Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Technik der Informationsverarbeitung

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. J. Becker

becker@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (**KIT**)

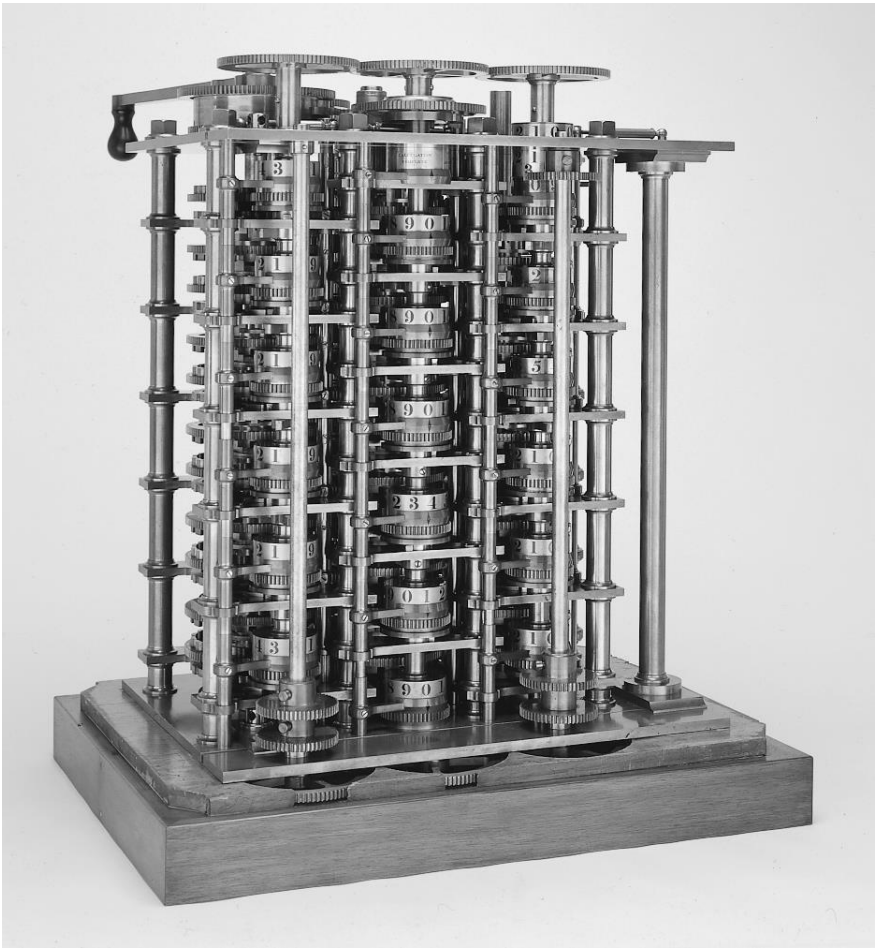
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)

Digitaltechnik

Rechnertechnologieentwicklung

Digitaltechnik – Historie

Der erste Computer …



- Arbeitete nach dem Dezimalsystem zur Basis 10
- Immer noch mechanisch!

Babbage Differenzenrechenmaschine (1832)

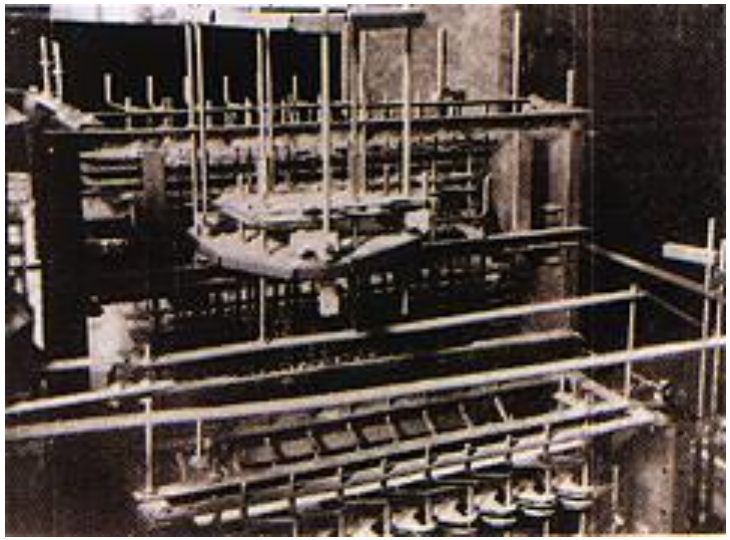
25,000 Teile

Preis: £17,470

Digitaltechnik - Historie

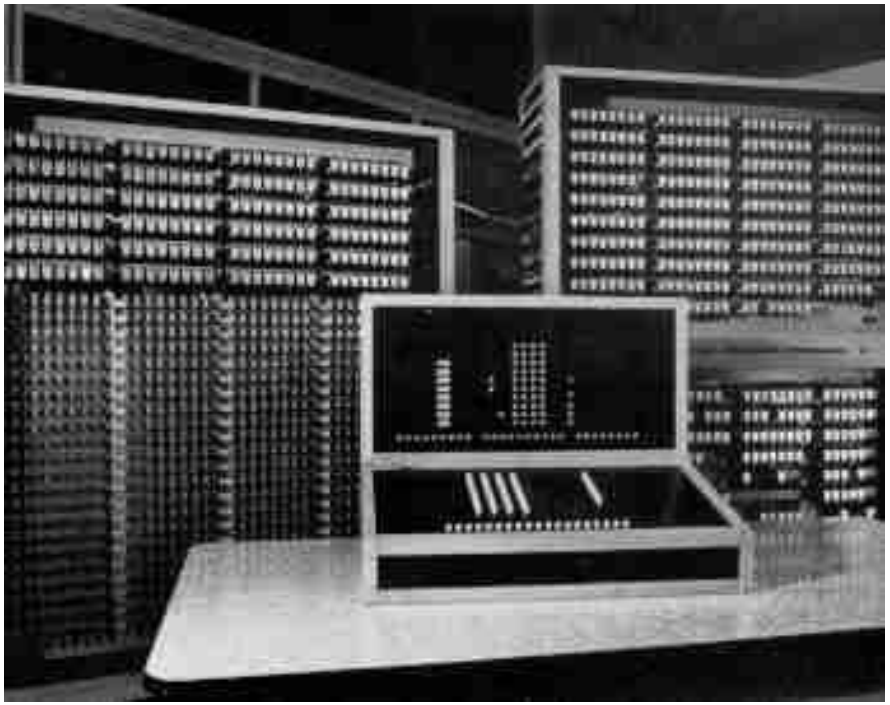
Konrad Zuses Z1 (1936-1938)

- Vollstaendig mechanischer Aufbau
- Erster programmgesteuerter, frei programmierbarer Rechenautomat
- Dualsystem
- Gleitpunktrechenwerk

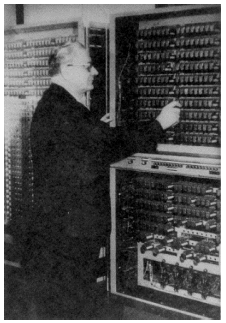


Digitaltechnik - Historie

Konrad Zuses Z3 (1941)

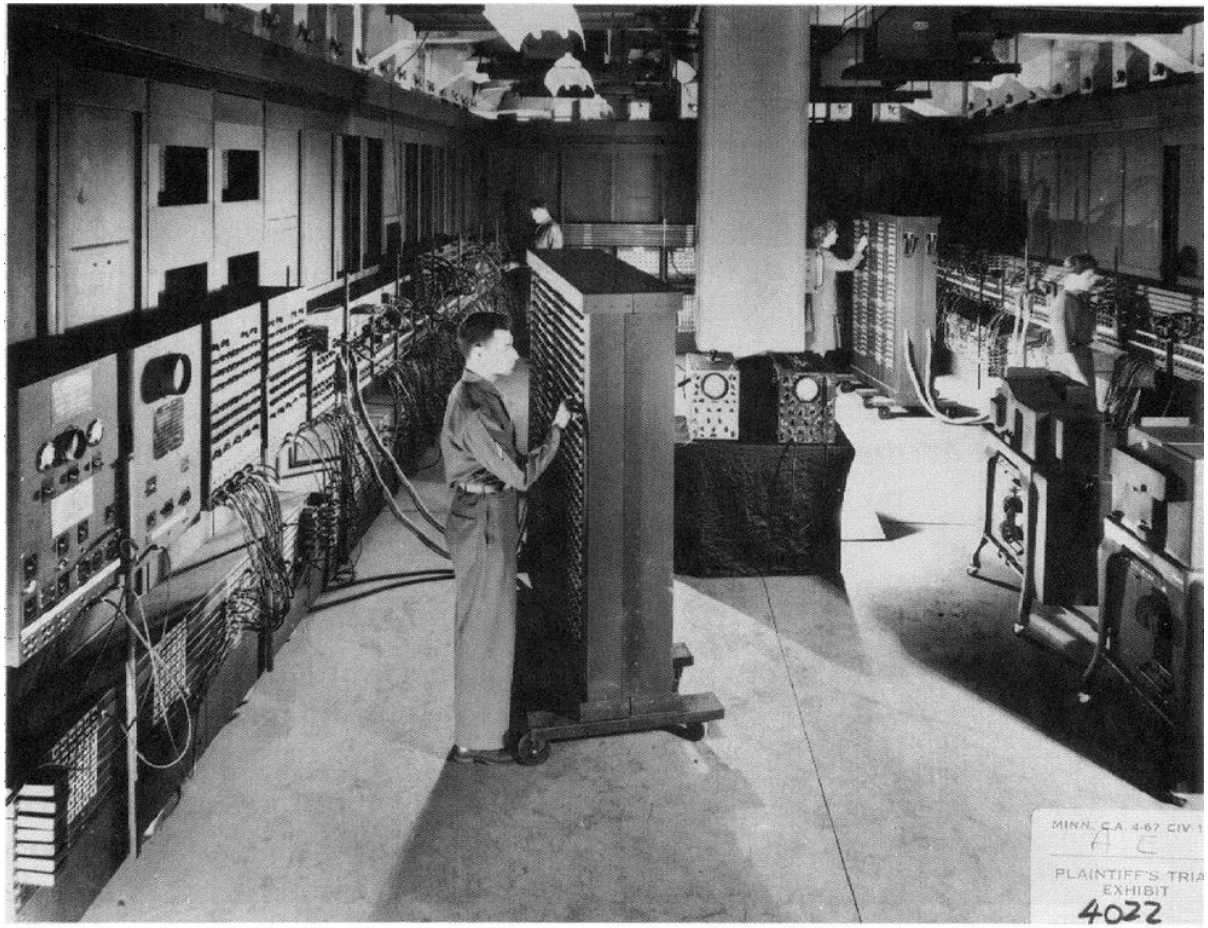


- 600 Relais Rechenwerk
- 1600 Relais im Speicherwerk
- 22 Bit Wortlänge, Floating Point
- 64 Worte Speicherkapazität
- 5 - 10Hz
- Leistungsverbrauch: 4000W
- Gewicht: 1000 kg
- Z3 ist erster programmier-barer elektomechanischer Automat



Digitaltechnik - Historie

ENIAC – Der erste elektronische Rechner (1946)



Digitaltechnik - Historie

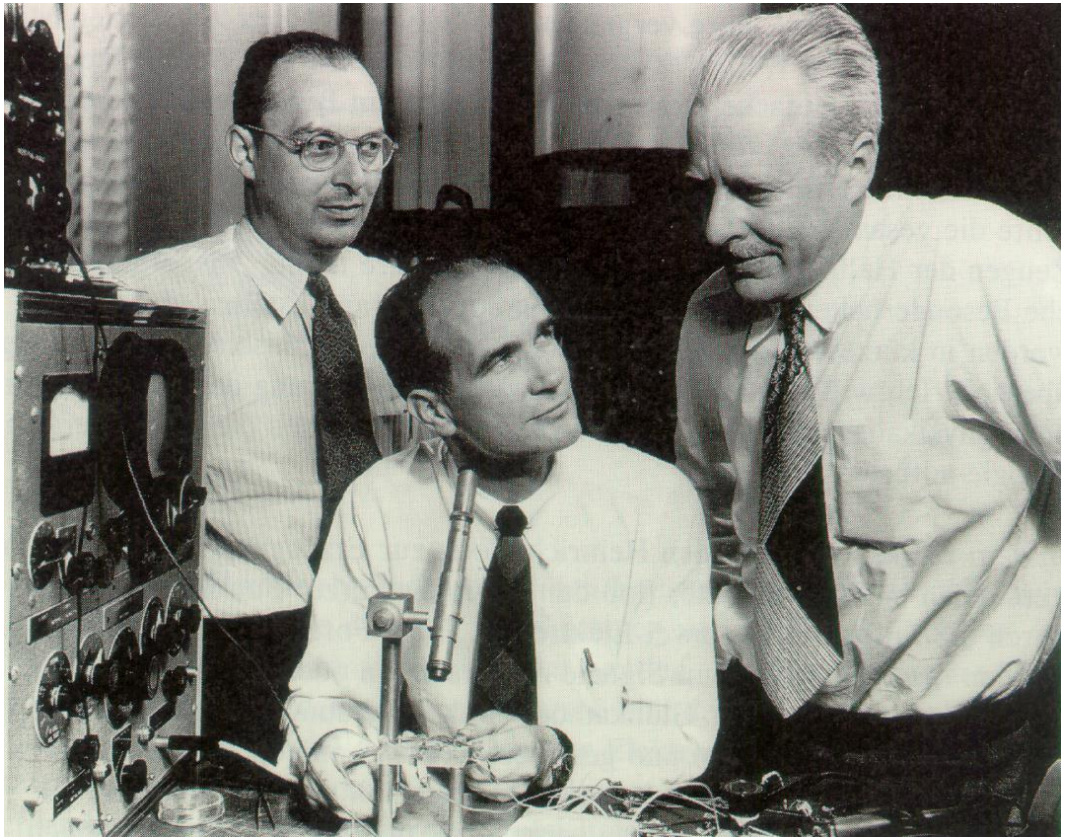
Beginn des Mikroelektronikzeitalters

1947:

Die **Erfindung** des not-
wendigen **0/1-Schalters**,
genannt **Transistor**:

1: Strom an

0: Strom aus



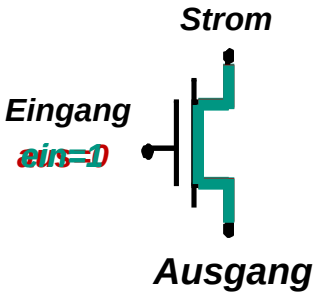
Erfinder:

John Bardeen (links),
Walter Brattain (rechts) und
William Shockley (Mitte)
-> bedeutender Schritt
-> 1956 Nobelpreis

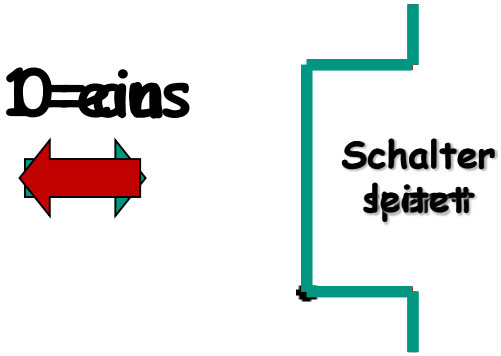
Digitaltechnik - Historie

Meilenstein

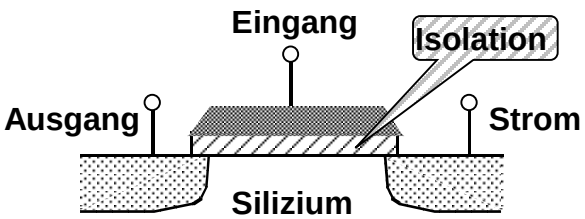
- Der Transistor kann 1951 industriell gefertigt werden (Preis: $ 250,-)
- 1958 wird der flache (planare) hoch-integrierte Mikrochip entwickelt



0/1-Schalter
=
Transistor
(1951)

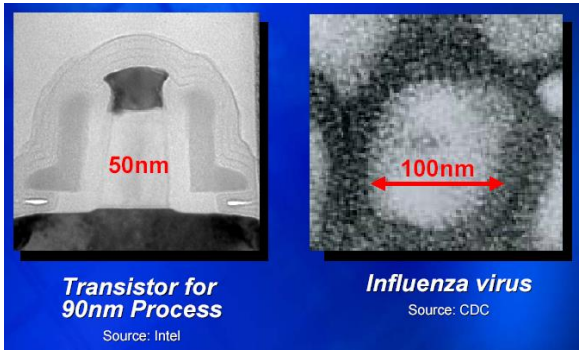


„Flacher" Transistor
aus Halbleitermaterial
(1958)



Heutige Grösse

Grössenvergleich



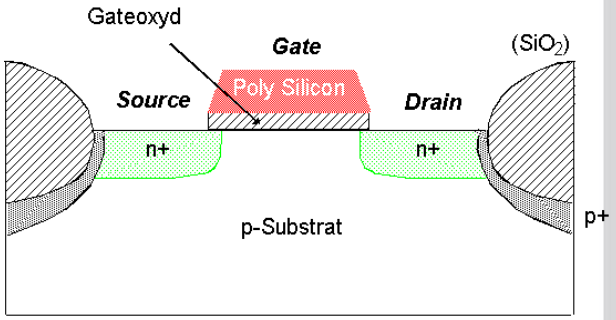
Digitaltechnik - Historie

Beginn des Mikroelektronikzeitalters …

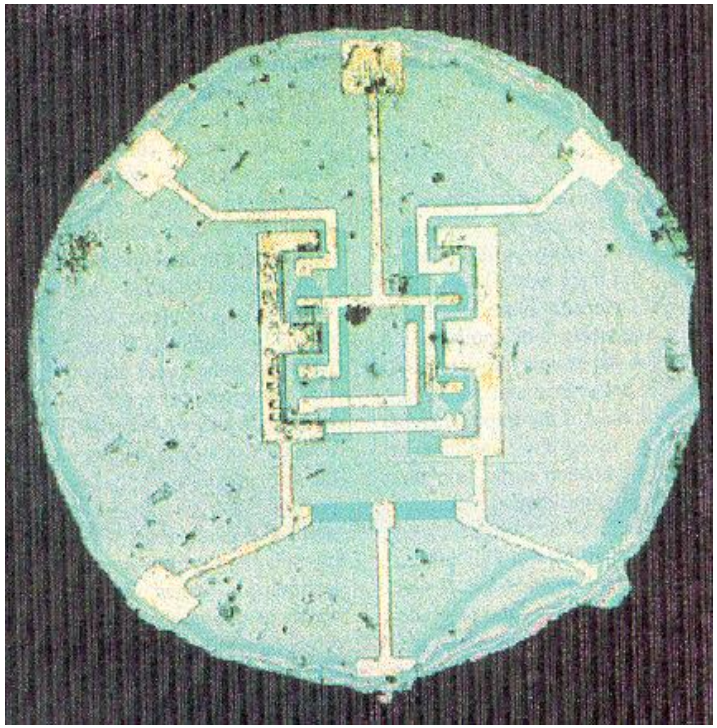
Meilensteine

- Der Bipolartransistor kann 1951 industriell gefertigt werden
- Das erste Transistorradio kommt 1954 auf den Markt
- Texas Instruments (TI) fertigt den ersten Siliziumtransistor (Preis: $ 250,-)
- 1958 wird von Kilby bei TI und von Noyce und Moore bei Fairchild Semiconductor der Integrierte Schaltkreis (IC) nahezu simultan erfunden

  -> Metall-Oxyd-Semiconductor Feld-Effekt Transistor (MOSFET)

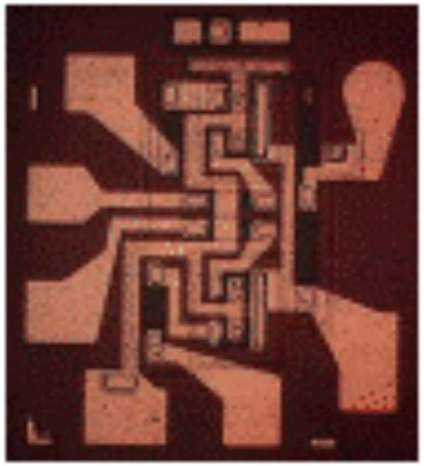


Digitaltechnik - Historie



TI and Fairchild führten 1961 die ersten Logik-ICs auf dem Markt ein (Kosten: ~$ 50,- für Großabnehmer). Es war ein doppeltes Flip-Flop.

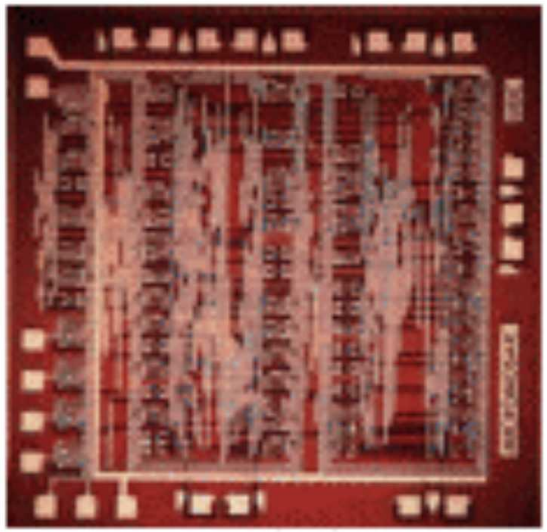
Die Dichte und Ausbeute der Schaltkreise verbessert sich. Dieser Schaltkreis von 1963 hat 4 Flip-Flops.



Digitaltechnik - Historie

Beginn des Mikroelektronikzeitalters …

- 1967 verkauft Fairchild den sogenannten „Semicustom-IC“. Transistoren sind als Spalten angeordnet und lassen sich durch 2 Metallebenen verdrahten. Dieser IC besteht aus ca. 150 logischen Gattern.

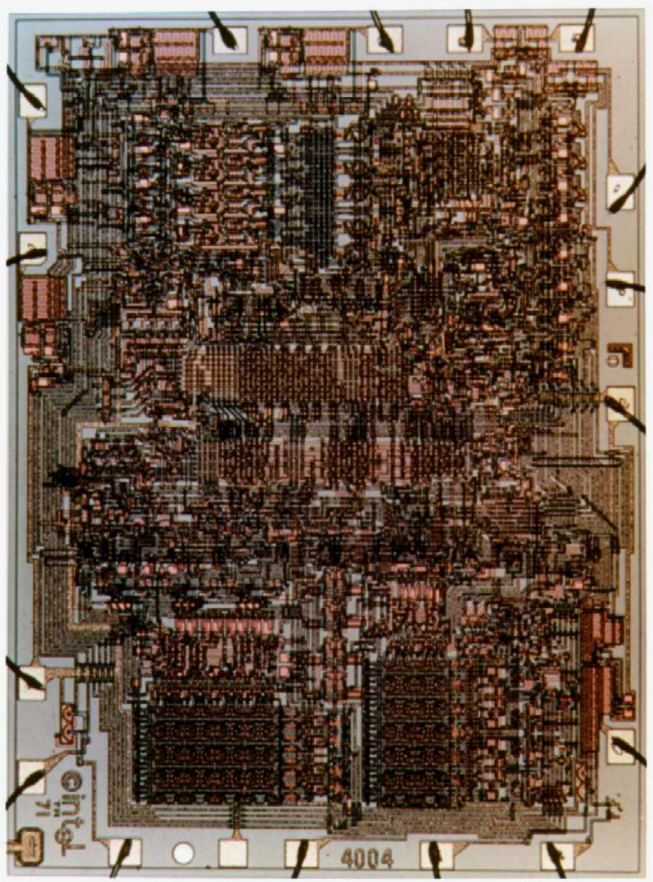


- 1968 verlassen Noyce und Moore Fairchild und gründen Intel.

Digitaltechnik - Historie

Beginn des Mikroelektronikzeitalters …

- 1970 beginnt Intel mit dem Verkauf von 1kbit RAM-ICs.
- 1971 führt Intel den ersten Mikroprozessor ein, den 4004. Er hatte einen 4-bit Bus und eine Taktfrequenz von 108 kHz. Er bestand aus 2300 Transistoren.

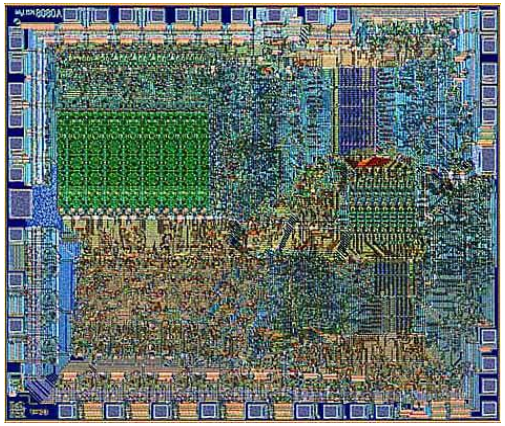


Digitaltechnik - Historie

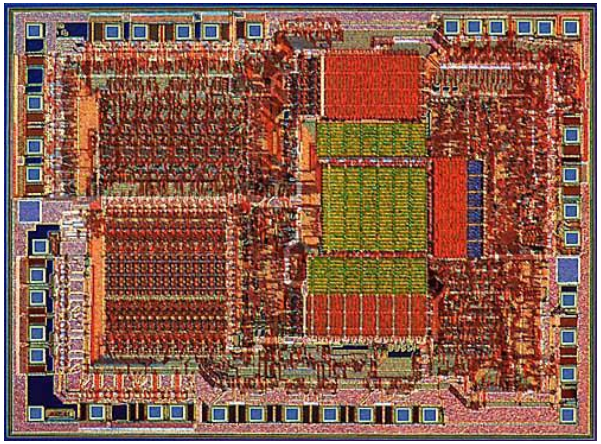
Beginn des Mikroelektronikzeitalters …

Intel 8080 (`75)

- 4500 Transistoren
- 6 Microns
- 2 - 3,5MHz
- 8Bit Daten / 16Bit Adresse



Intel 8080



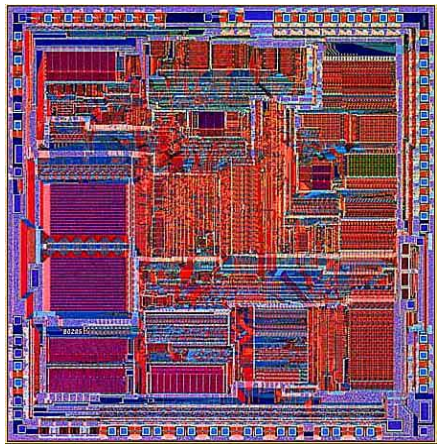
Intel 8085

Intel 8085 (`76)

- 6200 Transistoren
- 6 Microns
- 3 - 6MHz
- 8Bit Daten / 16Bit Adresse

Digitaltechnik - Historie

Beginn des Mikroelektronikzeitalters …



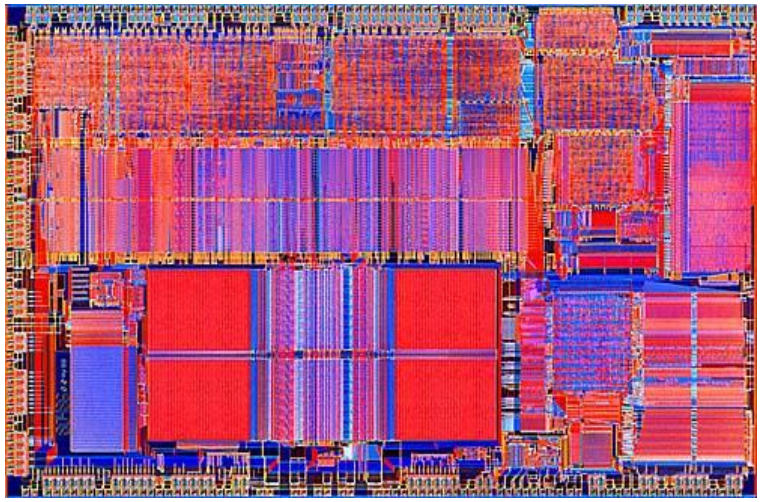
Intel 80286

Intel 80286 (`82)

- 134.000 Transistoren
- 1,4 Microns
- 6 - 20MHz
- 16Bit Daten / 24Bit Adresse

Intel 80486 (`89)

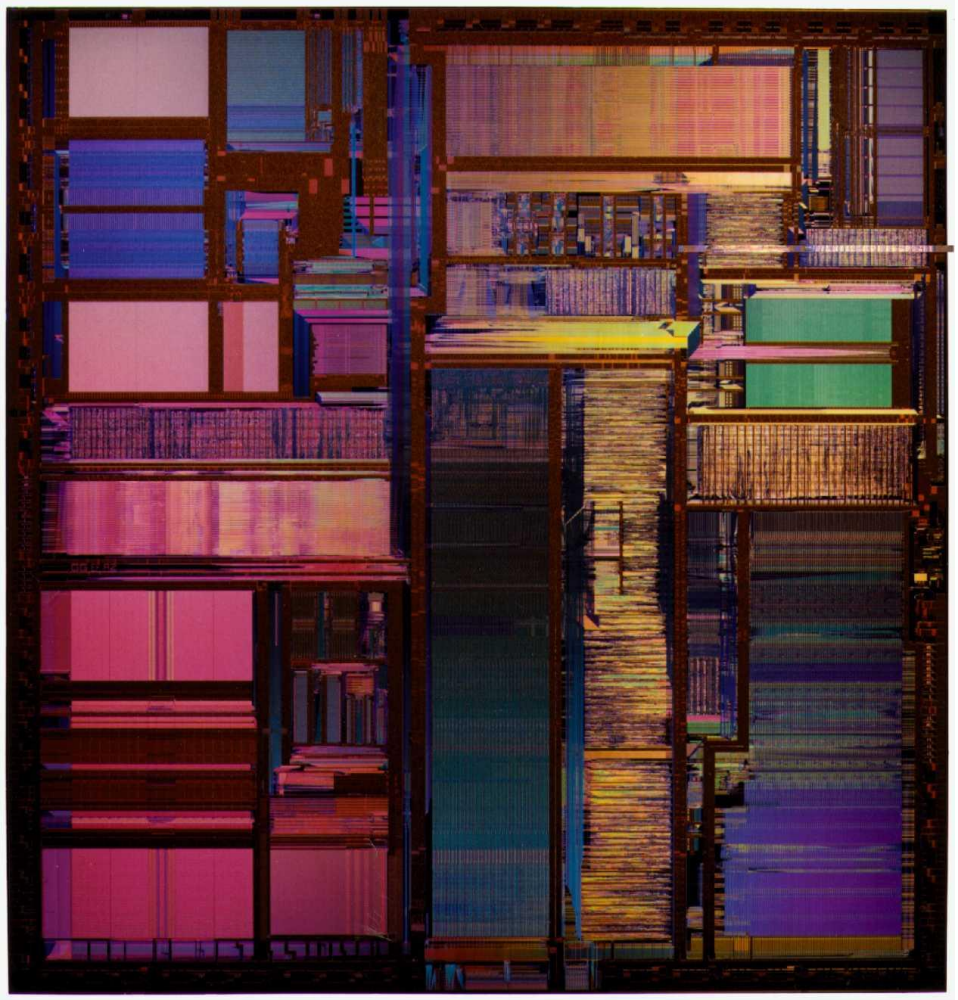
- 1,2 Mio. Transistoren
- 0.6 Microns
- 20 – 100MHz
- 16/32Bit Daten
- 32Bit Adresse



Intel 80486

Digitaltechnik - Historie

Mikroelektronik heute …



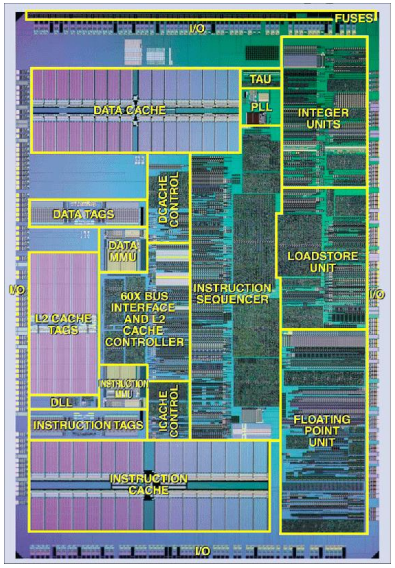
Jetzt werden Gigabit Speicherchips und CPUs wie die hier abgebildete mit mehreren Millionen Transistoren produziert.

Intel Pentium

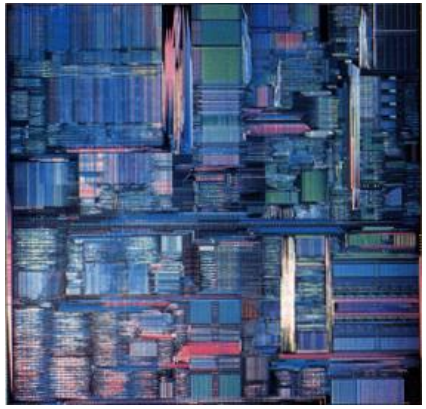
- 3.3 Mio. Transistoren
- 3.3V BiCMOS Silicon Technology
- 32Bit CPU
- 60 - 230MHz

Mikroelektronik: Heutige Prozessoren

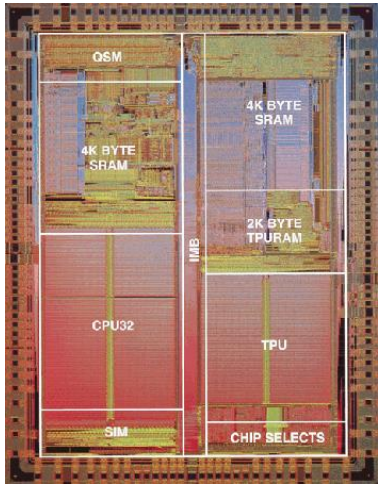
IBM Power PC 750



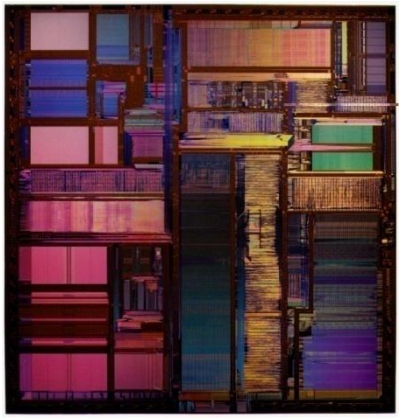
Pentium Pro Layout



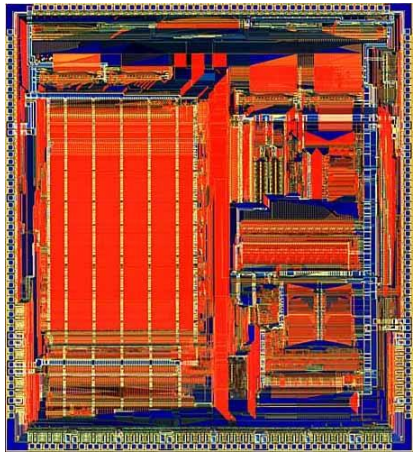
Motorola M68355 Microcontroller



Intel Pentium Processor

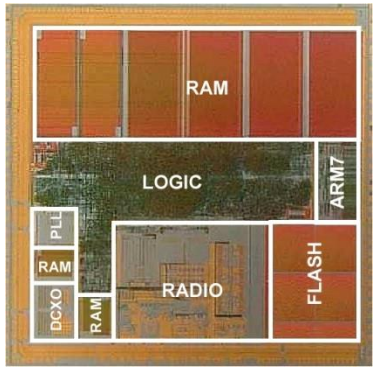


TI DSP 8847



System auf Silizium

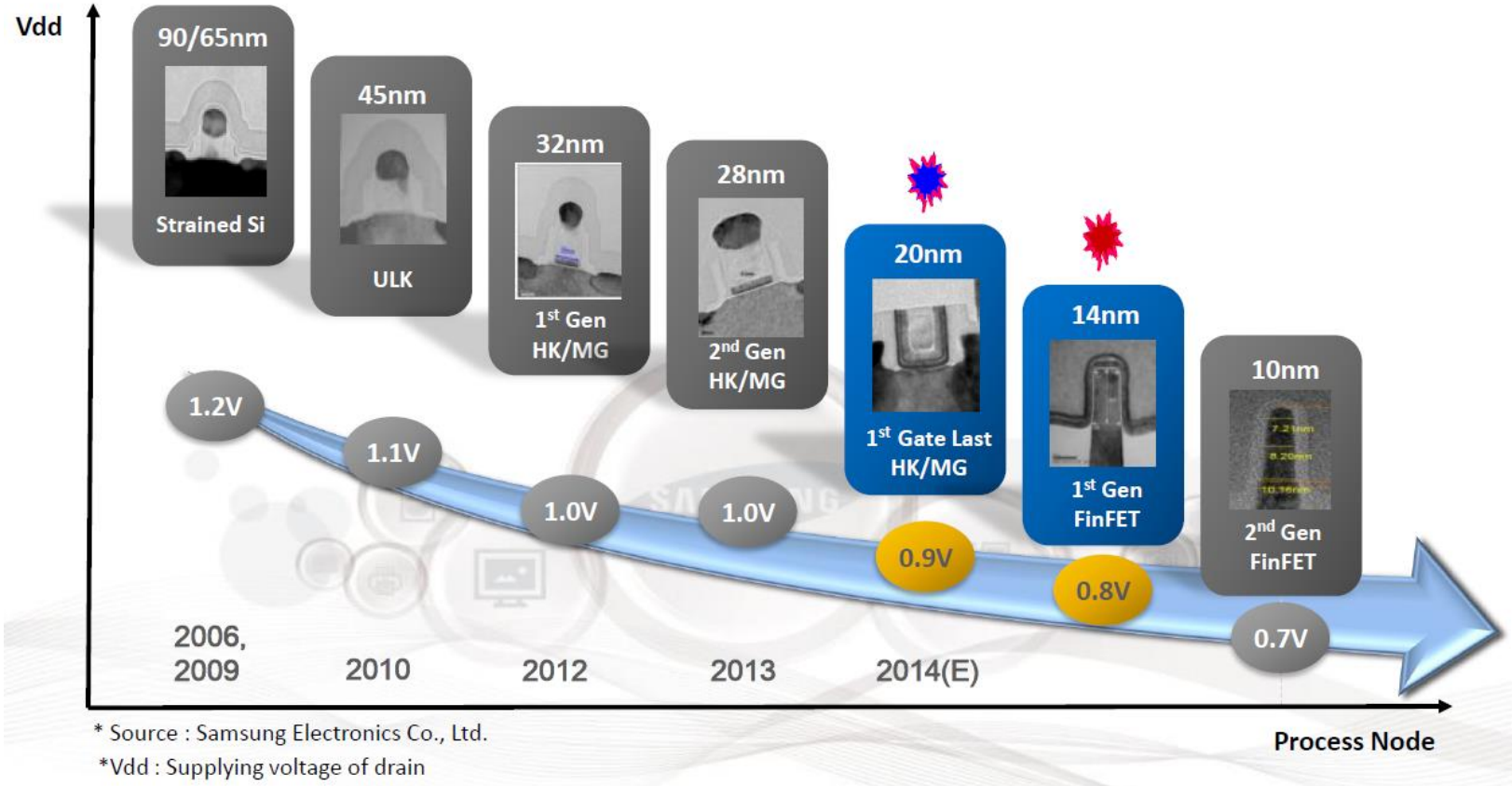
(Bluetooth SoC: Eynde et al., Alcatel, 2001)



KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

Digitaltechnik - Historie

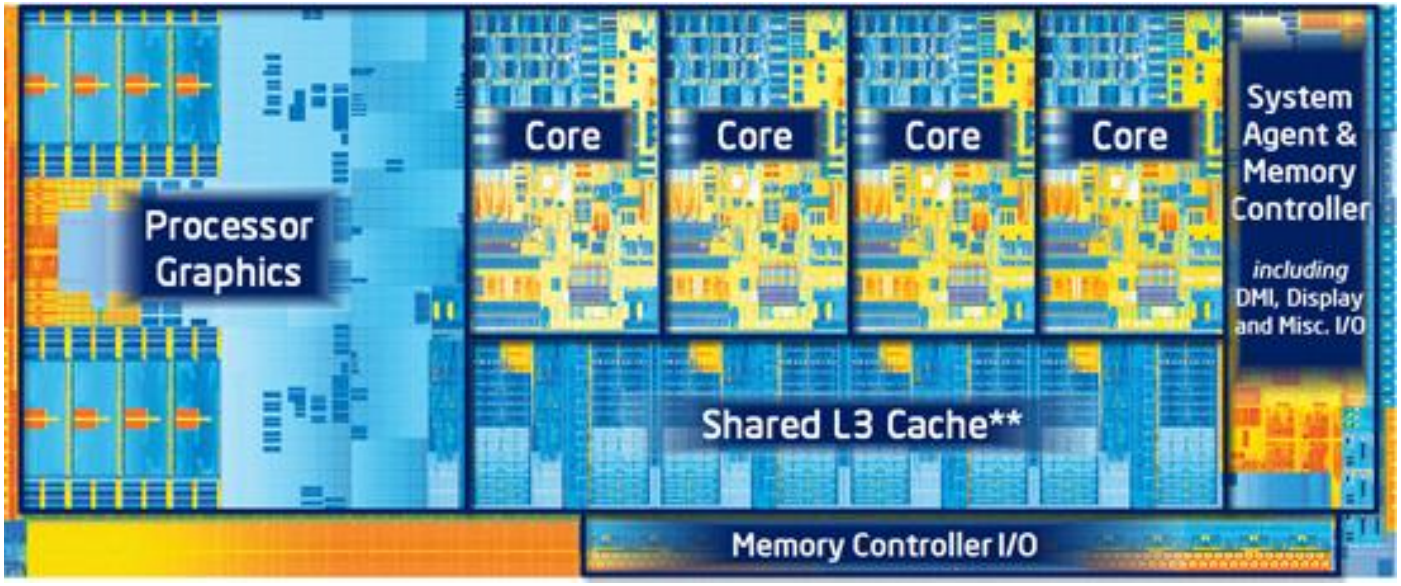
Mikroelektronik heute …



* Source : Samsung Electronics Co., Ltd.
*Vdd : Supplying voltage of drain

Digitaltechnik - Historie

Mikroelektronik heute …



Quelle: hardwareluxx

- Ein Core i7 (Ivy Bridge) besitzt 4 Kerne und integrierten HD Graphics 4000
- Über 1,4 Milliarden Transistoren auf einem Chip
- Durch 22nm Fertigung nur 160 mm² große Chipfläche
  Bei Sandy Bridge (Vorgänger) waren es noch 995 Millionen Transistoren auf einem 216 mm² großen Chip (32nm Fertigung).

Superrechner: Tianhe-2

- **Prozessoren (16.000 Rechenknoten mit 3,12 Millionen Kernen):**
  - **32.000 × Intel Xeon E5-2693 (12-Core-Prozessor, 2,2 GHz, 211 GFLOPS**
  - **48.000 × Intel Xeon Phi 31S1P (57-Core-Prozessor, 1,1 GHz)**
- **Speicherplatz: 12.400 TB**
- **Leistungsaufnahme: 17.808 kW**
- **Kühlung: Wasserkühlung mit 6.400 kW Leistung**
- **Grundfläche: 720 m²**

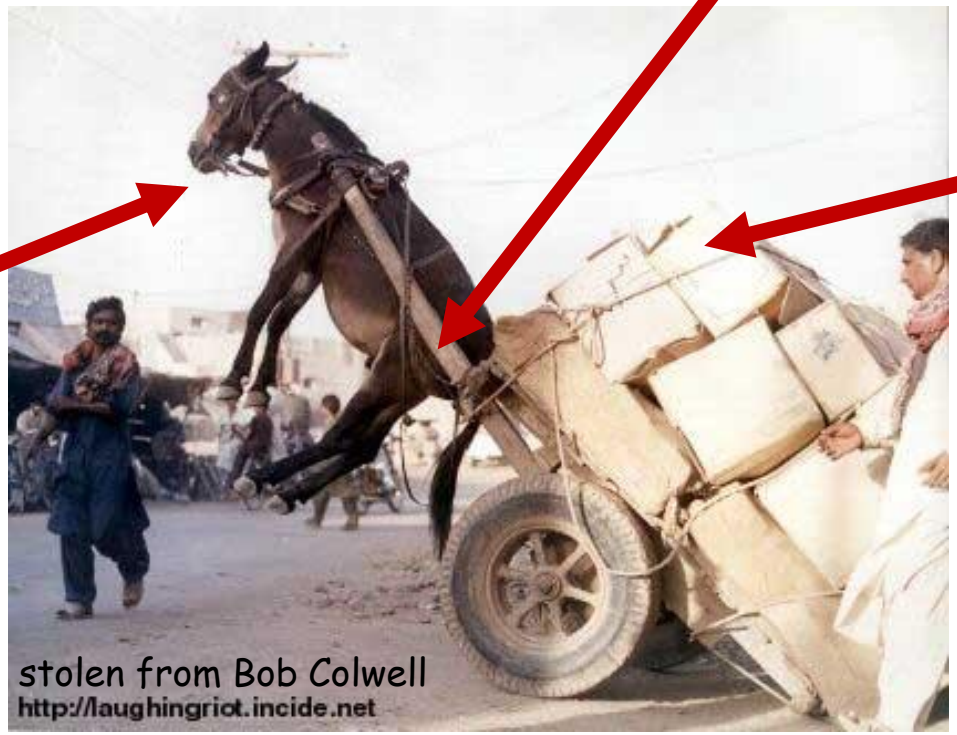
Von Neumann (vN) Architektur kommt an ihre Grenzen …

vN: unbalanciert

vN Flaschenhals

CPU (Prozessor-Kern)

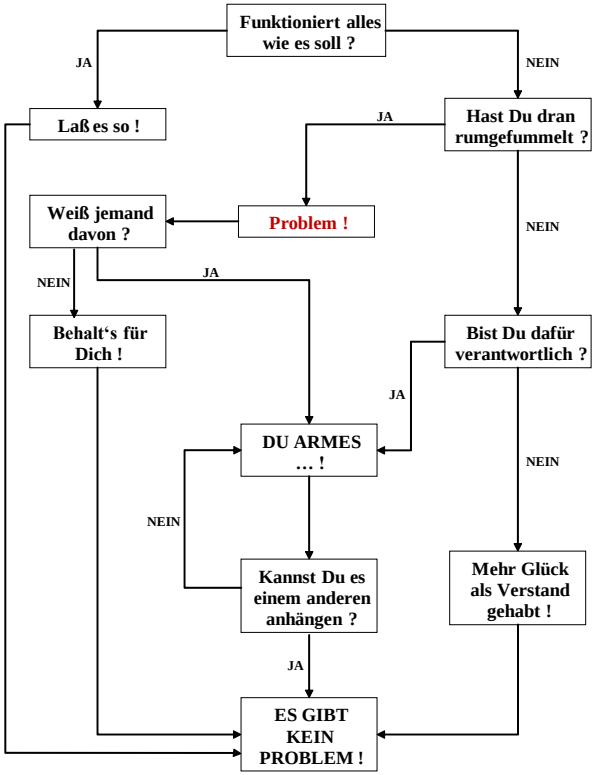
Cache-Speicher, …



Quelle: R. Hartenstein, Univ. Kaiserslautern

Problemlösungsstrategien …

Wie löse ich ein Problem ?

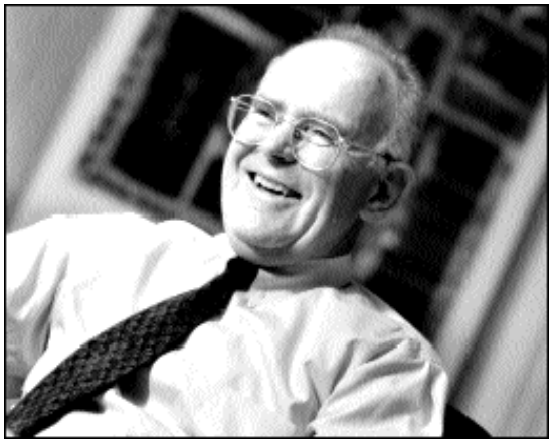


Im Leben gibt es meistens unterschiedliche Problemlösungsstrategien …

Digitaltechnik - Historie

Moore's Law

- 1965 sagte Gordon E. Moore das exponentielle Wachstum der Halbleitertechnologie vorher.
- Er spekulierte, daß es 1975 möglich sei, 65.000 Komponenten auf einem 6mm² großen IC zu integrieren - er hatte Recht!



Digitaltechnik - Historie

Moore's Law

- Seine Vorhersage beruhte auf 3 Datenpunkten:
  - Produktion des ersten planaren Transistors 1959
  - ICs von 1964 mit 32 Transistoren
  - Ein IC, der noch im Entwicklungsstadium war und 1965 mit 64 Transistoren auf den Markt gebracht werden sollte.

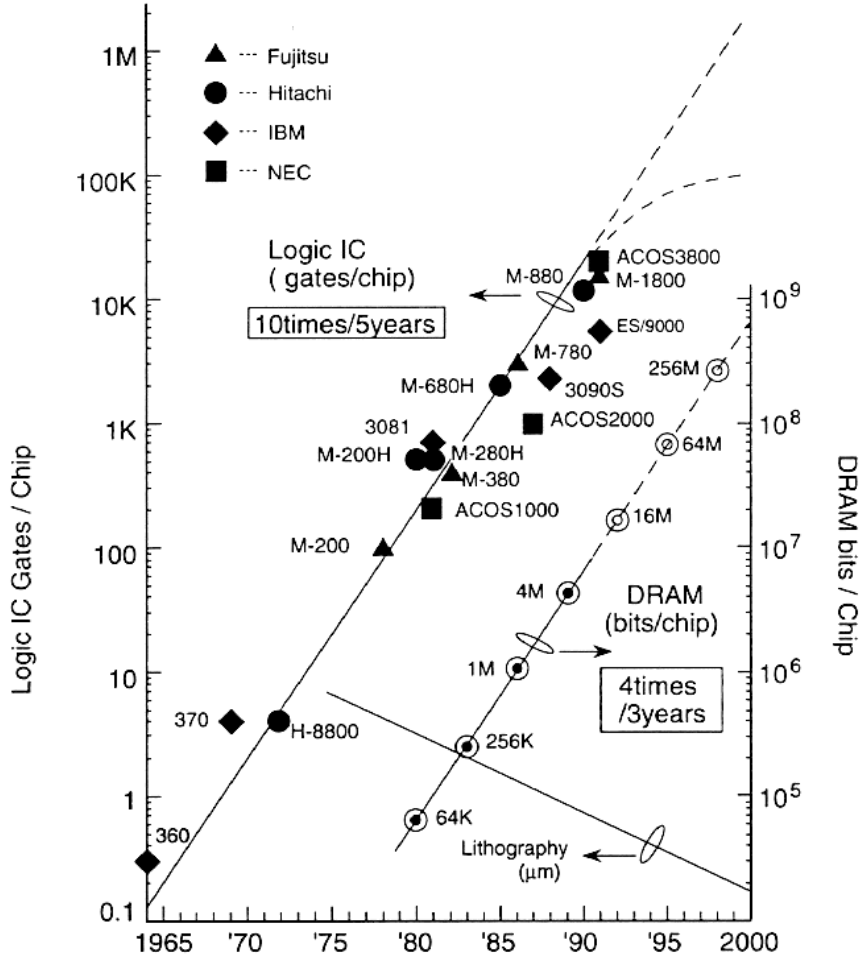
- „Manufacturers had been doubling the density of components per integrated circuit at regular intervals, and they would continue to do so as far as the eye could see."

- Moore's Law: Integrationsdichte verdoppelt sich alle 18 Monate

Digitaltechnik - Historie

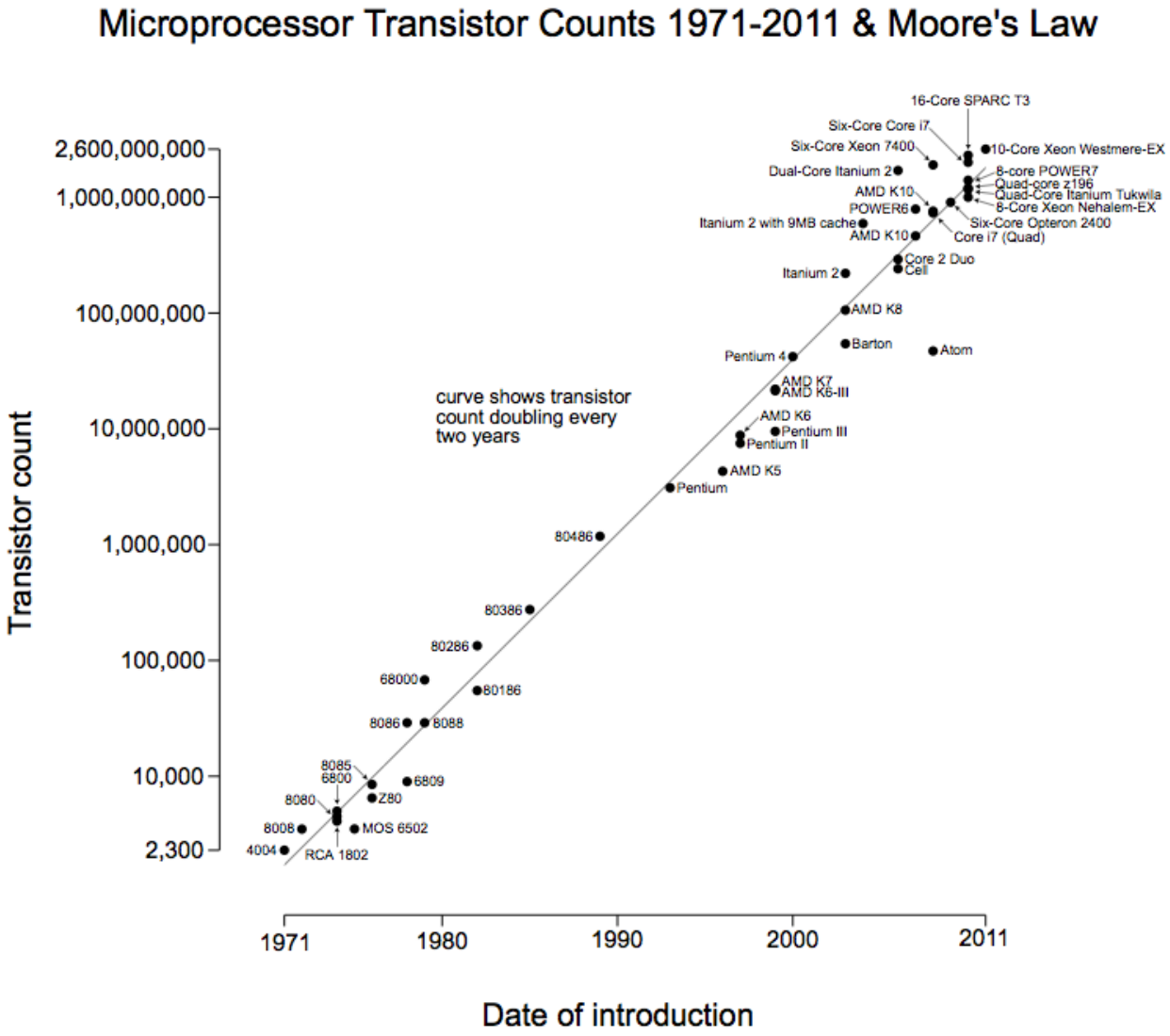
Integrationsdichte

- Die Komplexität von Speicherchips und Mikroprozessoren wuchs exponentiell.
- Es war genau diese Abbildung, die Moore vorhersagte.
- Moore‘s Law gilt auch für die Transistordichte von Mikroprozessoren.



KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

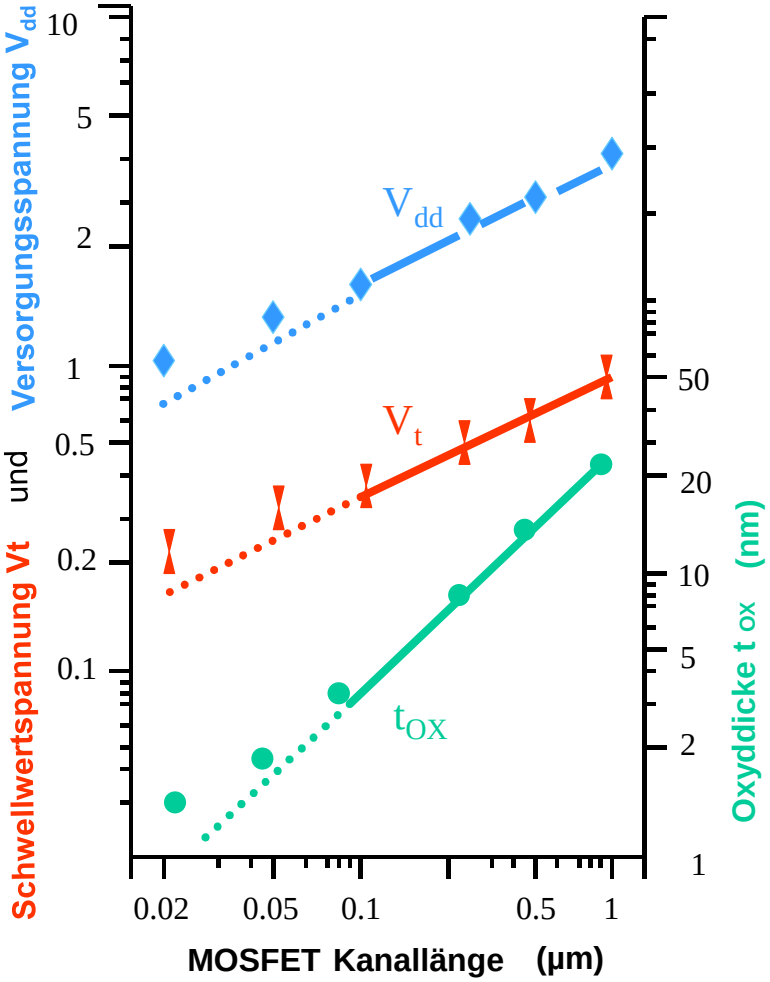
Digitaltechnik - Historie



KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

Digitaltechnik - Entwurfsverfahren

Status der Mikroelektroniktechnologie



Schnelle Evolution der IC-Technologien

Zuk. VLSI Chips / SoCs	2005	2011
CMOS Kanallänge	0.1 µm	0.05 µm
Vers.-Spannung (V_{dd})	0.9-1.2 V	0.5-0.6 V
Chip-Grösse	520 mm ^{2}	750 mm ^{2}
Transistorsen/cm^2	40 M	100 M
DRAM bits /chip	17.2 G	275 G
Anzahl Verdraht.-Ebenen	7 - 8	9

(Quelle: International Technology Roadmap for Semiconductors)

VLSI-Entwurf am Scheideweg ?

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

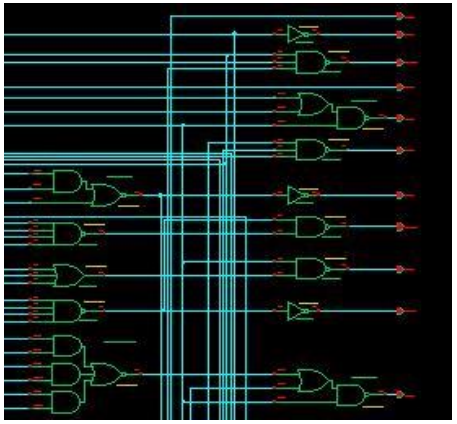
Digitaltechnik - Entwurfsverfahren

Hardware Beschreibung

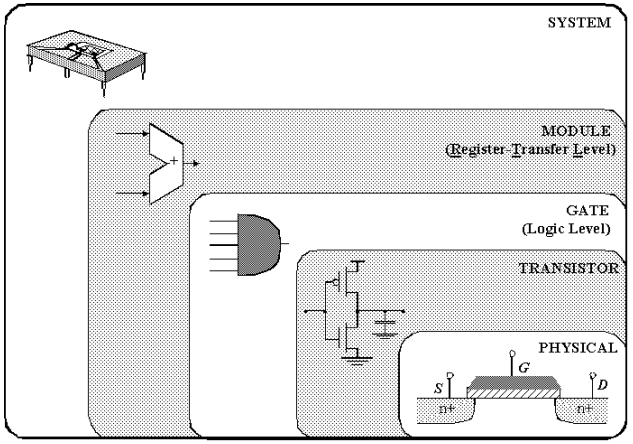
```
architecture structural of first_tap is

signal x_q,red  : std_logic_vector(bitwidth-1
downto 0);
signal mult     : std_logic_vector(2*bitwidth-1
downto 0);

begin

 delay_register:
   process(reset,clk)
   begin
     if reset='1' then
        x_q <= (others => '0');
     elsif (clk'event and clk='1') then
        x_q <= x_in;
     end if;
   end process;

 mult <= signed(coef)*signed(x_q);
```

Synthese
(Synopsys)

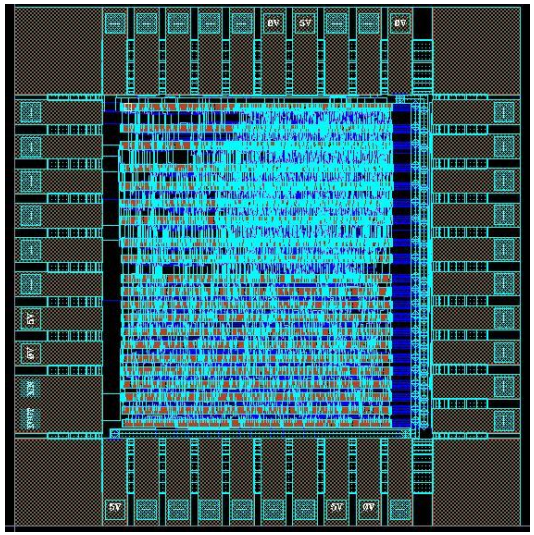
Netzliste



Abstraktionsebenen

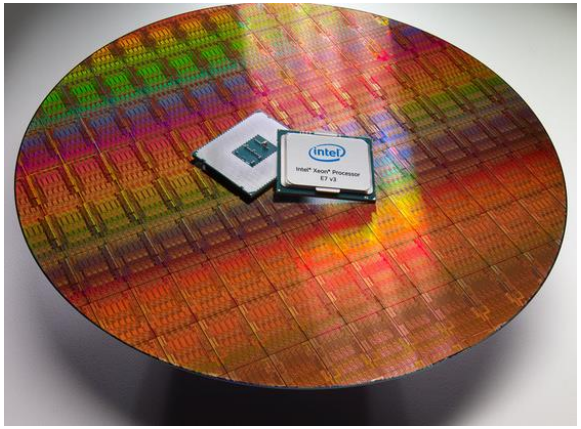


Platzierung & Verdrahtung
(Cadence/ Mentor)



Masken-Layout

Fabrikation



Chip Wafer

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

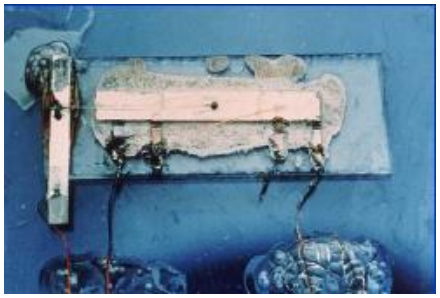
Digitaltechnik - Entwurfsverfahren

Was automatisierter Entwurf auch sein kann ...

Computer Aided Design

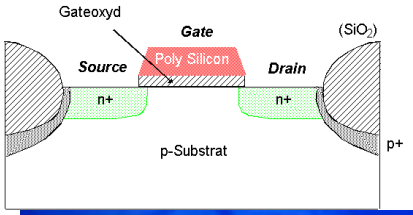
KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

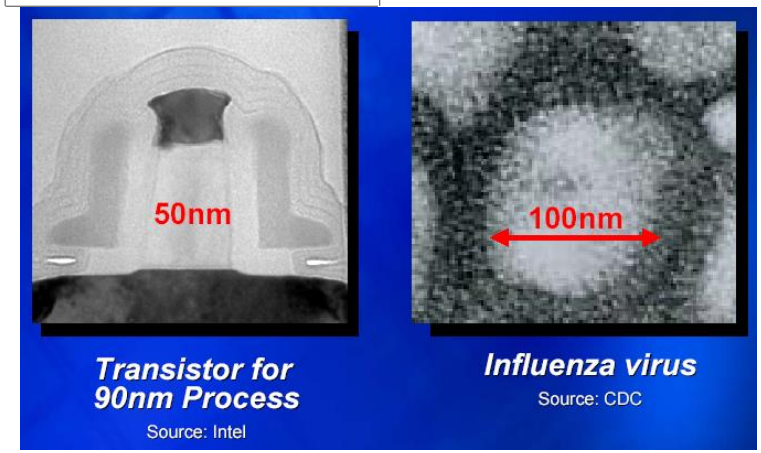
Mikroelektronik: Größenskalierung



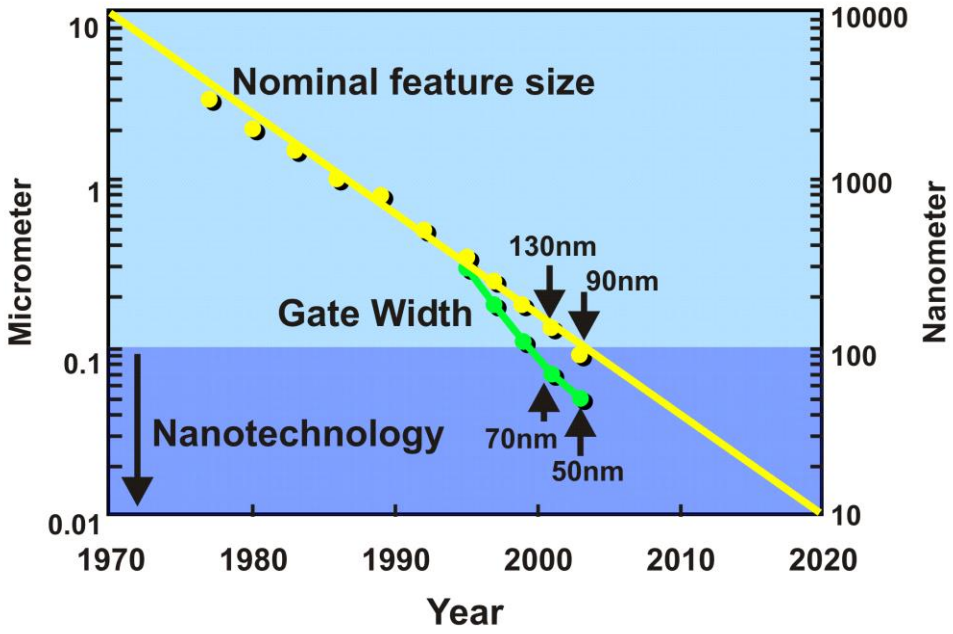
1959

- erster integrierter Schaltkreis
  (Jack Kilby, Robert Noyce)



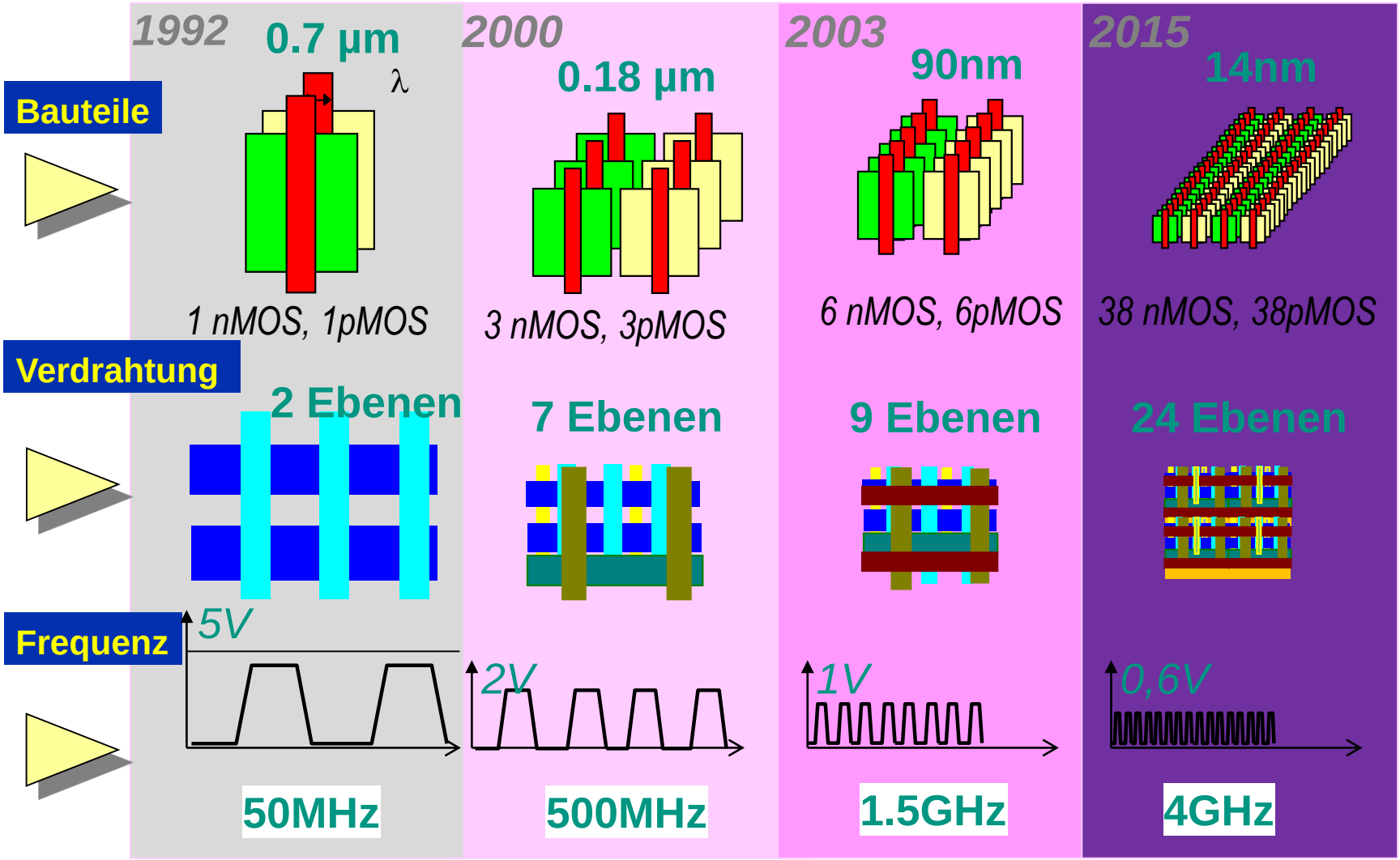


CMOS Skalierung



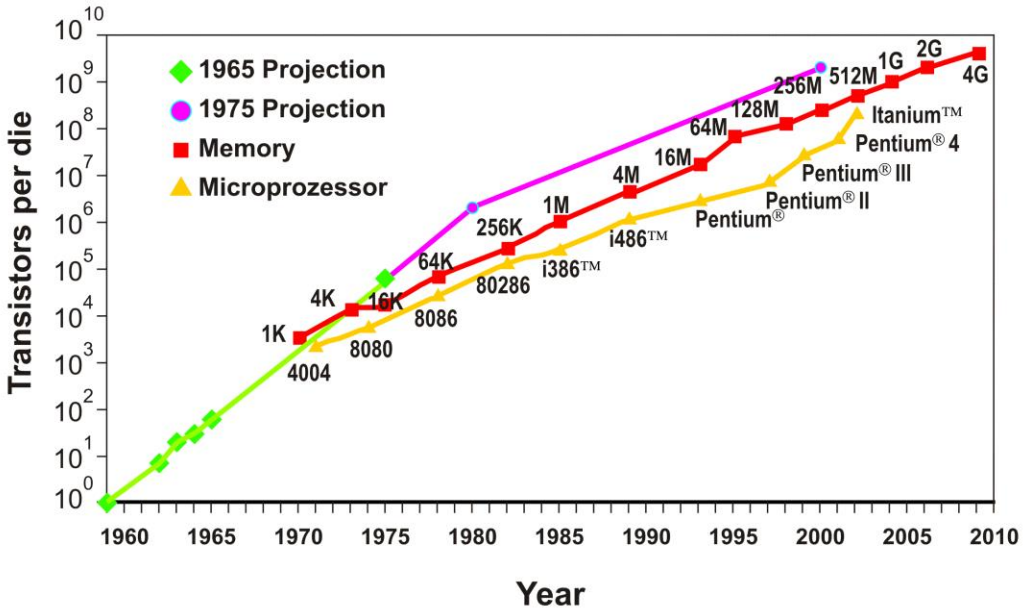
(**Quelle:** International Technology Roadmap for Semiconductors ITRS)

Mikroelektronik: Größenskalierung

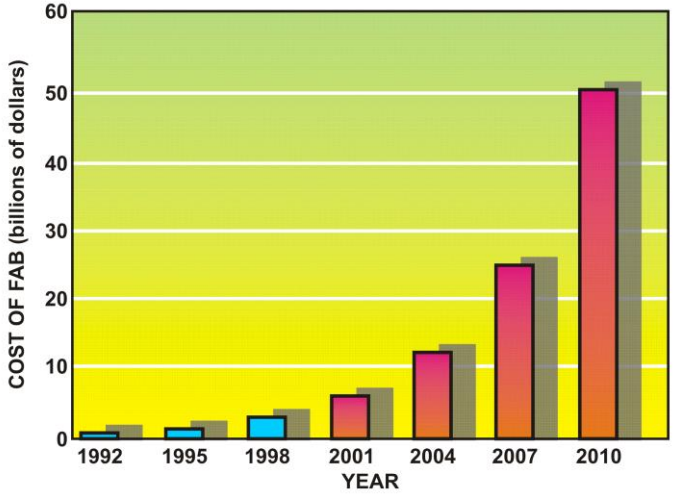


Mikroelektronik: Skalierung, Verlustleistung und Kosten

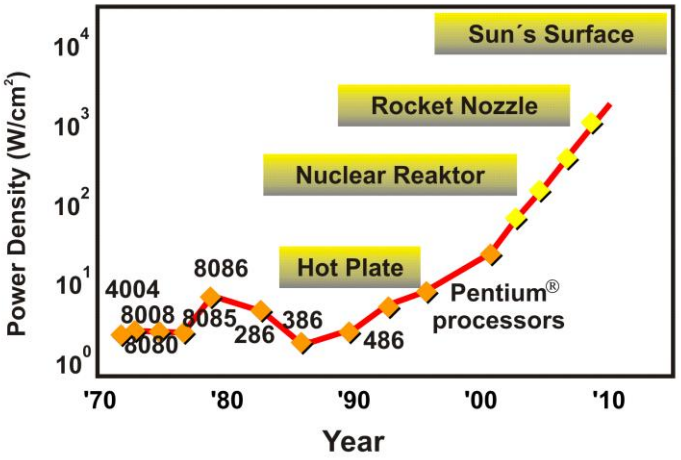
Prozessor- und Speicherintegration



Kostenentwicklung



Verlustleistungsentwicklung



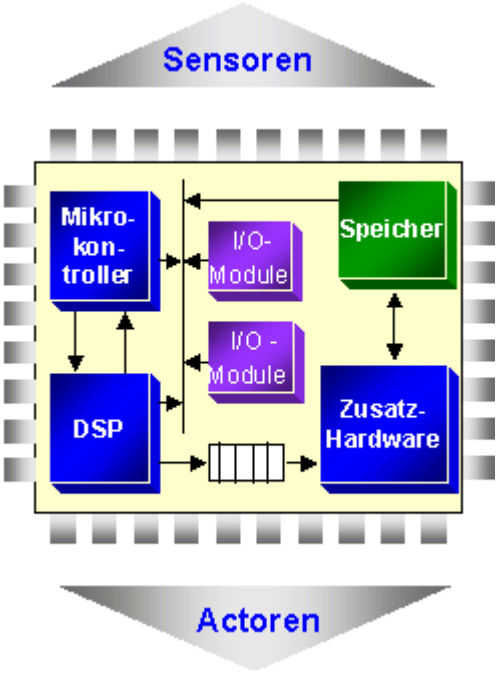
Prozessor- und Speicher-integrationsdichten im Vergleich zu Moore´s Gesetz

(**Quelle:** International Technology Roadmap for Semiconductors ITRS)

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) | © 2016

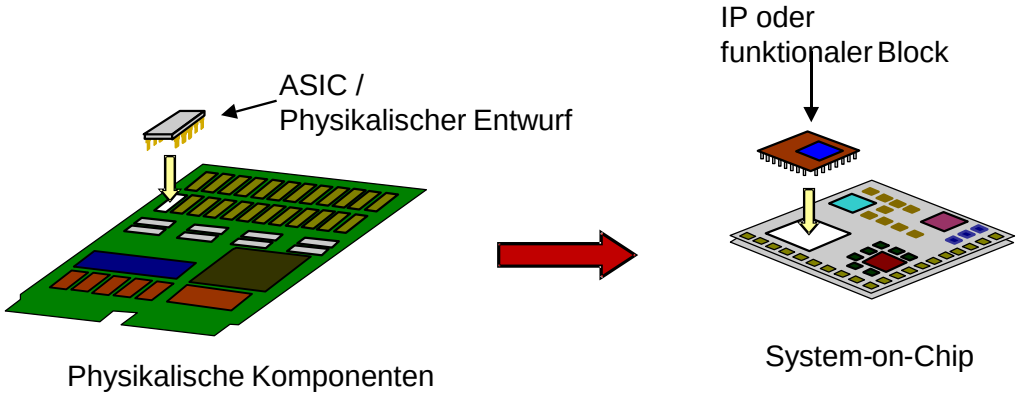
Digitaltechnik - Entwurfsverfahren

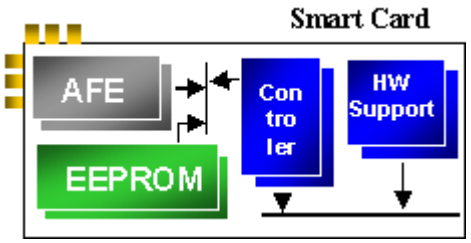
System-on-Chip (SoC)



Eigenschaften

- anwendungsspezifisch
- reaktiv
- echtzeitfähig





Kriterien

- Kosten
- Verlustleistung
- Performanz
- *Flexibilität (Risikominimierung -> Time-to-Market)*

Digitaltechnik - Entwurfsverfahren

Formale Spezifikation
HW/SW Spec (SystemC, C, VHDL)

IP-basierter Entwurf, Reuse & Integration:
Anwendungsspezifische EDA-Methoden

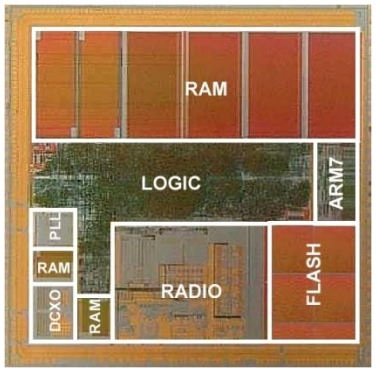
Digitaler Hardwareentwurf

Platzierung & Verdrahtung

Inkrementelle Verfeinerung

Kriterien für System-on-Chip Lösungen:

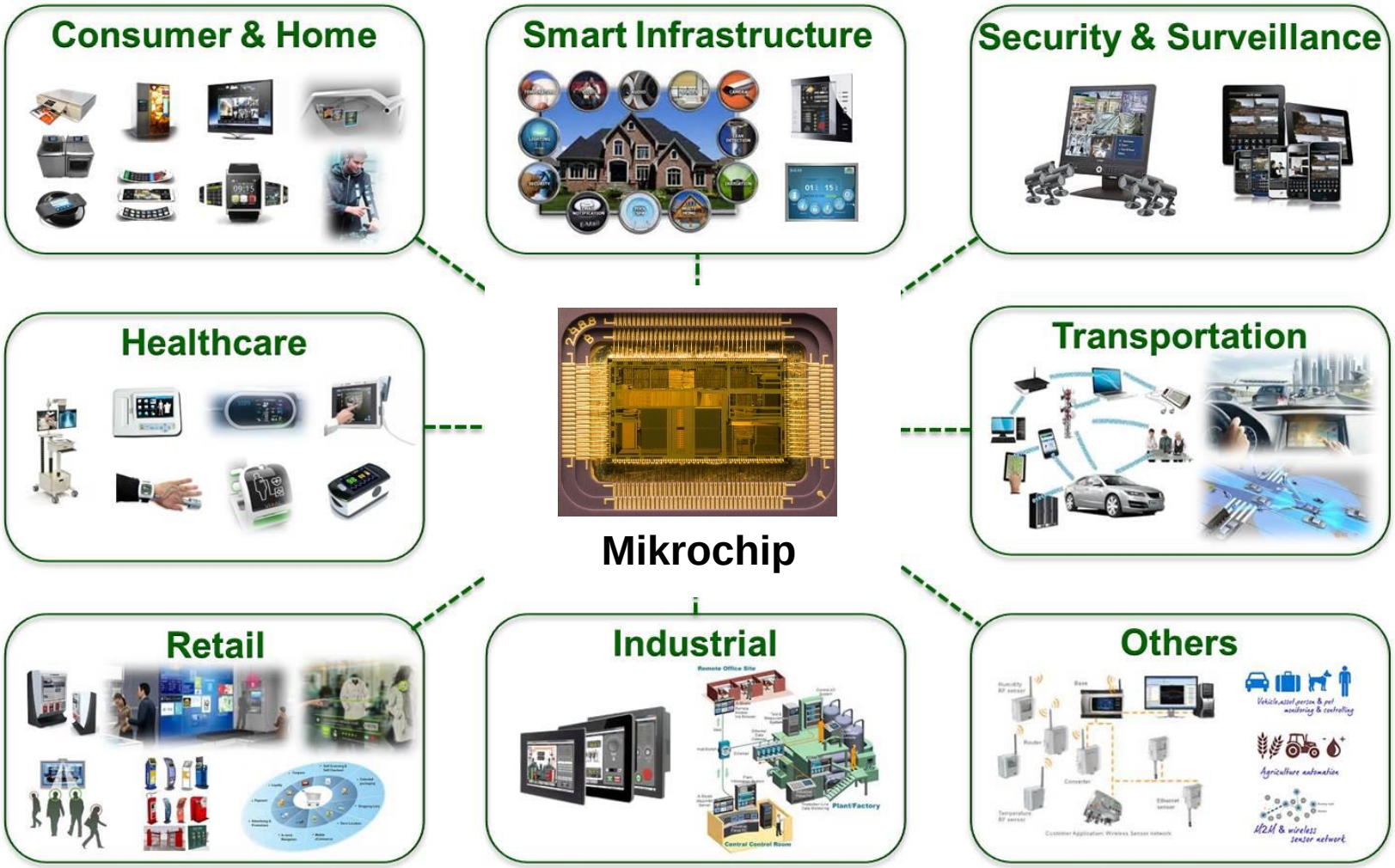
- **Kleine Chipfläche**
- **Verlustleistung**
- **Entwurfszeit**
- **Flexible Hardware**
- **geringe Kosten**
- **Risikominimierung**



Bsp.: **Bluetooth System-on-Chip (SoC)**

(Eynde et al., Alcatel, ISSCC 2001)

Digitaltechnik - Anwendungen



Vivante and the Vivante logo are trademarks of Vivante Corporation. All other product, image or service names in this presentation are the property of their respective owners. © 2013 Vivante Corporation

Digitaltechnik - Historie

Historische Entwicklung (Überblick)

– China	ca. 110 v. Chr.	Abakus
– Wilhelm Schickard Deutschland	1623	Erstes mechanisches Rechenwerk
– Blaise Pascal Frankreich	1642	Entwicklung einer Rechenmaschine
– Gottfried Wilhelm Leibniz Deutschland	1673	Einführung des dualen Zahlensystems, binäres Rechnen und rechnen mit Bedingungen, Entwicklung einer Rechenmaschine
– Charles Babbage England	1833	Erste programmierbare Rechenmaschine mit Rechenwerk, Programmwerk, Speicherwerk, Steuerung mit Lochkarten; hat wegen mechanischer Probl. nie funktioniert
– Hermann Hollerith Deutschland/USA	1890	Einführung der Lochkarte zur Auswertung der amerikanischen Volkszählung von 1890; aus seiner damals gegründeten Firma ging IBM hervor

Digitaltechnik - Historie

Historische Entwicklung (Überblick) (2)

– Konrad Zuse Deutschland	1941	Entwicklung programmgesteuerter Rechenmaschinen; erste funktionsfähige Anlage Z3 1941; Programm auf gelochtem Kinofilmstreifen, Verwendung bistabiler Schaltelemente und dualer Zahlen sowie logischer Verknüpfungen, Gleitkommadarstellung der Zahlen; viele theoretische Arbeiten
– Howard Aiken USA	1944	MARK I, Relaisrechner
– John von Neumann USA	1945	ENIAC, Röhrenrechner, dekadischer Rechner mit 10 FF pro Stelle, Leistung vergleichbar mit kleiner 8-Bit-CPU; Addition: 200µs(5kFlops), Multiplikation: 2,8 ms, Kosten mehrere Mio. DM, 18000 Roehren, 150 kW leistung, durch ständige Reparaturen nur die Hälfte der Zeit nutzbar

Digitaltechnik - Historie

Historische Entwicklung (Überblick) (3)

– Brattain, Shockley Bardeen, USA	1947	Entwicklung des Transistors
– Apple	1976	Der Apple I läutet das Zeitalter der Massencomputer ein
– IBM	1978	IBM setzt mit seinem PC mit Intel 8086-Prozessor und Microsoft DOS einen Industriestandard
– Apple	1984	Der Macintosh erscheint mit seinem revolutionären MacDOS auf Basis des Motorola 68000: - graphische Benutzeroberfläche - Maus - Fenstertechnik - Plug & Play

Digitaltechnik - Historie

Geschichte der Halbleiter- und Prozessortechnologie (Überblick)

- 1955 Einsatz von Transistoren in Rechnern
- 1962 Erste ICs der TTL-Familie
- 1965 Erste Bauteile in MOS-Technik
- 1970 Erste Bauteile in CMOS-Technik
- 1970 Entwicklung des 4004-Prozessors durch Intel (4-Bit, 108kHz, 200$)
- 1972 8008-Prozessor (8-Bit, 200kHz, ca.3500 Tranistoren)
- 1974 8080-Prozessor (8-Bit) (64KBytes Adressraum, 2µs Zykluszeit, 500 kHz)
- 1975 6800-Prozessor (8-Bit) von Motorola
- 1978 8086-Prozessor (16-Bit)
- 1985 80386-Prozessor (32-Bit)
- 1989 80486-Prozessor (32-Bit) mit integriertem math. Coprozessor
- 1992 Pentium-Prozessor (64-Bit Datenbus , 3,1Mil. T. bei 0,8 µm, 60MHz)
- 1997 Pentium II-Prozessor (9Mil. Transistoren bei 0,35 µm, 300MHz)
- 1998 Pentium III-Prozessor (9,5Mil. Transistoren bei 250nm, 600MHz)
- 2000 Pentium IV-Prozessor (ca. 42*10^6 Transistoren bei 180nm, bis 2GHz)
- 2006 Core Duo (ca. 151,6Mil. Transinstoren bei 65 nm, bis 2,3GHz)
- 2008 Core i7 (ca. 731Mil. Tr. bei 45 nm, bis 3,3 GHz, bis zu vier Kerne)
- 2016 Core i7 der 7. Generation (ca. 3,5 Milliarden Transistoren bei 14nm Fertigung, bis 4.2 Ghz bei acht Kernen)