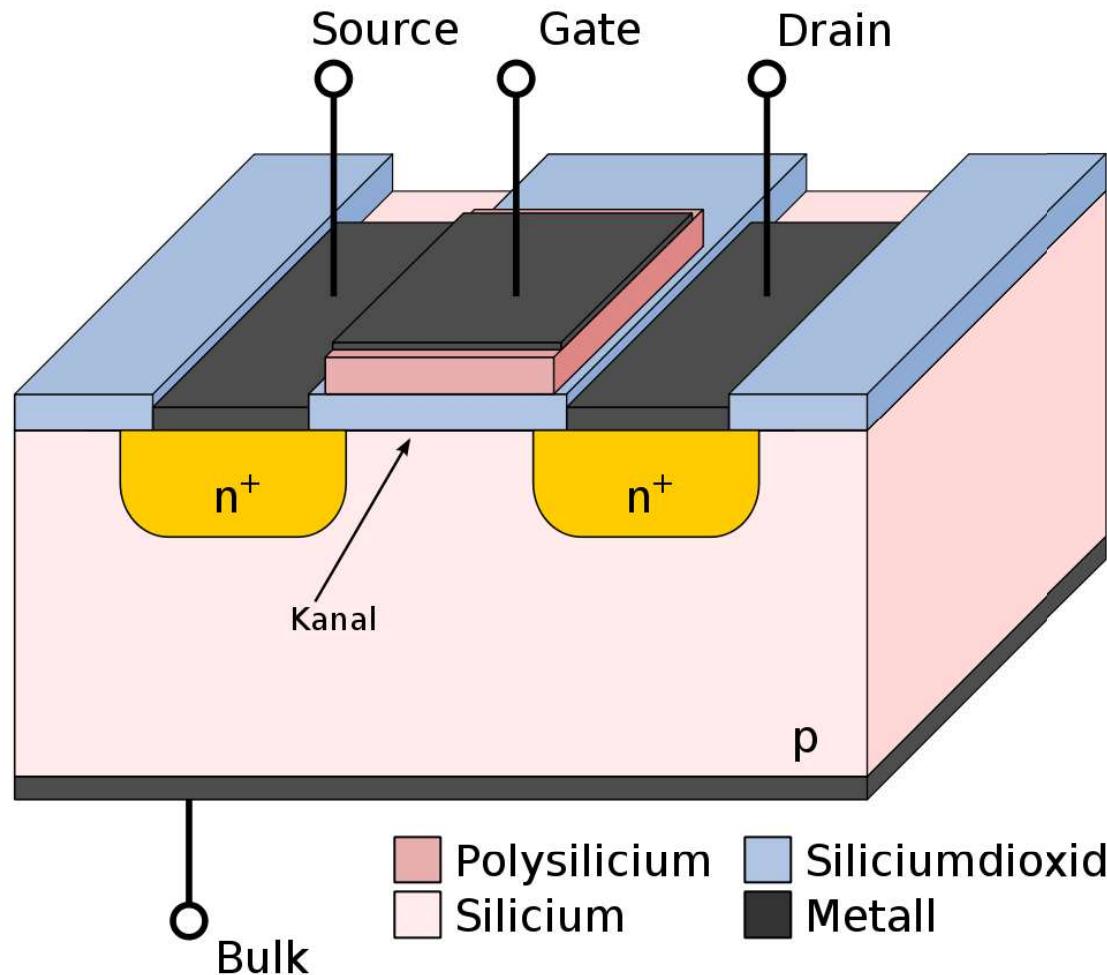


# Ein Feldeffekt-Transistor (FET)



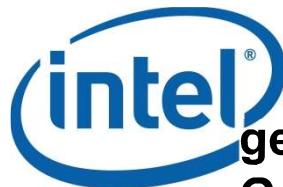
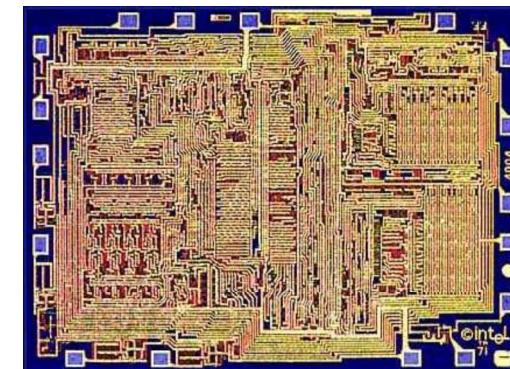
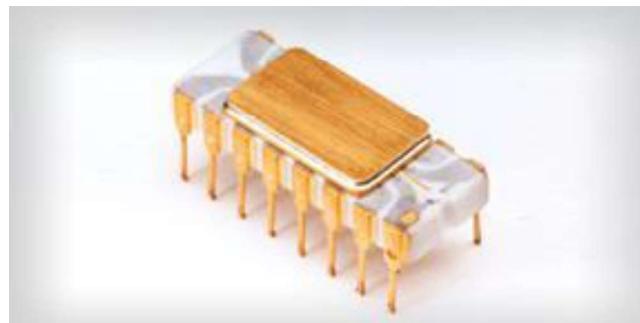
## MOSFET: *Metal Oxide Semiconductor FET*

# Feldeffekttransistoren (FET): Grundaufbau



## 1971: der erste Mikroprozessor

- 15.11.1971: Intel gibt die Erfindung des Mikroprozessors bekannt  
→ *a new era of integrated electronics*
- Idee: Marcian E. Hoff, Realisierung: Frederico Faggin  
2250 Transistoren, 10 µm Technologie, 108 kHz

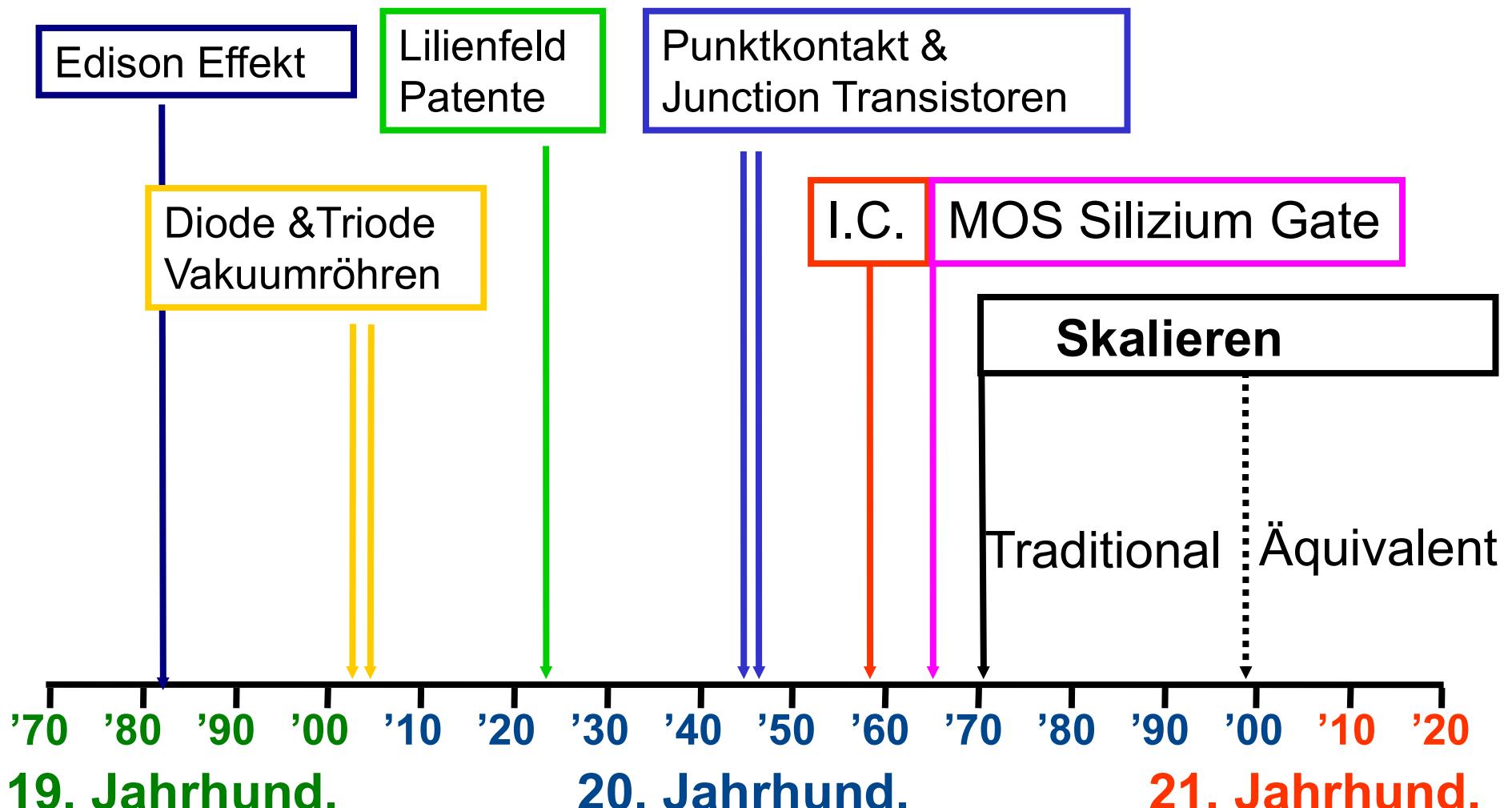


gegründet am 18. Juli 1968 von  
Gordon E. Moore und Robert Noyce  
INTEL = Integrated Electronics

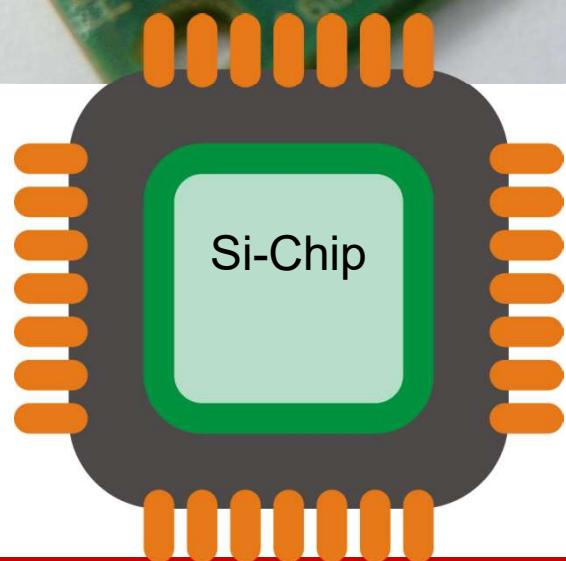
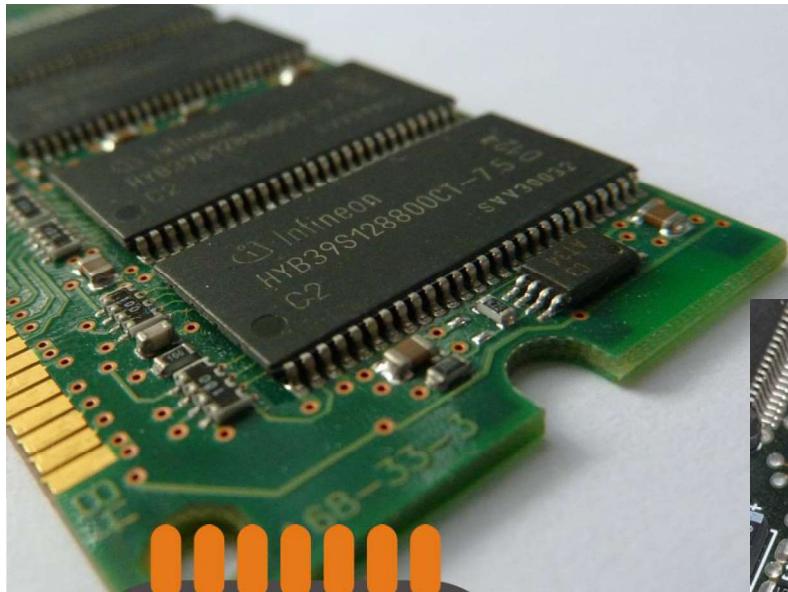
## 1981: der erste PC

- IBM baut den ersten Personal Computer
- Model PC 5150 mit Intel 8088 Prozessor  
29000 Transistoren, 3 µm Technologie, 8 MHz  
16 kByte großen Arbeitsspeicher, aufgeteilt war das RAM auf acht einzelne ICs, die eine Kapazität von je 16 kBit hatten.  
Betriebssystem von Bill Gates und Andy Grove



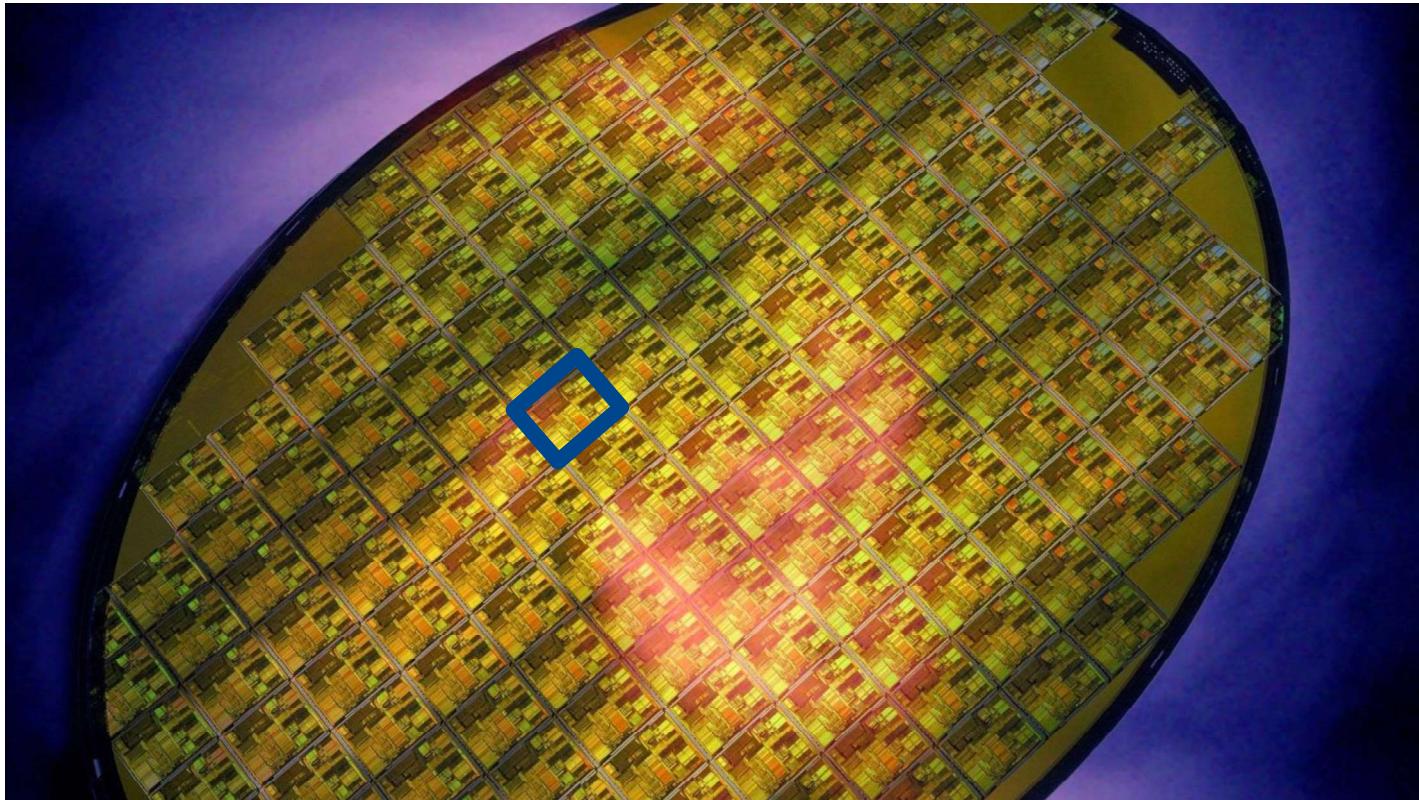


## Das Produkt: Schaltkreise (IC, Chip)



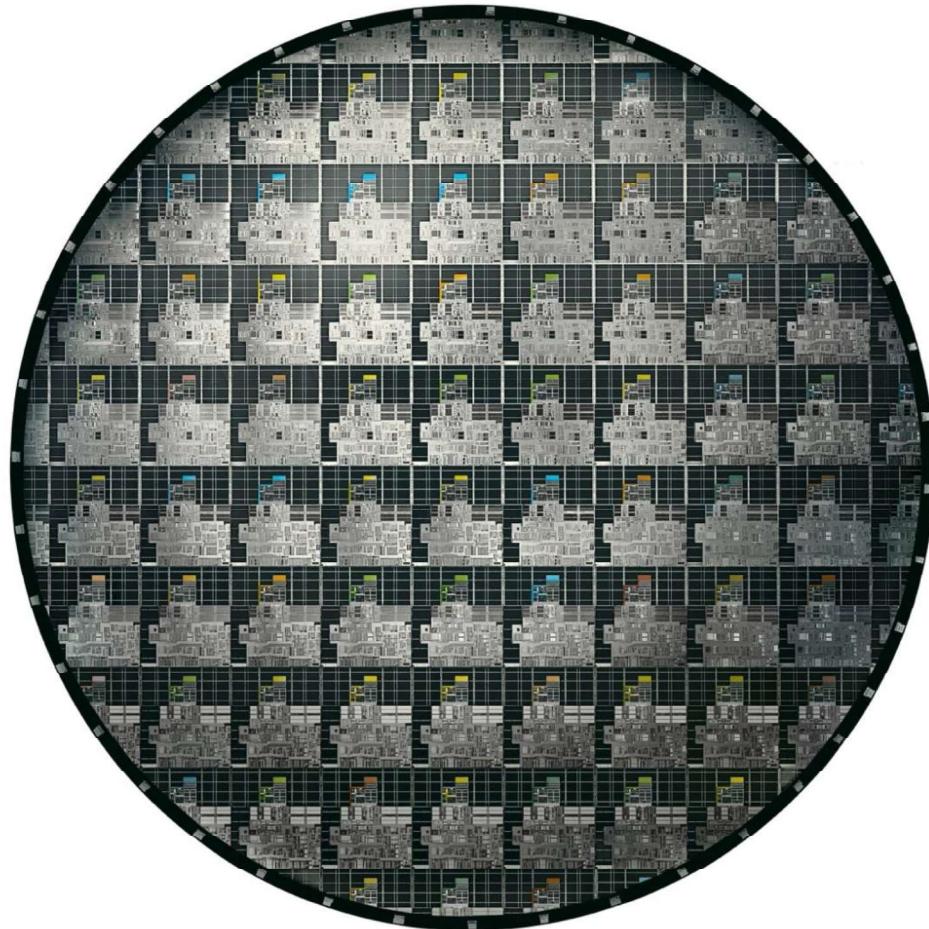
## Wafer und Chips

Wafer: die komplette einkristalline Halbleiterscheibe



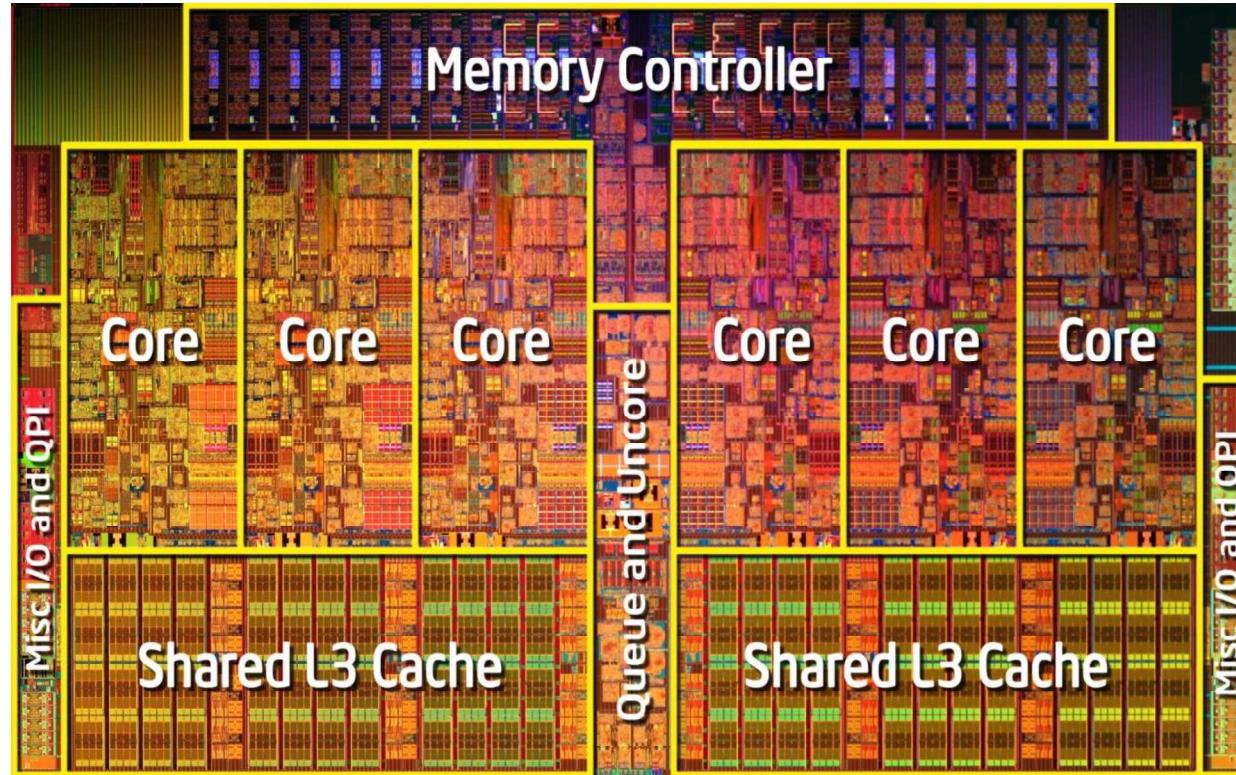
Chip (IC): eine komplette Schaltung auf dem Wafer

## Ein fertig prozessierter Wafer 2001



Itanium-Wafer (200 mm)  
Chipgröße:  $27,72 \times 21,5 \text{ mm}^2$   
 $= 596 \text{ mm}^2$

180 nm Technologie  
mit 25 400 000 Transistoren



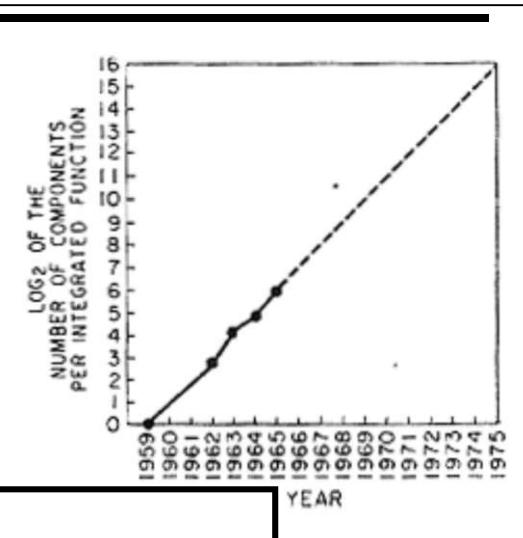
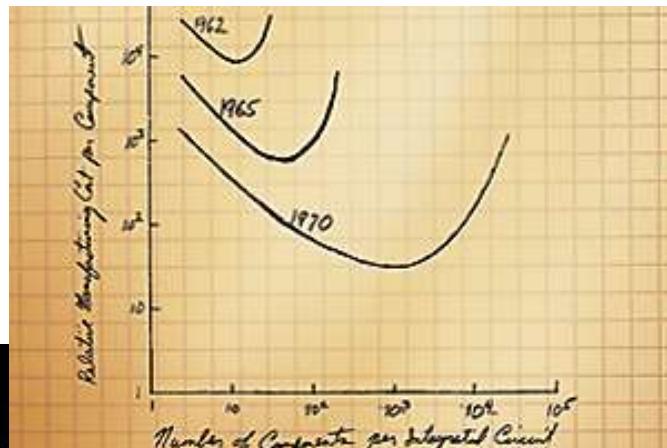
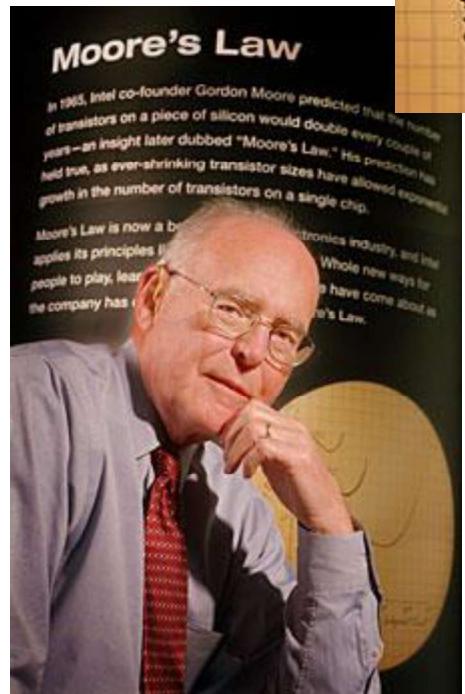
*die 1,17 Milliarden Transistoren des Sechskern-Prozessors  
Core i7-980X Extreme Edition von Intel belegen nur 239  
mm<sup>2</sup> auf dem Silizium-Wafer*

## Ein fertig prozessierter Wafer heute

---



**Durchmesser: 450 mm**



The experts look ahead

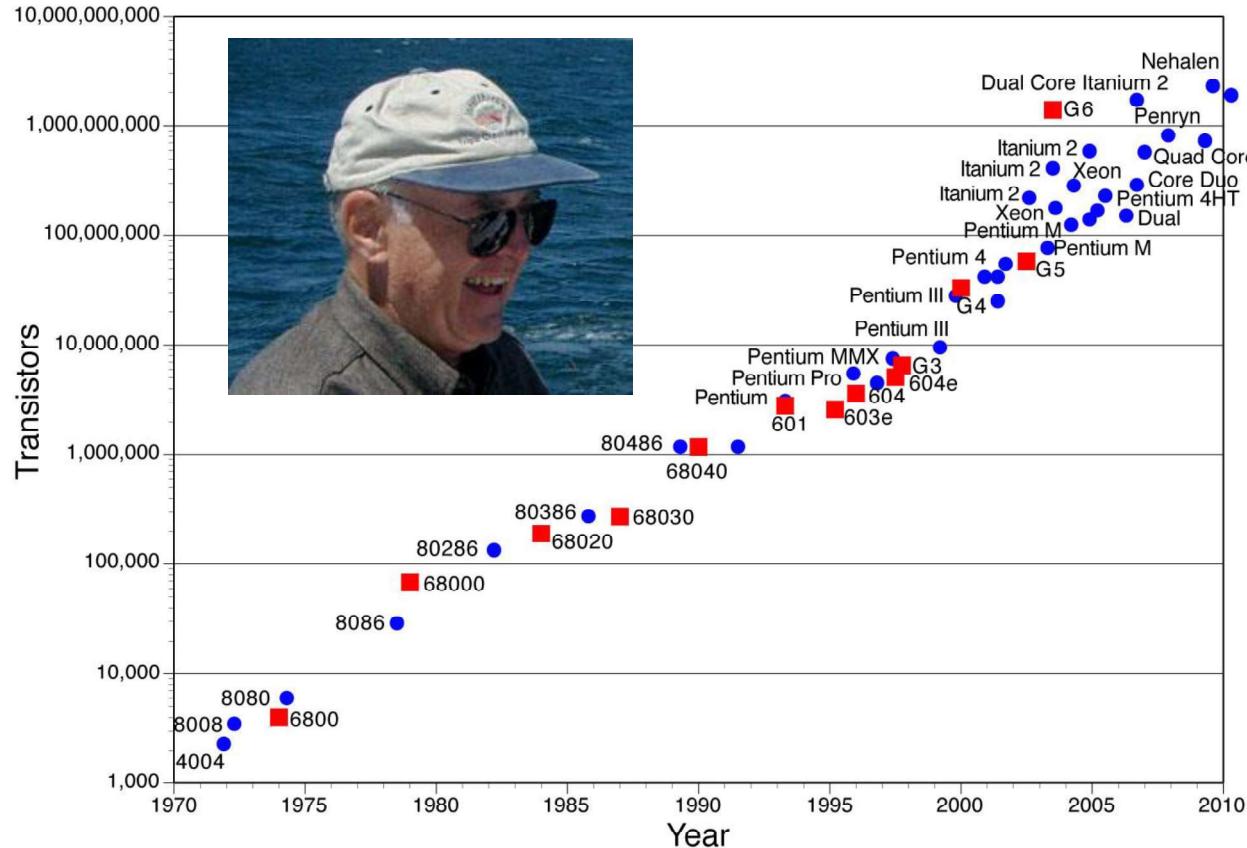
## Cramming more components onto integrated circuits

With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65,000 components on a single silicon chip

By Gordon E. Moore

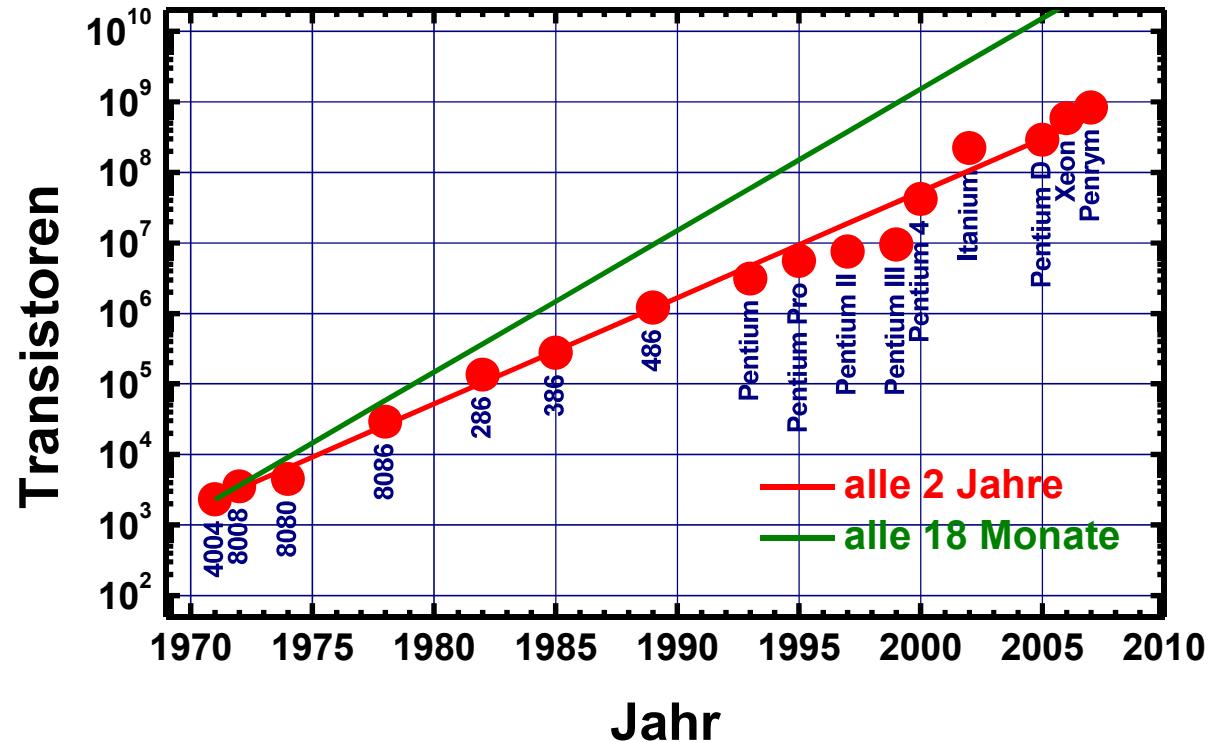
Director, Research and Development Laboratories, Fairchild Semiconductor division of Fairchild Camera and Instrument Corp.

## Moore's „Gesetz“ bis heute



**Gordon E. Moore 1965: Die Anzahl von Transistoren pro Chip verdoppelt sich alle 18 Monate**

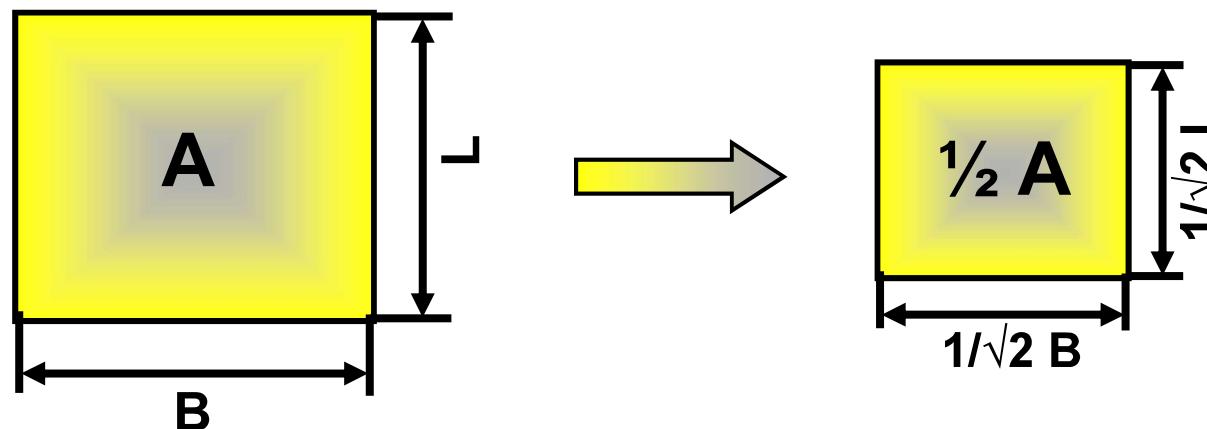
## Das Moore'sche „Gesetz“



**Realität: Die Anzahl von Transistoren pro Chip verdoppelt sich alle 2 Jahre**

## Skalieren

- Moore's „Gesetz“: Die Anzahl von Transistoren verdoppelt sich pro Generation  
Annahme: die Chipgröße bleibt gleich  
→ Die Fläche pro Transistor halbiert sich

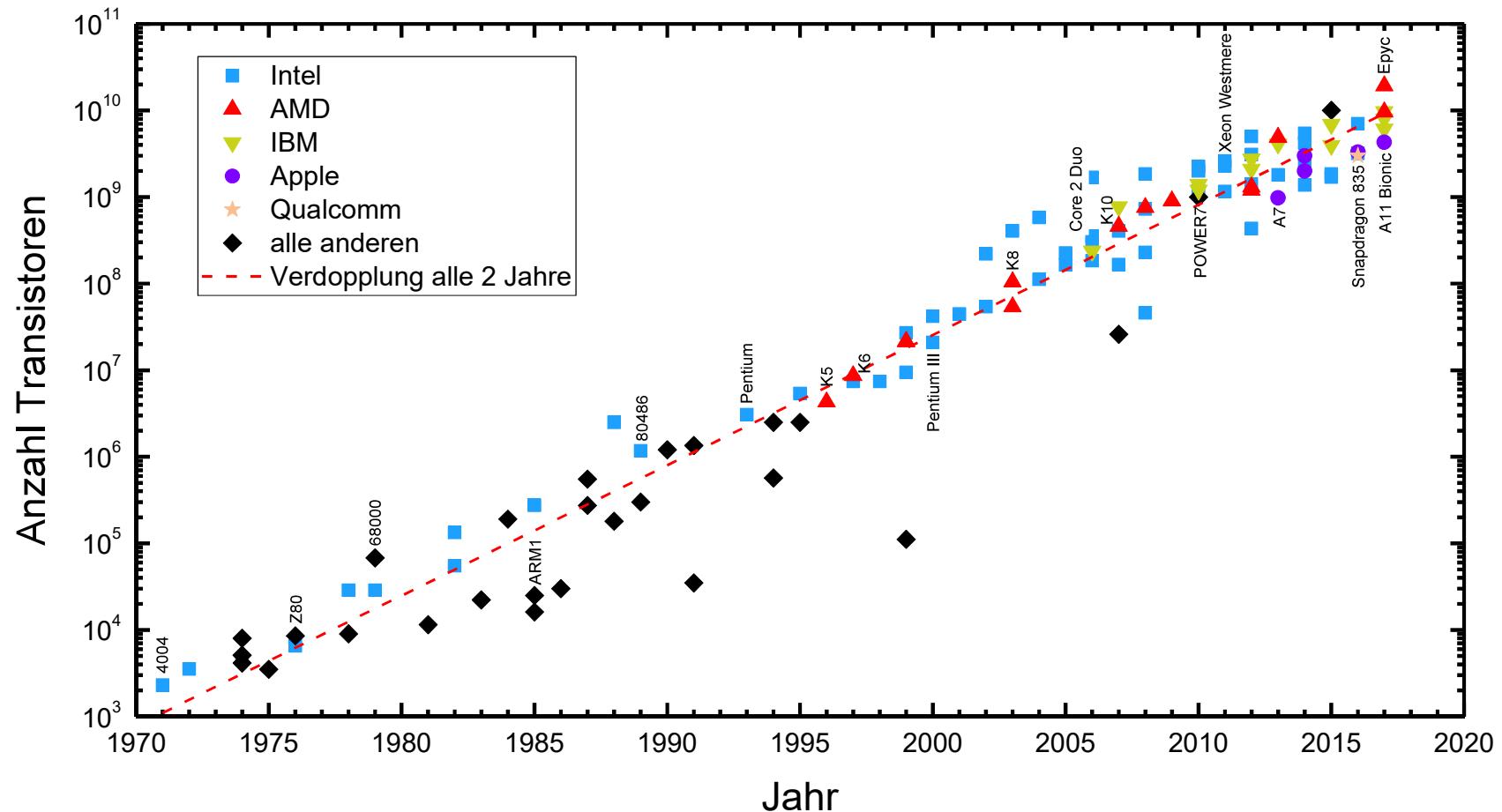


Dimensionen skalieren mit  $1/\sqrt{2} \sim 0.7$  (30 % kleiner)

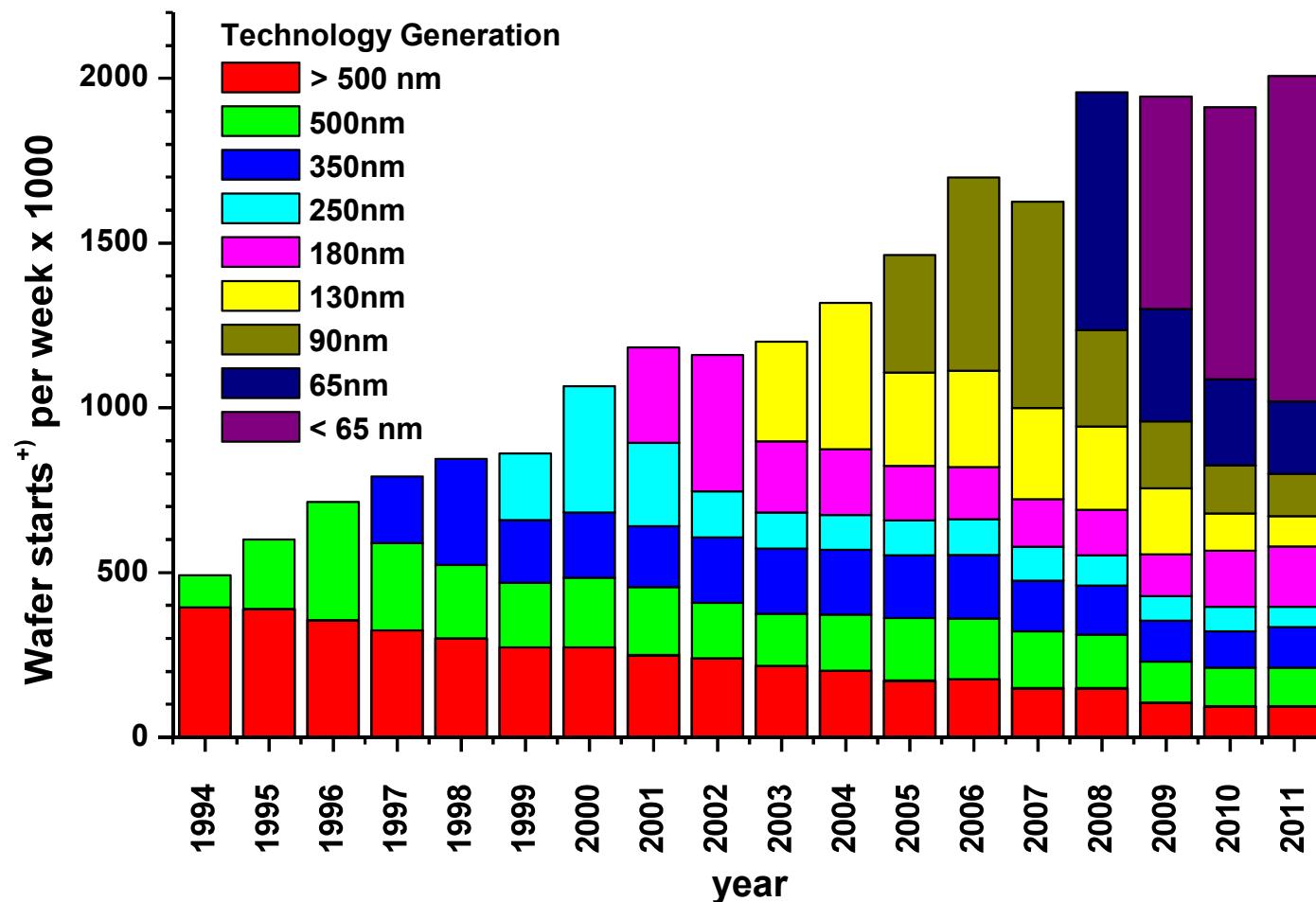
→ Technologiegenerationen:

180 nm, 130 nm, 90 nm, 65 nm, 45 nm, 32 nm, 22 nm ...

# Das Moore'sche Gesetz - (k)ein Naturgesetz?



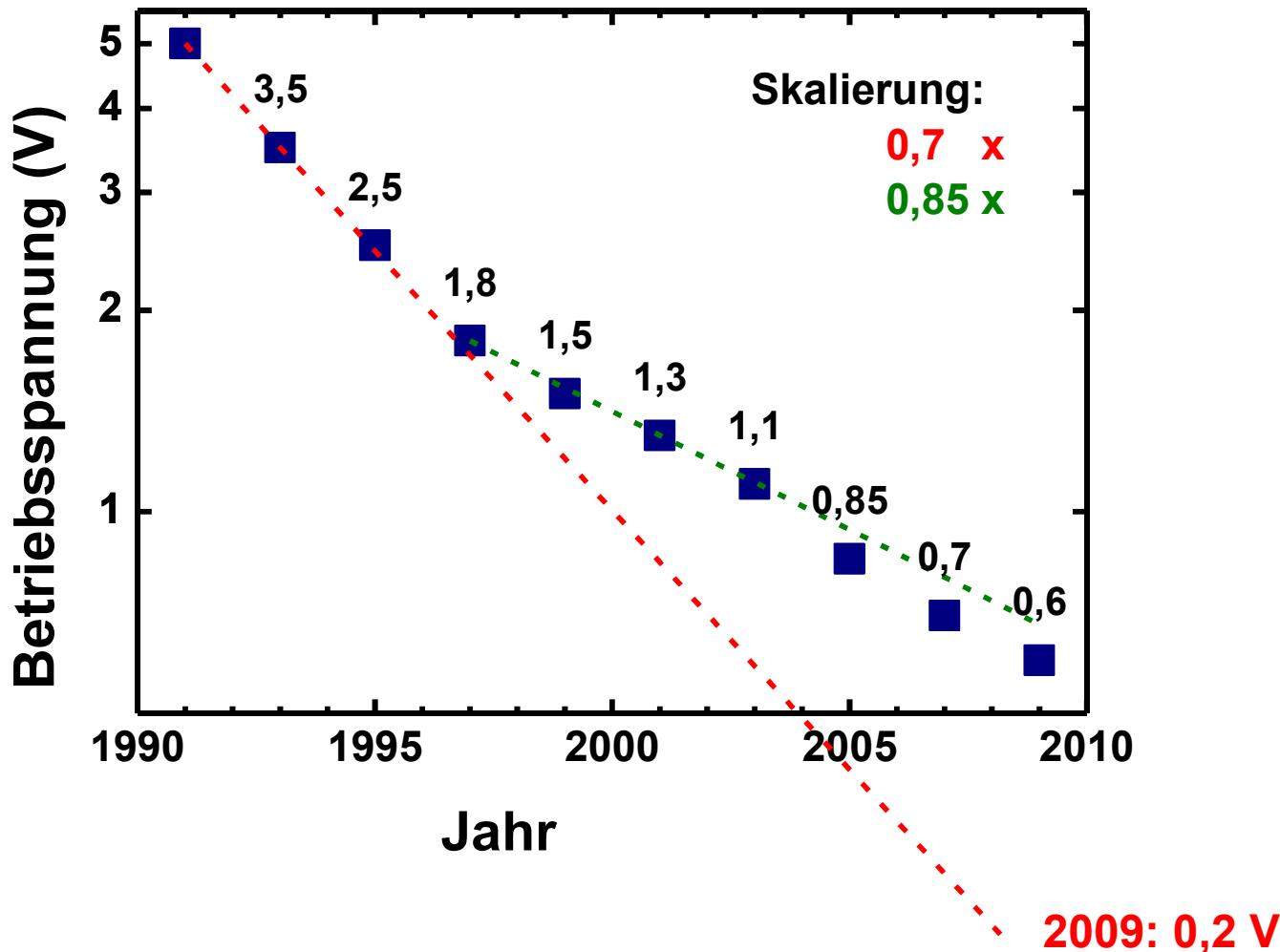
# Strukturgrößen: MOS-Bauelemente



<sup>+) 8" Äquivalent-Wafer</sup>

Quelle: SICAS Report: [www.sicas.info](http://www.sicas.info)

# Skalieren der Betriebsspannung

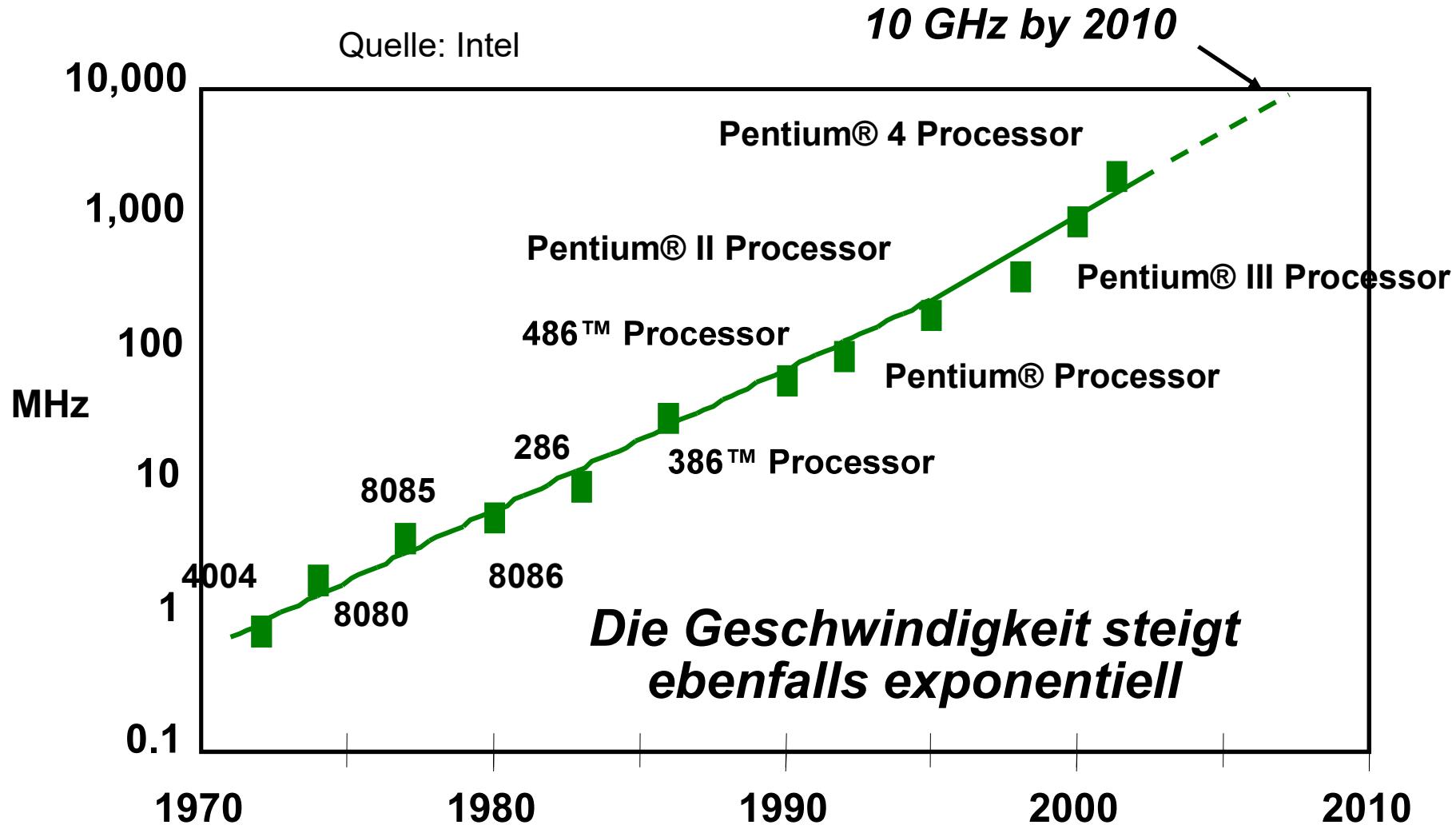


## Skalierungsregeln ( $S < K < 1$ )

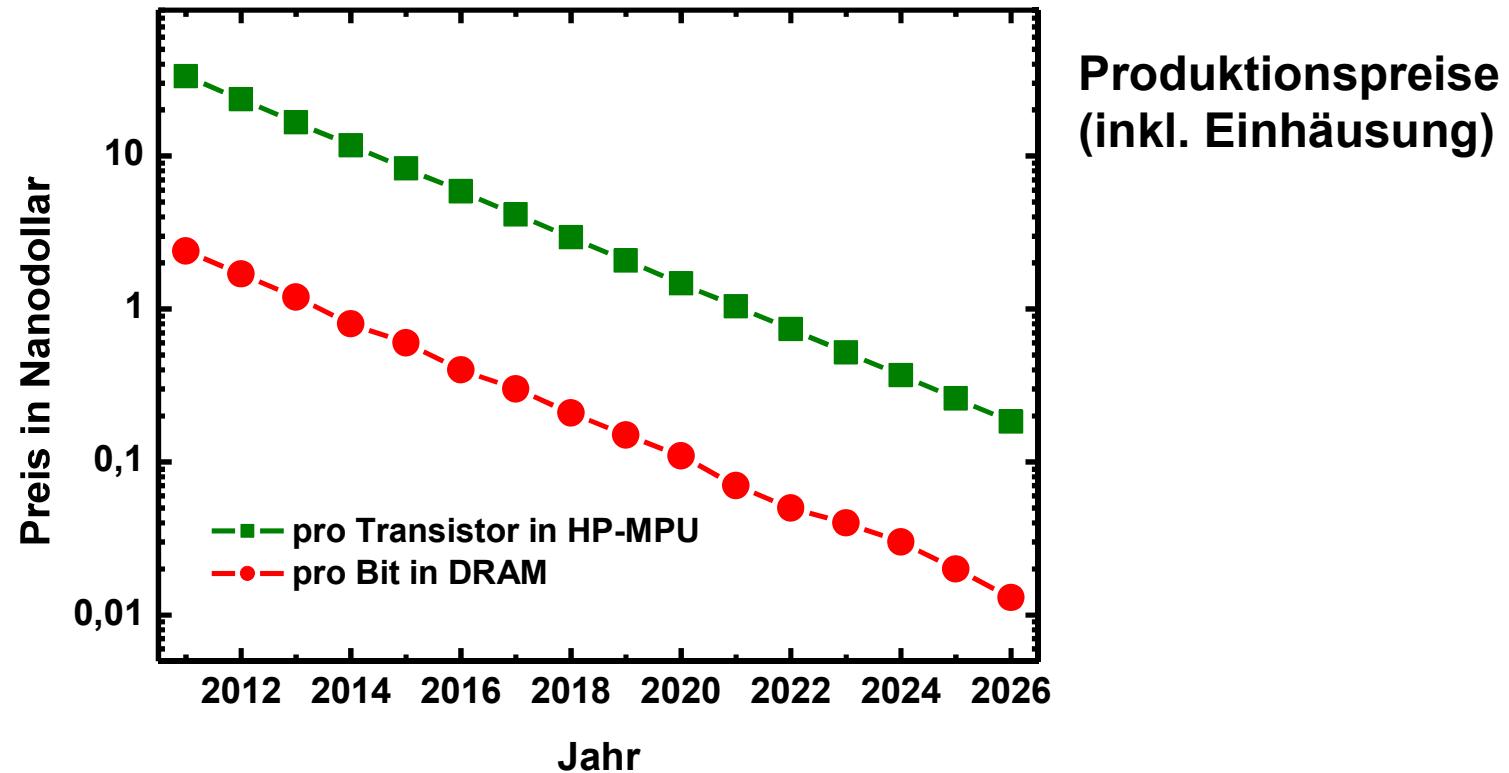
---

Parameter	Konstante Spannung	Spannung skaliert	Realität
Versorgungsspannung	1	<b>S</b>	<b>K</b>
Kanallänge	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>
Kanalbreite	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>
Gateoxiddicke	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>
Dotierkonzentration	<b>1/S</b>	<b>1/S</b>	<b>1/S</b>
Gate-Kapazität	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>
Gate-Verzögerung	<b>S<sup>2</sup></b>	<b>S</b>	<b>S<sup>2</sup>/K</b>
Leistungsaufnahme	<b>S</b>	<b>S<sup>3</sup></b>	<b>S*K<sup>2</sup></b>

## Expon. Zunahme der Geschwindigkeit



## Mittlere Produktionspreise



Produktionspreise  
(inkl. Einhäusung)

**Der Preis der Transistoren fällt gleichzeitig exponentiell**

ITRS Roadmap 2011



OrakeIn?

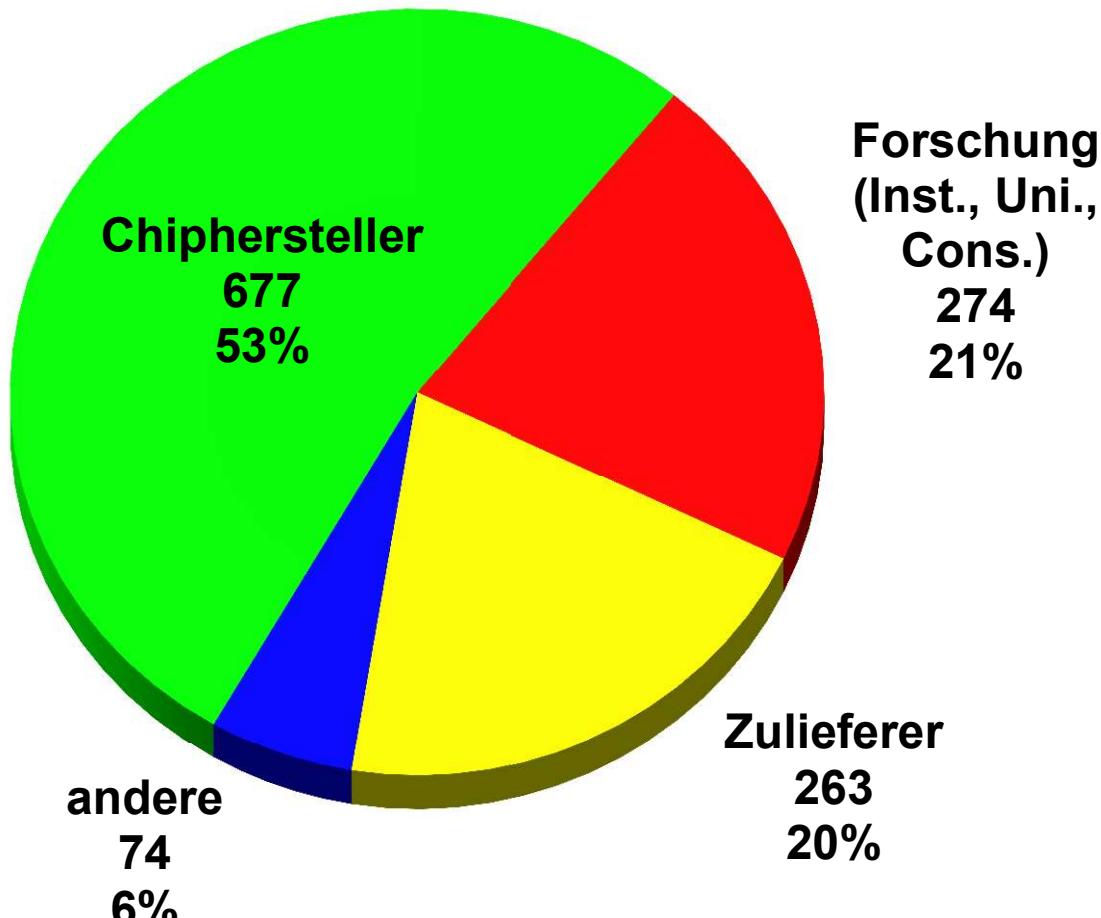
**International Technology  
Roadmap for Semiconductors**



[www.itrs.net](http://www.itrs.net)

## Das ITRS Consortium: Herkunft

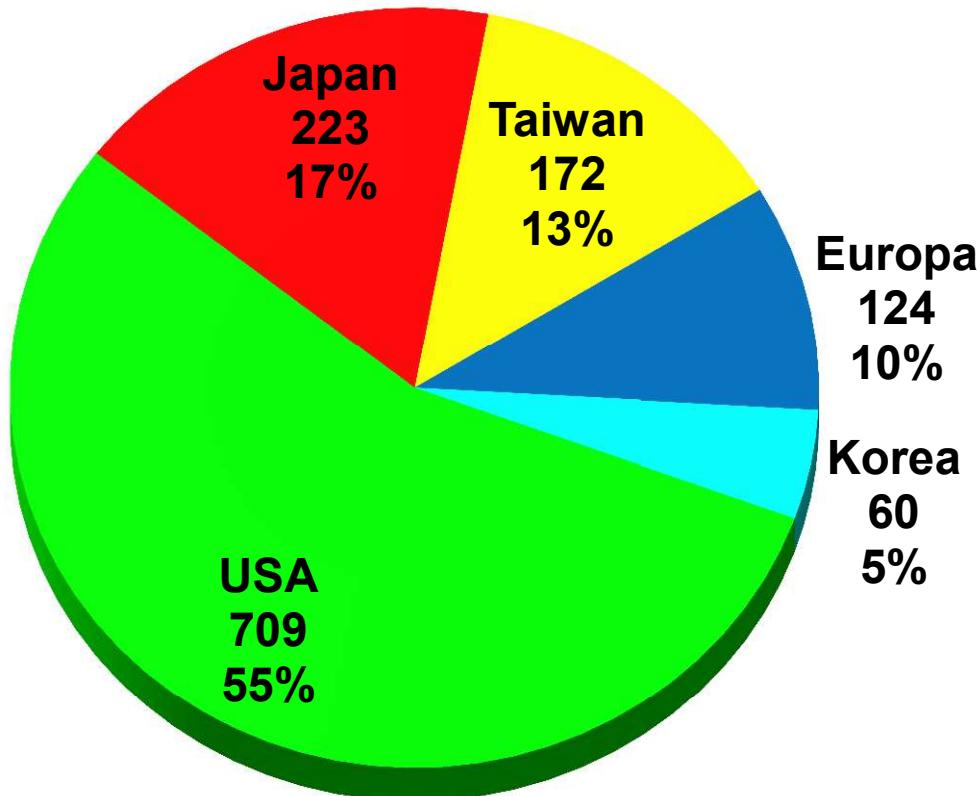
Aktuelle Zusammensetzung: 1288 Mitglieder



[www.itrs.net](http://www.itrs.net)

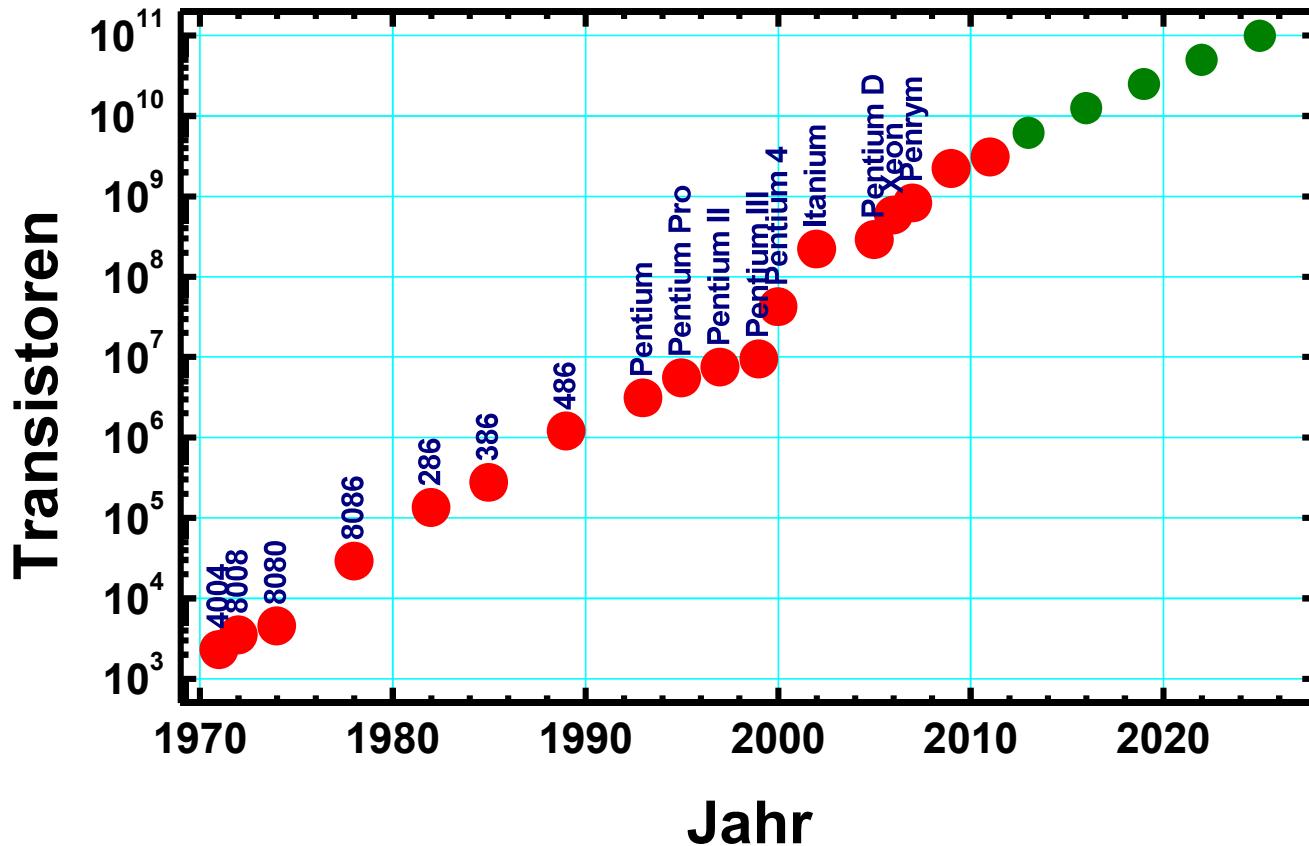
## Das ITRS Consortium: Regional

Heute: 1288 Mitglieder



[www.itrs.net](http://www.itrs.net)

## Moore's Gesetz geht weiter...



ITRS Roadmap 2011

## Die ITRS Roadmap (bis 2013)

---

- Erscheint alle zwei Jahre (ungerade Jahreszahlen)  
Dazwischen gibt es Updates
- Trifft detaillierte Vorhersagen für die evolutionäre Weiterentwicklung,  
basierend auf den Skalierungsregeln
- Wichtig für:  
Technologieentwickler  
Anlagenproduzenten  
Reinraumentwickler  
Waferhersteller  
Hersteller von Verbrauchsmaterialien (Gase, Chemikalien usw.)
- Definiert Forschungsfelder  
**ACHTUNG:** Revolutionäre Veränderungen können in der Roadmap nicht vorhergesagt werden  
→ Konsequenzen für Forschungsförderung



## ITRS Roadmap (Beispiel aus 12/2013)

Year of production	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027
<b>High performance logic</b>								
Equivalent oxide thickness (nm)	0,80	0,73	0,67	0,61	0,56	0,51	0,47	0,43
Dielectric constant $K$ of gate dielectric	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5
Physical gate oxide thickness (nm)	2,56	2,53	2,49	2,42	2,37	2,29	2,23	2,15

*Manufacturable solutions exist, and are being optimized*

*Manufacturable solutions are known, R&D is needed*

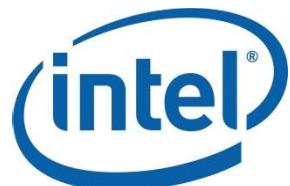
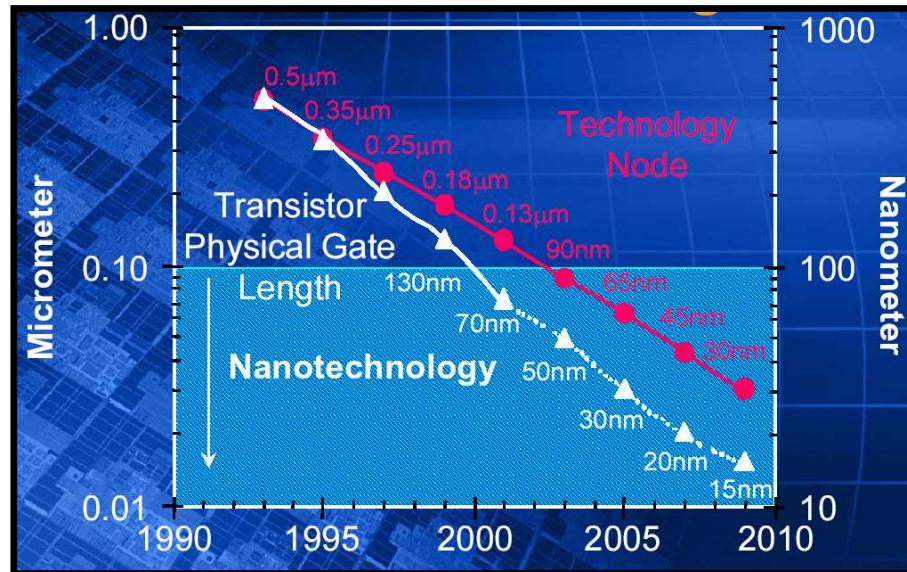
*Manufacturable solutions are NOT known*

## Die „Rote Mauer“ der Mikroelektronik

Year of production	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027
<b>High performance logic</b>								
Equivalent oxide thickness (nm)	0,80	0,73	0,67	0,61	0,56	0,51	0,47	0,43
Dielectric constant $K$ of gate dielectric	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5
Physical gate oxide thickness (nm)	2,56	2,53	2,49	2,42	2,37	2,29	2,23	2,15

- Es sieht aus, als ob die Entwicklung zum Ende kommt
- Die Rote Mauer ist nichts Neues, es gab sie immer 5 – 10 Jahre voraus
- Ziel: sie weiter nach hinten zu verschieben
- Revolutionäre Veränderungen werden in der Roadmap nicht berücksichtigt

## Von der Mikro- zur Nanoelektronik



unter 100 nm ist Nanoelektronik

Äquivalent skalieren (sub-100 nm Bereich):

- konventionelle Konzepte

**ABER**

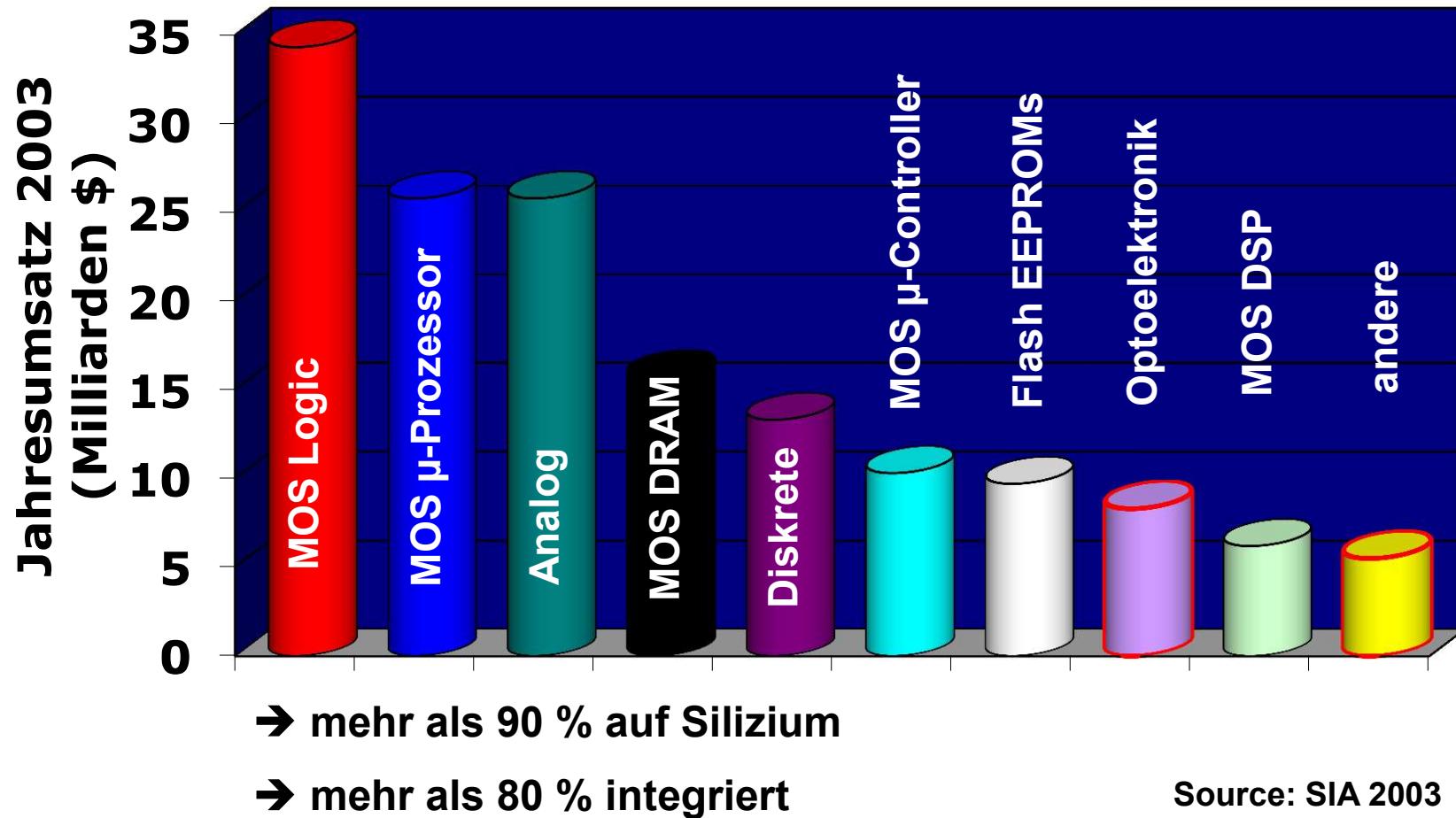
- modifizierte Materialien

**Beispiele für äquivalent skalieren  
(sub-100 nm Bereich, konventionelle  
Konzepte, modifizierte Materialien)**

- SiGe(:C)-Heterojunction Bipolartransistor
- Kupfer statt Aluminium
- High-*K* Dielektrika
- Low-*K* Dielektrika
- verspanntes (*strained*) Silicon
- SiGe-MOSFET

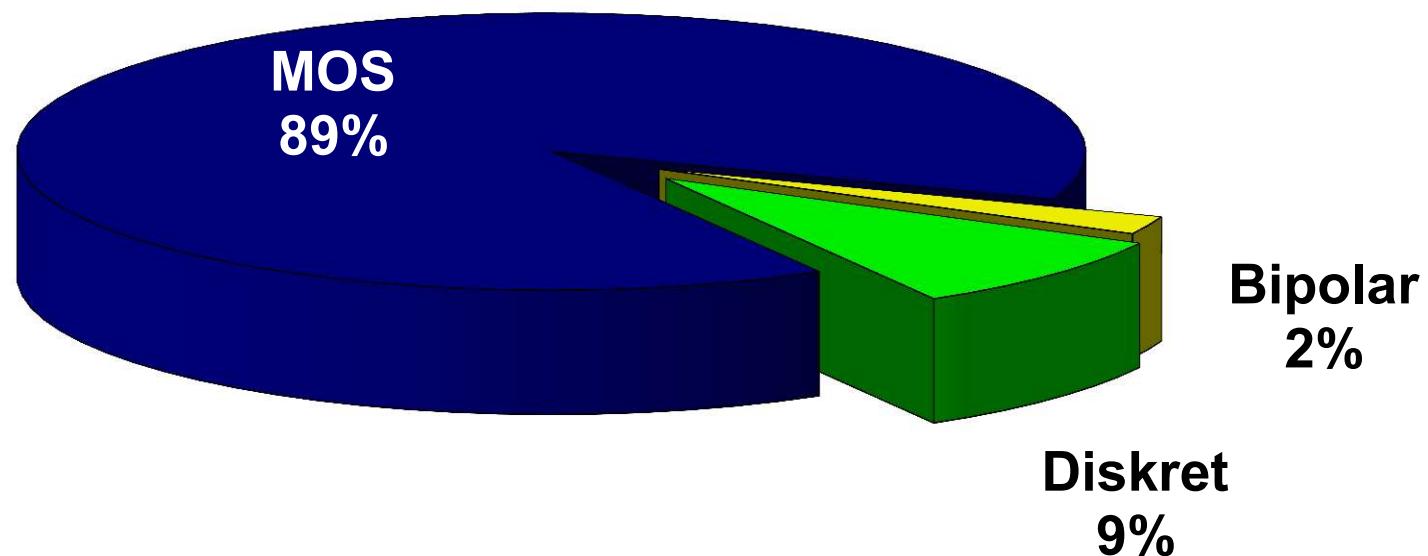
## Dominierende Technologien

Gesamtmarkt 2003: 154.9 Milliarden \$



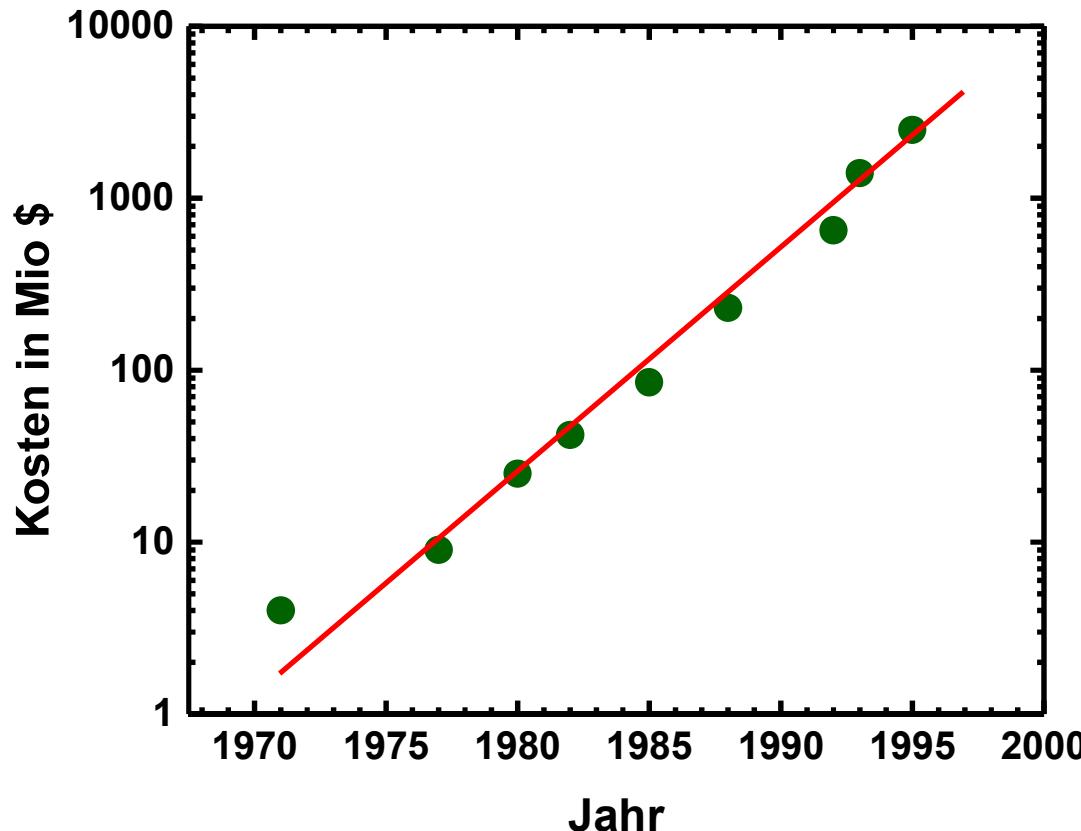
## Silizium-Elektronik heute

8"-äquivalent Si-Waferstarts IV.Q/2010



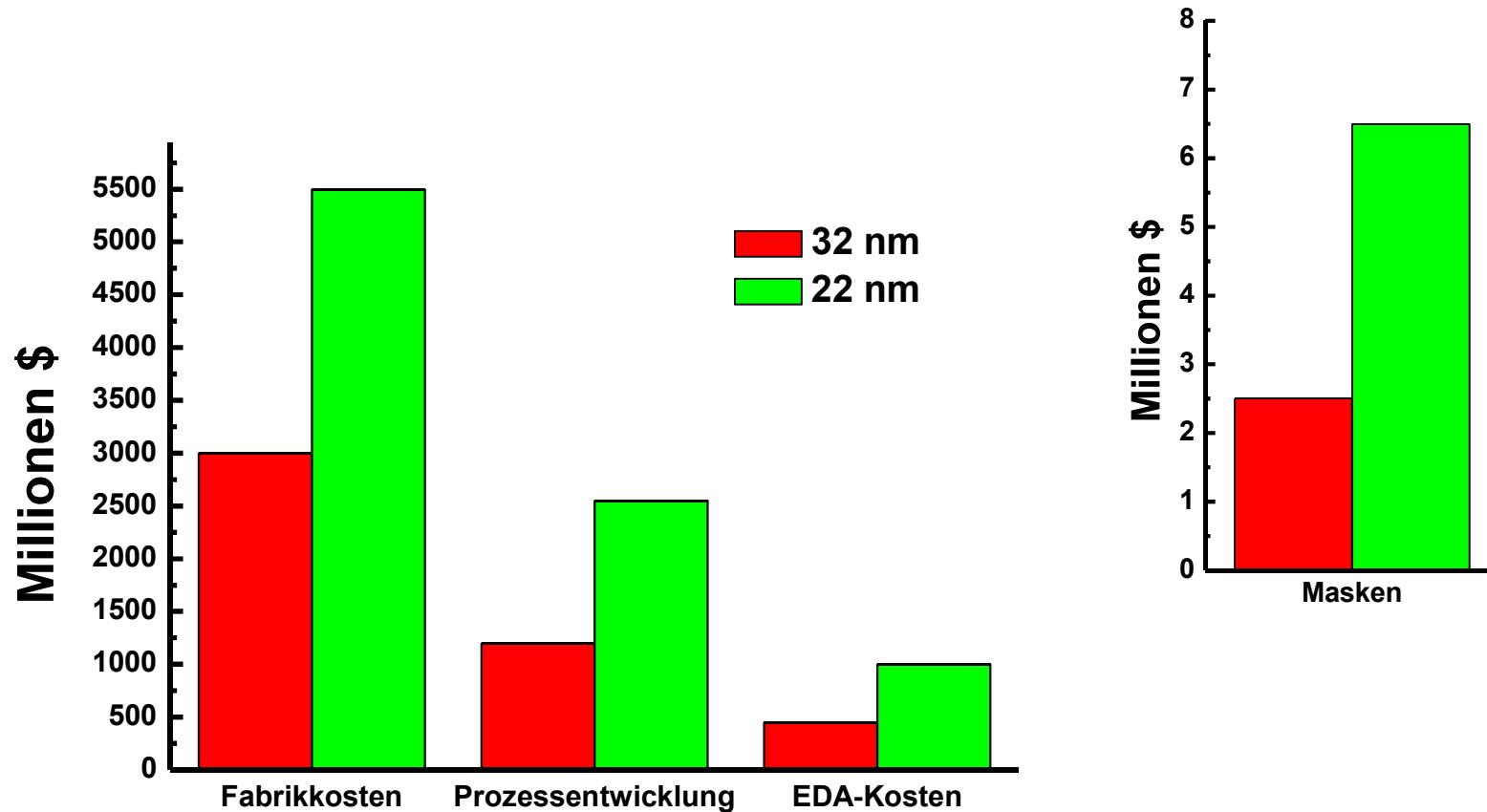
Quelle: SICAS

## Kosten einer Chipfabrik



**Die Kosten einer Chipfabrik verdoppeln sich alle 3 Jahre  
("zweites Moore'sches Gesetz")**

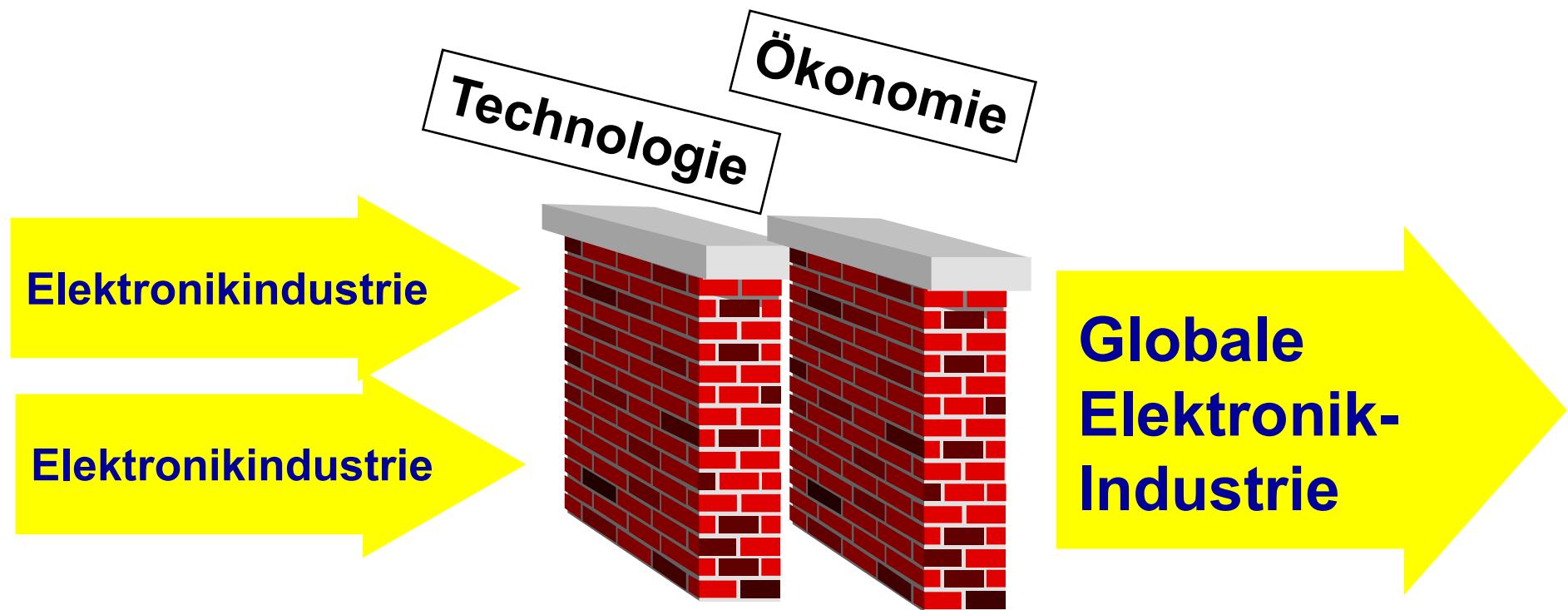
## Technologiekosten: ein Beispiel



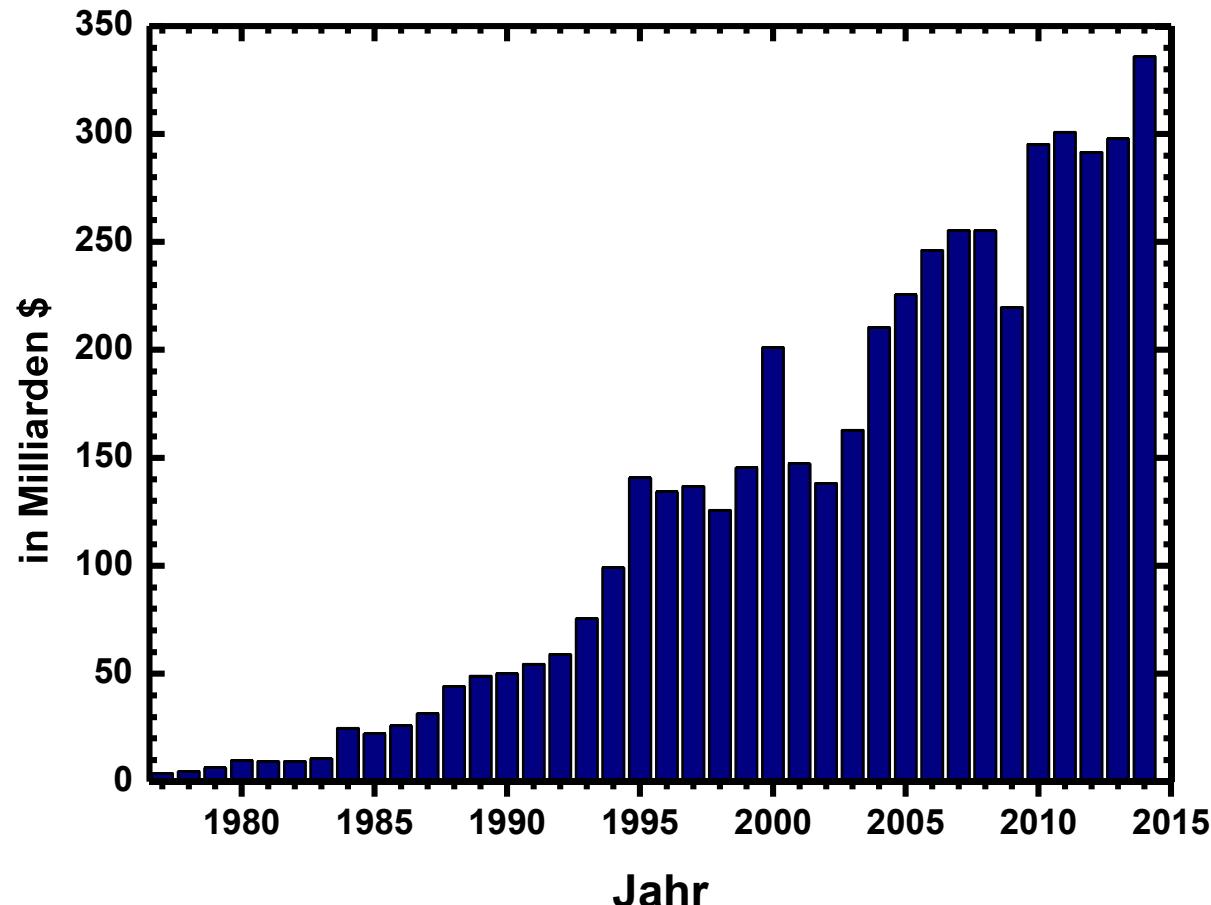
Quelle: IBS Mai 2011

90er Jahre

21. Jahrhundert

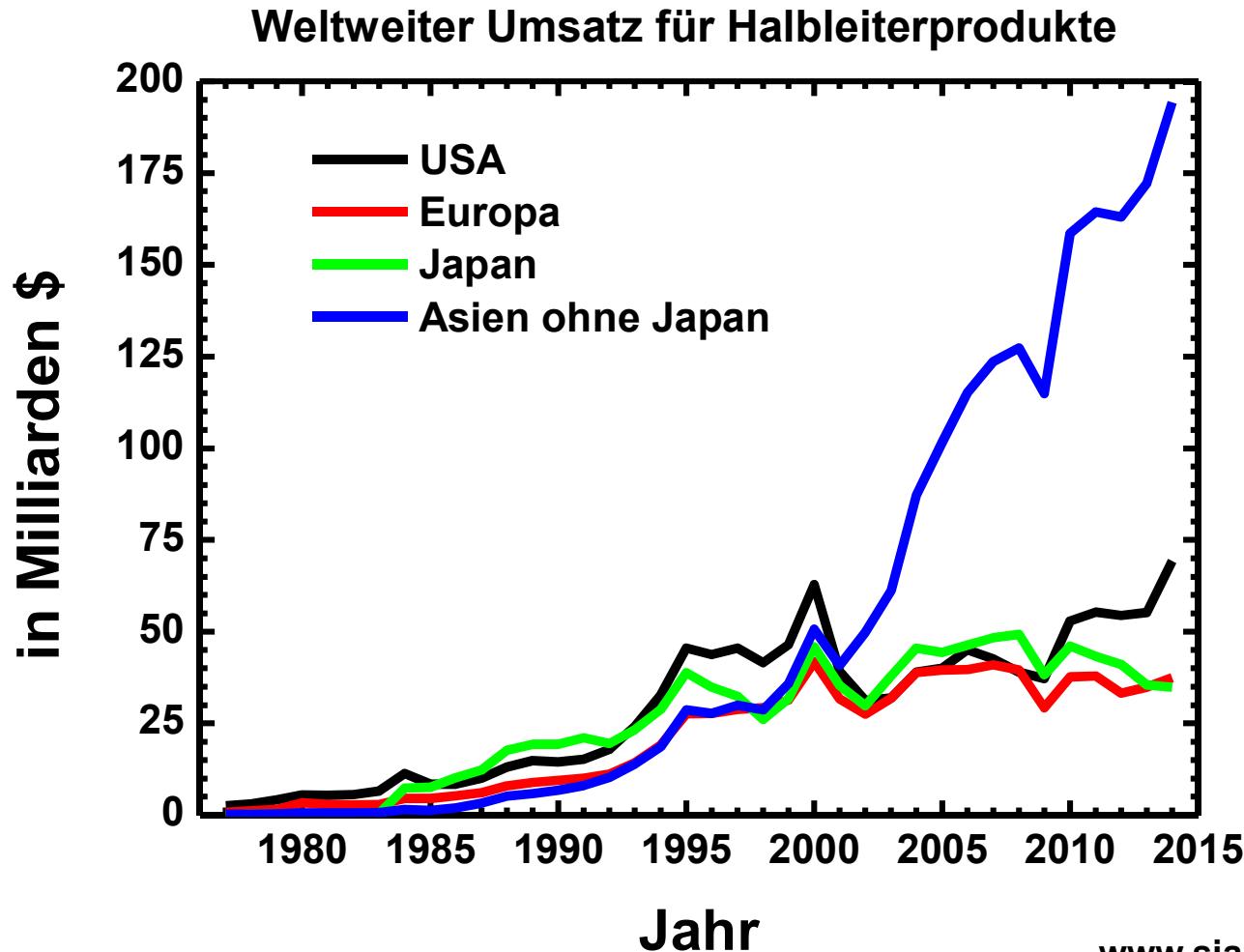


## Weltweiter Umsatz an Si-Halbleiterprodukten



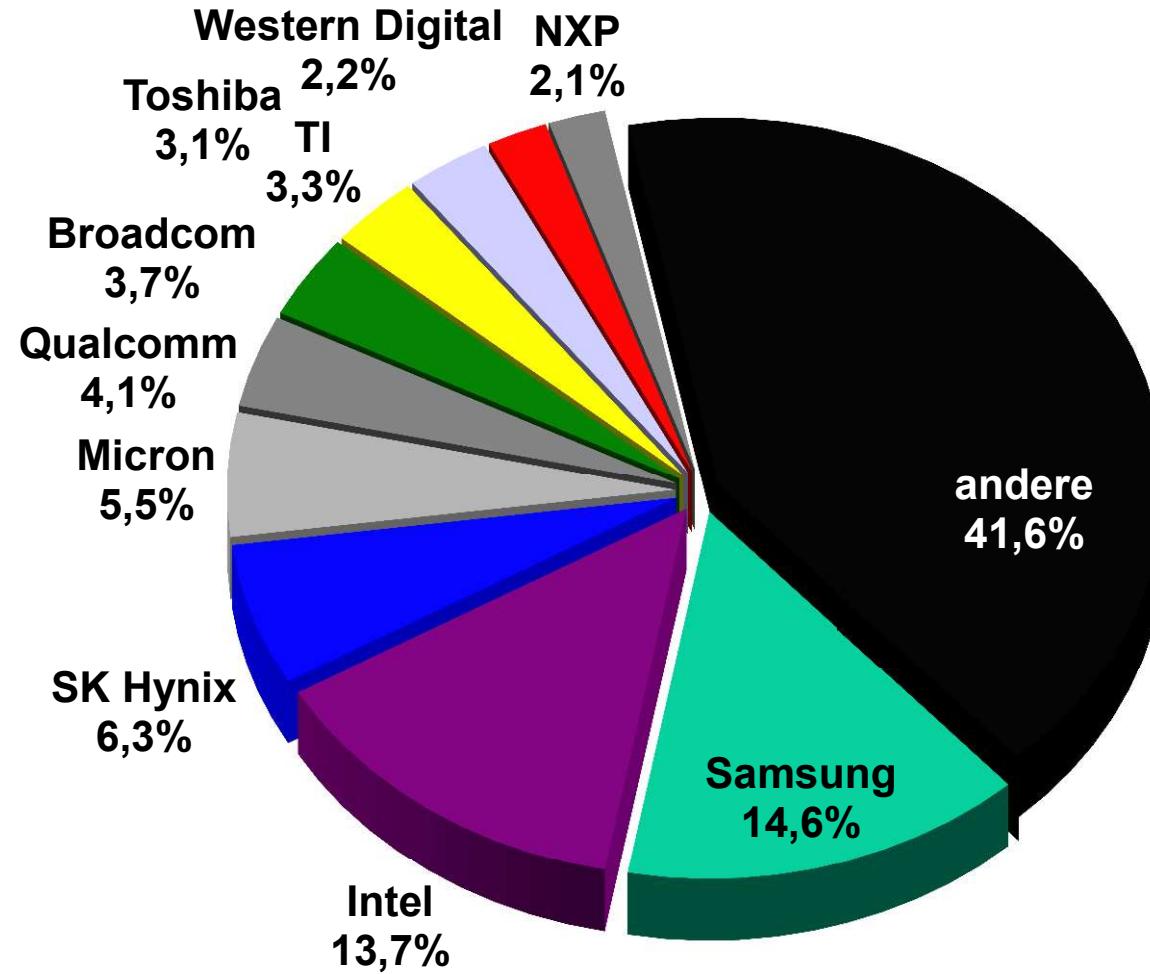
[www.sia-online.org](http://www.sia-online.org)

## Taiwan, Korea und China sind im Kommen



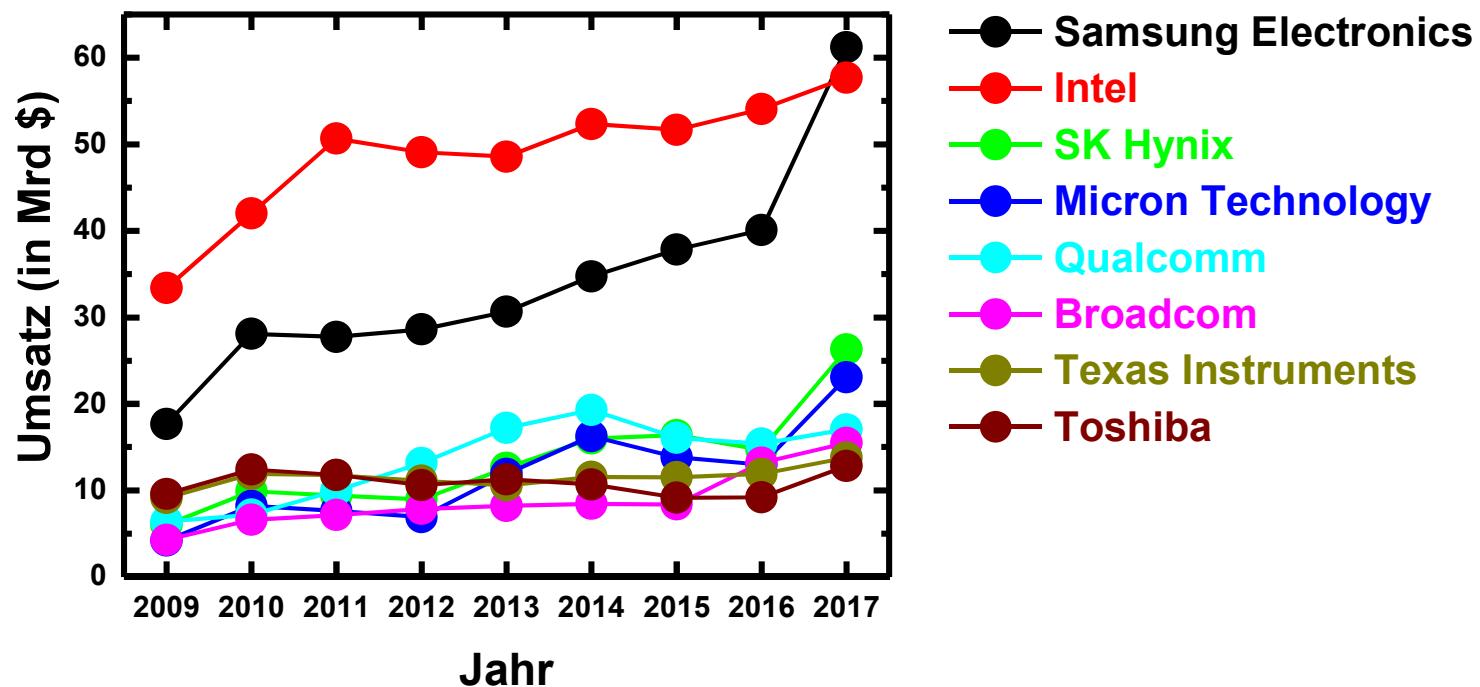
[www.sia-online.org](http://www.sia-online.org)

## Chipherstellung 2017: Umsätze (410 Mrd \$)



Quelle: Gartner

## Top 8: Entwicklung der letzten Jahre



→ 2017 hat **Samsung Electronics** Intel an der Spitze abgelöst!

Quelle: Gartner

# Die größten Chiphersteller der Welt 2017

---

## 1. Samsung Electronics

Samsung Electronics ist der weltweit größte Hersteller von Speicherchips (DRAM- und NAND-Speicher).

Mobile-Chips (Samsung Exynos Reihe) kommen nicht nur in den eigenen Smartphone-Produkten zum Einsatz, sondern auch in Telefonen anderer Hersteller (Meizu, Lenovo).

Samsung-Chips sind ferner auch in Datenzentren und Smart TV-Fernsehern zu finden.

Eine große Zukunft sieht Samsung in der Entwicklung von 3D NAND-Speichern.

## 2. Intel

Intel stand seit 24 Jahren ununterbrochen an der Spitze der Top 10 der weltgrößten Chip-Hersteller. Der Chippgiant kontrolliert mehr als 80% des Marktes für PC-Chips und mehr als 95% des Marktes für Server-Chips, die auf PC-Chips basieren.

Allerdings bekam die Wachstumsstory von Intel zuletzt deutliche Kratzer, nachdem Intel den Trend zu Mobile-Chips verschlafen hatte und Konkurrenten den Vortritt lassen musste.

## Die größten Chiphersteller der Welt 2017

---

### 3. SK Hynix

Die in Südkorea ansässige SK Hynix ging im Jahr 2011 durch die Fusion von SK Telecom und des koreanischen Speicherchip-Herstellers Hynix Semiconductor hervor.

Die Koreaner beliefern mit ihren Speicherchips unter anderem Apple und gelten hinter Samsung als die Nummer 2 unter den weltgrößten Herstellern von Speicherchips.

### 4. Micron Technology

Die im Jahr 1978 in Boise/Idaho USA gegründete Micron Technology ist nach Samsung und SK Hynix der drittgrößte Hersteller von Speicherchips (DRAM- und NAND-Speicher).

Micron hatte die Konsolidierung in der Halbleiterbranche in den letzten Jahren selbst für Zukäufe genutzt und die Speicherchip-Spezialisten Elpida und Inotera Memories übernommen.

## Die größten Chiphersteller der Welt 2017

---

### 5. Qualcomm

Die in San Diego ansässige Qualcomm gilt als der weltweit führende Hersteller von Mobile-Chips. Da Qualcomm mit seinen Snapdragon-Chips führende Smartphone-Hersteller wie Samsung, HTC, Sony und LG beliefert, hatte der amerikanische Chip-Hersteller zuletzt mit Gegenwind zu kämpfen. Durch die Übernahme von Atheros Communications avancierte Qualcomm auch zum führenden Anbieter von WLAN-Chips.

### 6. Broadcom

Es war die bislang größte Fusion in der Chip-Branche überhaupt. Der US-Chiphersteller Avago hat den Rivalen Broadcom im Jahr 2015 für 37 Mrd. US-\$ übernommen. Dadurch entstand ein neuer Chip-Gigant.

Besonders lukrativ für Avago: Broadcom beliefert als Breitband-Chipspezialist Industriegrößen wie Apple und Samsung.

## Die größten Chiphersteller der Welt 2017

---

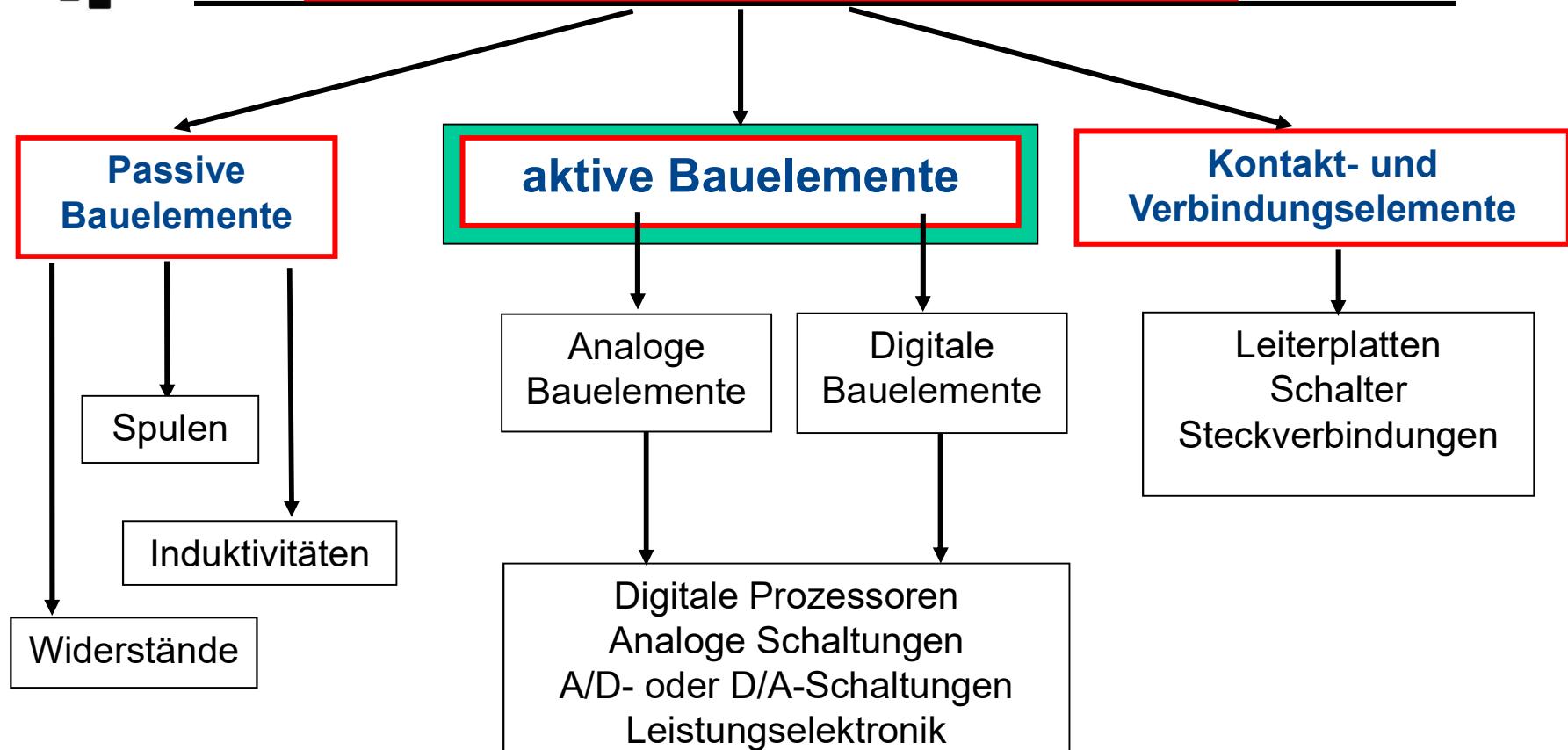
### 7. Texas Instruments (TI)

Der in Dallas/Texas ansässige Halbleiterkonzern Texas Instruments war einst der größte Mobile-Chiphersteller. Inzwischen ist das im Jahr 1930 gegründete Unternehmen nur noch die Nummer 2 in diesem Bereich hinter Qualcomm, aber nach wie vor der größte Hersteller von sogenannten Digital Signalprozessoren (DSP) und analogen Halbleitern. Darüber hinaus bietet TI auch Digital-Light-Processing-Chips (DLP) an, die zum Beispiel in Projektoren zum Einsatz kommen.

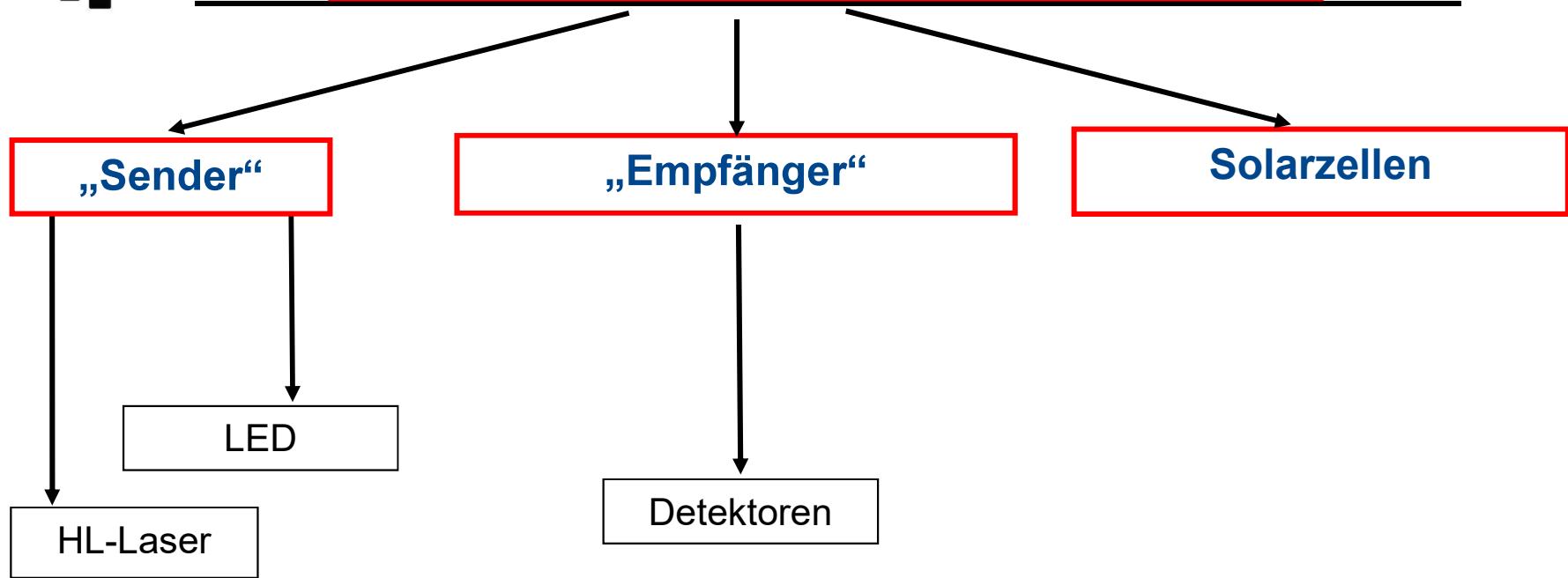
### 8. Toshiba

Toshiba ist eines der ältesten Konzerne Japans. Das 140 Jahre alte Unternehmen mit Sitz in Tokio stellt nicht nur Elektronikgeräte (Laptops) her, sondern auch Halbleiter und insbesondere Flash-Speicherchips. Allerdings ist der Umsatz der Halbleiterparte von Toshiba seit 2010 rückläufig.

# Elektronische Bauelemente



# Optoelektronische Bauelemente



Optische Signale  $\longleftrightarrow$  elektrische Signale

## Die wichtigsten Halbleiterbauelemente

---

- Diode

Eine moderne Diode ist ein Halbleiter, der in eine Richtung einen äußerst geringen Widerstand bietet, in der anderen Richtung dafür einen äußerst hohen.

→ der Strom kann die Diode nur in einer Richtung passieren

Vakuumdioden (Röhrendioden) finden nur noch bei hohen Spannungen und Stromstärken Anwendung  
(→ Leistungselektronik).

# Die wichtigsten Halbleiterbauelemente

---

- **Transistor**

Durch das Anlegen einer kleinen Spannung an einer Trennschicht kann der Stromfluß zwischen zwei anderen Polen gesteuert werden.

- **Thyristor, Triac**

Ein Thyristor funktioniert nach demselben Prinzip wie der Transistor und dient zum Schalten starker elektrischer Ströme; hier hat er weitgehend das Relais und den Schütz ersetzt.

Mit einer Spezialform des Thyristors, dem Triac, werden Wechselströme geschaltet.

# Die wichtigsten Halbleiterbauelemente

---

- **Leuchtdiode (LED)**

Sie dient zur Anzeige bei verschiedenen Geräten, darunter Steuerungen, Uhren und Zähler aller Art.  
Zunehmend auch als Beleuchtungsmittel im Einsatz.

- **Photodiode und Phototransistor**

nutzen den photoelektrischen Effekt und lassen in Sperrrichtung einen Strom nur fließen, wenn Licht auf sie auftrifft.

Dies kann auch Licht außerhalb des sichtbaren Bereichs sein (z.B. bei Lichtschranken und Abtastvorrichtungen)

finden z.B. auch als Photoelemente zur Bestimmung der Lichtstärke in der Photographie und beim Film Anwendung.

Bei den Digitalkameras liegt dasselbe Prinzip zugrunde, hier wird das Bild von einem so genannten CCD-Chip in elektrische Signale umgewandelt.

# Die wichtigsten Halbleiterbauelemente

---

- **Solarzelle**

Auch hier findet das Prinzip der Photodiode Anwendung

Es wird jedoch nicht ein Strom mit Hilfe des einfallenden Lichts geschaltet, sondern erzeugt.

- **Detektoren für Strahlung**

werden zur Messung und zum Nachweis von radioaktiver Strahlung verwendet und basieren ebenfalls auf dem Prinzip der Photodiode.

Sie sind aber durch besondere Halbleitermaterialien vor allem bei den hier auftretenden kürzeren Wellenlängen empfindlich.

## Die wichtigsten Halbleiterbauelemente

---

- **Sensoren, z.B. Temperatursensoren**

Da die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern von der Temperatur abhängt, kann mit einem solchen Thermoelement die Temperatur gemessen werden.
- **Peltier-Element (Kühlelement)**

beruht auf dem Peltier-Effekt.  
besteht darin, dass ein Stromfluss durch zwei Lötstellen, die zwei verschiedene Materialien miteinander verbinden, eine Abkühlung der einen und eine Erwärmung der anderen bewirkt.  
Wegen der sehr geringen Kühlleistung werden Peltier-Elemente nur für Spezialzwecke eingesetzt.
- **Piezo-Diode und -Transistor**

Mit Hilfe des piezoelektrischen Effektes können mechanische Einwirkungen von Kräften in elektrische Signale umgewandelt werden.

12. 4.	Einführung	07. 6.	Speicherzellen
19. 4.	Halbleitermaterial Si	14. 6.	pn-Übergang/-Diode
26. 4.	Bandstruktur von HL'n	21. 6.	Solarzellen
03. 5.	Ladungsträger in HL'n	28. 6.	Bipolartransistoren
10. 5.	fällt aus ( <i>Himmelfahrt</i> )	05. 7.	Verbindungshalbleiter
17. 5.	Ladungsträgerdynamik	12. 7.	Silizium-Technologie
24. 5.	fällt aus ( <i>Pfingsten</i> )	19. 7.	Elektronik der Zukunft
31. 5.	Feldeffekttransistoren		

Do, 11:15 – 12: 45, Multimedia-Hörsaal, Gebäude 3703

**Vorlesungsunterlagen auf Stud.IP: 1Folie/Seite und 6 Folien/Seite**

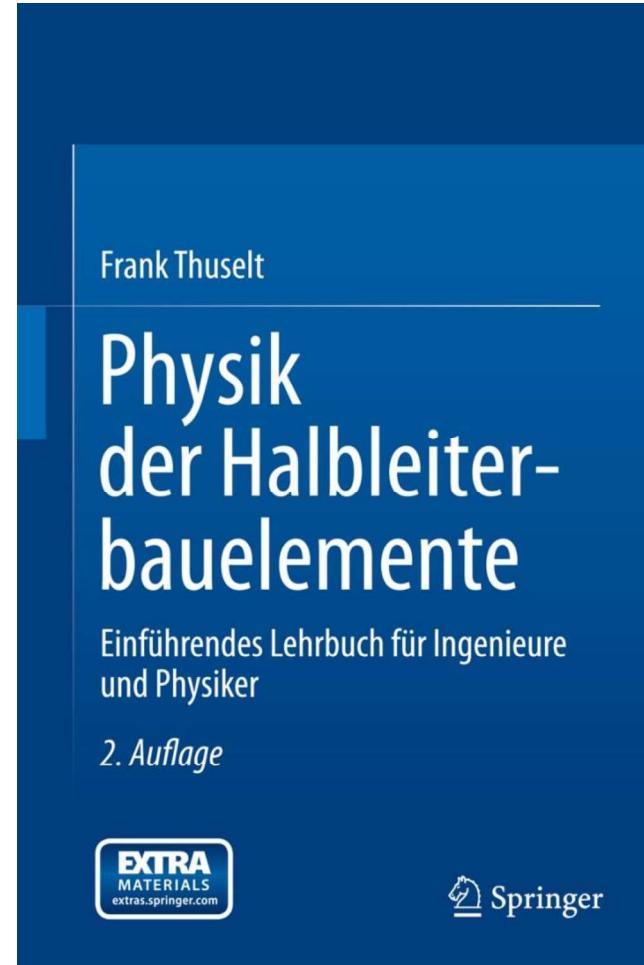
## Übung: für Studierende der Nanotechnologie

---

- findet 14 täglich statt  
**Erster Termin wird angesagt**
- Teilnahme der E-Technik-Studierenden ist möglich
- Leitung/Durchführung: Oliver Kerker  
**Büro im LNQE-Gebäude**  
**Tel: 16016**  
**Email: [oliver.kerker@lnqe.uni-hannover.de](mailto:oliver.kerker@lnqe.uni-hannover.de)**
- **Terminvorschlag: dienstags 16:00 – 17:30**

---

F. Thuselt:  
Physik der  
Halbleiterbauelemente,  
Einführendes Lehrbuch für  
Ingenieure und Physiker,  
Springer 2005, 2. Auflage 2011  
ISBN 978-3-642-20031-1



## Literaturempfehlungen

---

- F. Thuselt:  
Physik der Halbleiterbauelemente, Einführendes Lehrbuch für Ingenieure und Physiker, Springer 2005, 2. Auflage 2011
- S.M. Sze:  
Semiconductor Devices, Physics and Technology,  
2nd Edition, John Wiley&Son, 2002.
- K.R. Hofmann:  
Skript zur Vorlesung Halbleiterelektronik I
- M. Reisch:  
Halbleiter-Bauelemente, Springer, 2007
- H.-G. Wagemann und T. Schönauer: Silizium-Planartechnologie,  
Grundprozesse, Physik und Bauelemente  
aus der Reihe: Teubner Studienbücher Physik, 2003
- R. Müller:  
Grundlagen der Halbleiterelektronik, Springer 1991  
Bauelemente der Halbleiterelektronik, Springer 1991
- H.-G. Wagemann:  
Grundlagen der optoelektronischen Halbleiterbauelemente, Teubner, 1998
- W. Bludau:  
Halbleiter-Optoelektronik: die physikalischen Grundlagen der LED's,  
Diodenlaser und pn-Photodioden, Hanser, 1995