



# 64-040 Modul InfB-RSB

## Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

[https://tams.informatik.uni-hamburg.de/  
lectures/2021ws/vorlesung/rsb](https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2021ws/vorlesung/rsb)

– Kapitel 1 –

Andreas Mäder



Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Fachbereich Informatik

Technische Aspekte Multimodaler Systeme

Wintersemester 2021/2022



## Einführung

von-Neumann Konzept

Exkurs: Geschichte

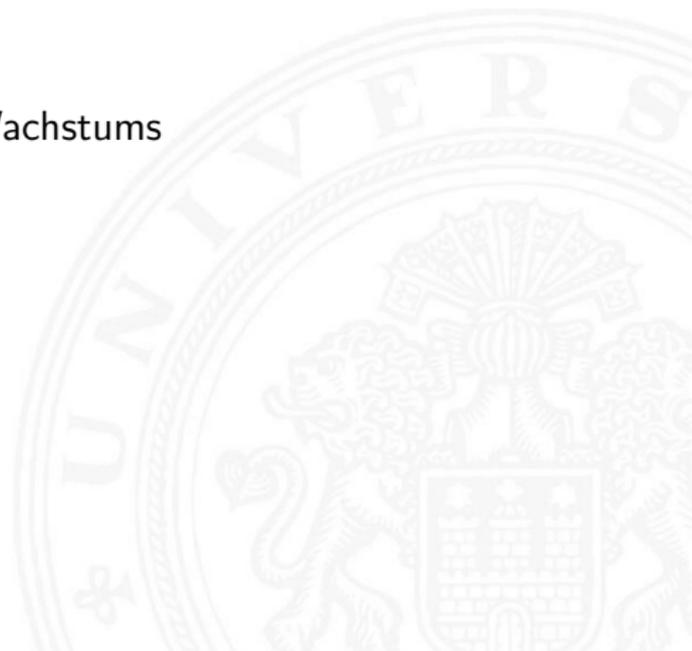
Personal Computer

Moore's Law

System on a chip

Roadmap und Grenzen des Wachstums

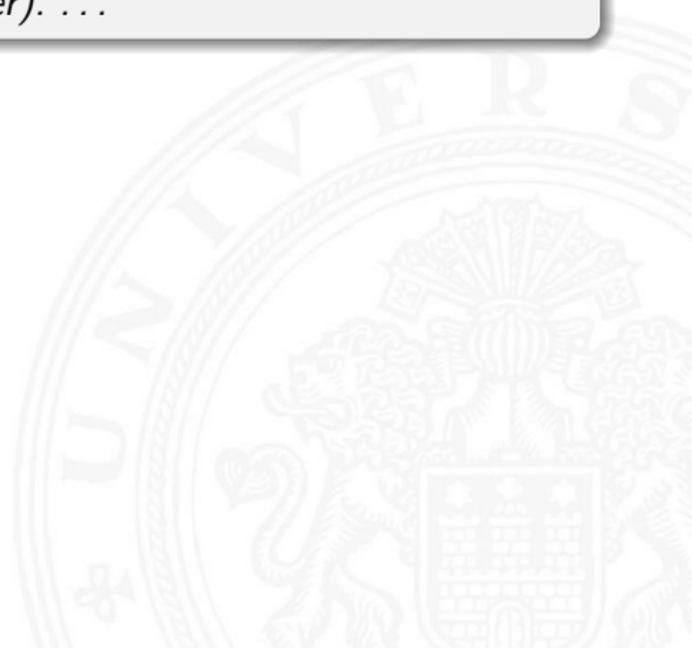
Literatur





## Brockhaus-Enzyklopädie: „Informatik“

*Die Wissenschaft von der systematischen Verarbeitung von Informationen, besonders der automatischen Verarbeitung mit Hilfe von Digitalrechnern (→ Computer). . . .*





## Brockhaus-Enzyklopädie: „Informatik“

Die Wissenschaft von der *systematischen Verarbeitung von Informationen*, besonders der *automatischen Verarbeitung mit Hilfe von Digitalrechnern* (→ Computer). . . .

**system. Verarbeitung:** von-Neumann Konzept

- ▶ Wie löst eine Folge elementarer Befehle (Programm) ein Problem?
- ⇒ Softwareentwicklung, Programmierung

## Brockhaus-Enzyklopädie: „Informatik“

Die Wissenschaft von der *systematischen Verarbeitung von Informationen*, besonders der *automatischen Verarbeitung mit Hilfe von Digitalrechnern* (→ Computer). . . .

**system. Verarbeitung:** von-Neumann Konzept

- ▶ Wie löst eine Folge elementarer Befehle (Programm) ein Problem?

⇒ Softwareentwicklung, Programmierung

**Digitalrechner:** das technische System dazu (Rechnerarchitektur)

- ▶ Wie wird Information (Zahlen, Zeichen) repräsentiert/codiert?
- ▶ Wie werden Befehle effizient auf der Hardware abgearbeitet?

⇒ Hardwareentwicklung

## unterschiedliche Paradigmen

- ▶ **SW**: Hardware ist „notwendiges Übel“
  - ▶ Abstraktion von der Hardware
  - ▶ Entwicklung in Hochsprachen (Produktivität)
- ▶ **HW**: Optimierungsziel sind technische Werte
  - = Taktfrequenz, Latenz, Durchsatz, Leistungsaufnahme etc.
  - ▶ Maschinenbefehl wird auf Hardwarearchitektur ausgeführt
  - ▶ technische Entwicklung: *Moore's Law*

...

## unterschiedliche Paradigmen

- ▶ **SW**: Hardware ist „notwendiges Übel“
  - ▶ Abstraktion von der Hardware
  - ▶ Entwicklung in Hochsprachen (Produktivität)
- ▶ **HW**: Optimierungsziel sind technische Werte
  - = Taktfrequenz, Latenz, Durchsatz, Leistungsaufnahme etc.
  - ▶ Maschinenbefehl wird auf Hardwarearchitektur ausgeführt
  - ▶ technische Entwicklung: *Moore's Law*
  
- ▶ dies funktioniert seit Jahren! ...

## unterschiedliche Paradigmen

- ▶ **SW:** Hardware ist „notwendiges Übel“
  - ▶ Abstraktion von der Hardware
  - ▶ Entwicklung in Hochsprachen (Produktivität)
- ▶ **HW:** Optimierungsziel sind technische Werte
  - = Taktfrequenz, Latenz, Durchsatz, Leistungsaufnahme etc.
  - ▶ Maschinenbefehl wird auf Hardwarearchitektur ausgeführt
  - ▶ technische Entwicklung: *Moore's Law*
- ▶ dies funktioniert seit Jahren ... bis Ende 2017



## unterschiedliche Paradigmen

- ▶ **SW:** Hardware ist „notwendiges Übel“
  - ▶ Abstraktion von der Hardware
  - ▶ Entwicklung in Hochsprachen (Produktivität)
- ▶ **HW:** Optimierungsziel sind technische Werte
  - = Taktfrequenz, Latenz, Durchsatz, Leistungsaufnahme etc.
  - ▶ Maschinenbefehl wird auf Hardwarearchitektur ausgeführt
  - ▶ technische Entwicklung: *Moore's Law*
- ▶ dies funktioniert seit Jahren ... bis Ende 2017



Problem

verschiedene Sichtweisen

⇒ Vorlesung RSB: *Wie funktioniert ein Digitalrechner?*

Warum ist das überhaupt wichtig?

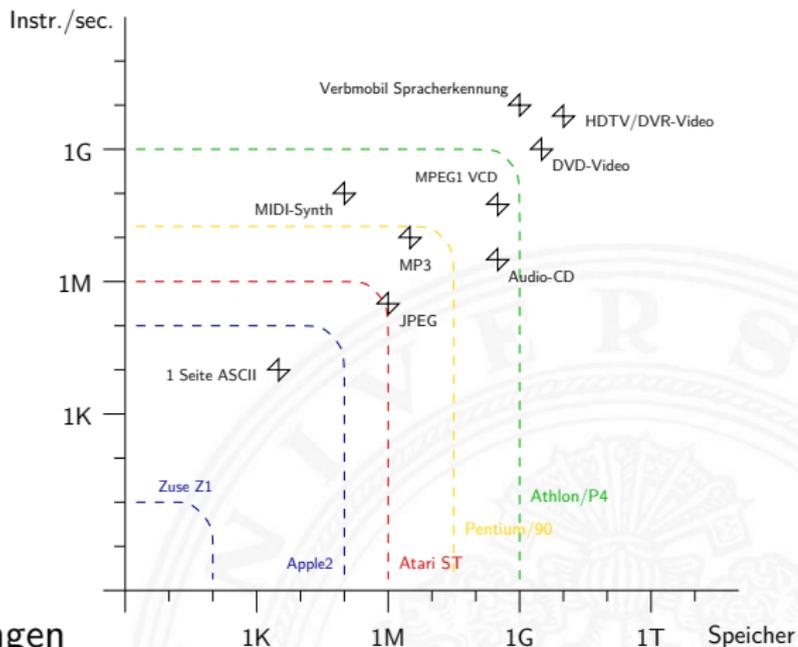
- ▶ Informatik ohne Digitalrechner undenkbar
  - ▶ Grundverständnis der Interaktion von SW und HW
    - ▶ für „performante“ Software
    - ▶ Sicherheitsaspekte
    - ▶ ...
  - ▶ Systemsicht/Variantenvielfalt von Mikroprozessorsystemen
    - ▶ Supercomputer, Server, Workstations, PCs ...
    - ▶ Medienverarbeitung, Mobile Geräte ...
    - ▶ RFID-Tags, Wegwerfcomputer ...
- ⇒ Informatik Basiswissen
- ⇒ Bewertung von Trends und Perspektiven
- ⇒ Chancen und Grenzen der Miniaturisierung

1. ständige technische Fortschritte in Mikro- und Optoelektronik mit einem weiterhin *exponentiellen* Wachstum (50%...100% pro Jahr)
    - ▶ Rechenleistung von Prozessoren („Performanz“)
    - ▶ Speicherkapazität Hauptspeicher (DRAM, SRAM, FLASH)
    - ▶ Speicherkapazität Langzeitspeicher (Festplatten, FLASH)
    - ▶ Bandbreite (Netzwerke)
  2. neue Entwurfparadigmen und -werkzeuge
- ⇒ Möglichkeiten und Anwendungsfelder
- ⇒ Produkte und Techniken

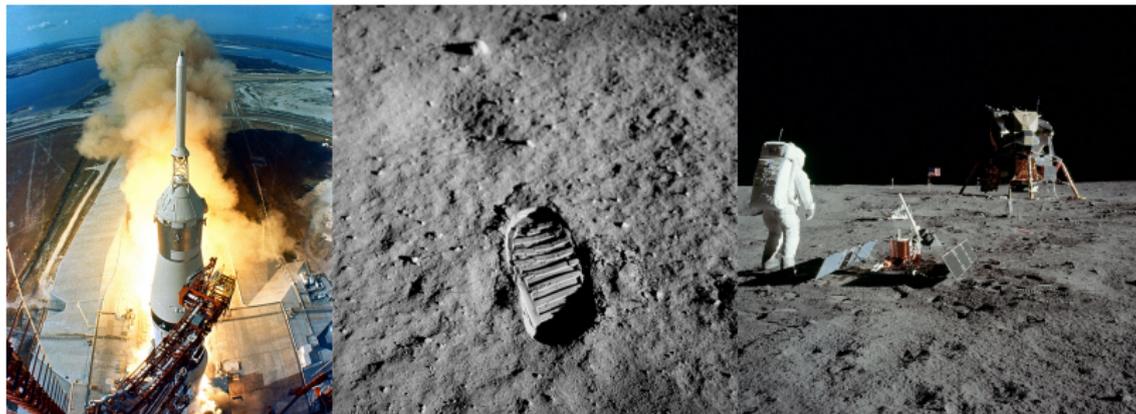
## Kriterien / Maßgrößen

- ▶ Rechenleistung: MIPS
- ▶ MBytes (RAM, HDD)
- ▶ Mbps
- ▶ MPixel

⇒ jede Rechnergeneration erlaubt neue Anwendungen

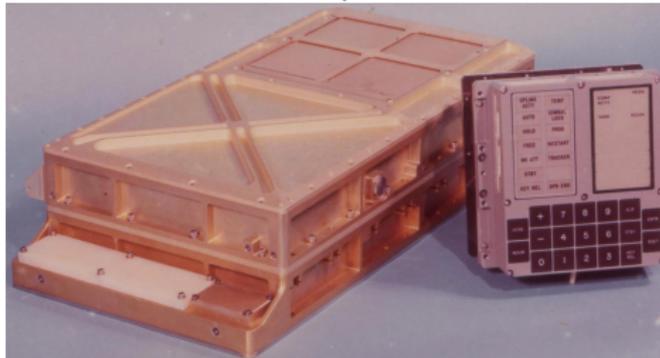


## Beispiel: Apollo 11 (1969)



- ▶ [bernd-leitenberger.de/computer-raumfahrt1.shtml](http://bernd-leitenberger.de/computer-raumfahrt1.shtml)
- ▶ [www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/CompSPACE.html](http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/computers/CompSPACE.html)
- ▶ [en.wikipedia.org/wiki/Apollo\\_Guidance\\_Computer](http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_Guidance_Computer)
- ▶ [en.wikipedia.org/wiki/IBM\\_System/360](http://en.wikipedia.org/wiki/IBM_System/360)

## 1. Bordrechner: AGC (Apollo Guidance Computer)



- ▶ Dimension  $61 \times 32 \times 15,0$  cm 31,7 kg  
 $20 \times 20 \times 17,5$  cm 8,0 kg
- ▶ Taktfrequenz: 1,024 MHz
- ▶ Addition  $20 \mu\text{s}$
- ▶ 16-bit Worte, nur Festkomma
- ▶ Speicher ROM 36 KWorte 72 KByte  
RAM 2 KWorte 4 KByte  
Zykluszeit  $11,7 \mu\text{s}$ , 12 Takte, 85,3 KHz

## 2. mehrere Großrechner: IBM System/360 Model 75s



# vor 50 Jahren (cont.)

- ▶ je nach Ausstattung: Anzahl der „Schränke“
- ▶ Taktfrequenz: bis 5 MHz
- ▶ 32-bit Worte, 24-bit Adressraum (16 MByte)
- ▶ Speicherhierarchie: bis 1 MByte Hauptspeicher (1,3 MHz Zykluszeit)
- ▶ (eigene) Fließkomma Formate
- ▶ Rechenleistung: 0,7 Dhrystone MIPS



- ▶ je nach Ausstattung: Anzahl der „Schränke“
  - ▶ Taktfrequenz: bis 5 MHz
  - ▶ 32-bit Worte, 24-bit Adressraum (16 MByte)
  - ▶ Speicherhierarchie: bis 1 MByte Hauptspeicher (1,3 MHz Zykluszeit)
  - ▶ (eigene) Fließkomma Formate
  - ▶ Rechenleistung: 0,7 Dhrystone MIPS
- ▶ ... und 2016 <sup>1</sup>

	CPU	Cores	[DMIPS]	$F_{clk}$ [GHz]
Smartphone	Exynos 8890	8	47 840	2,3
Desktop PC	Core i7 6950X	10	317 900	3,0

---

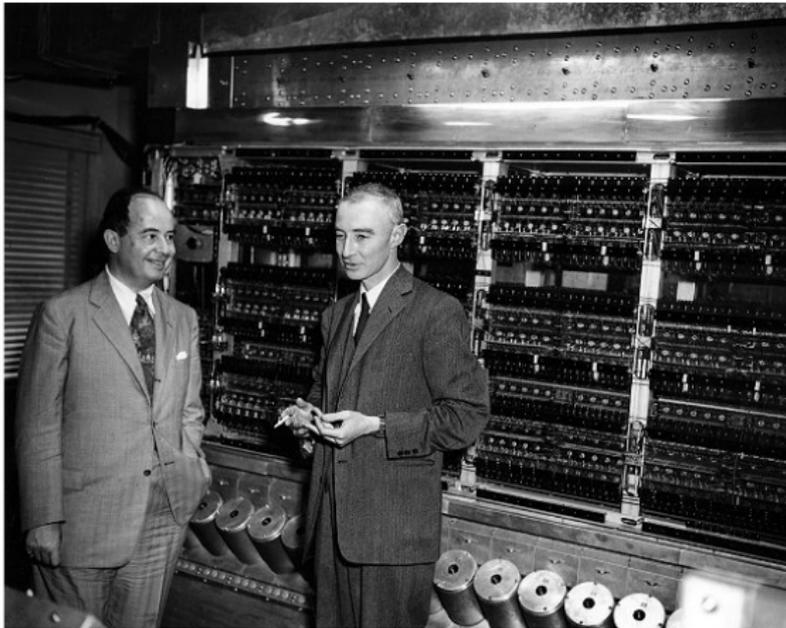
<sup>1</sup>Daten aktueller Systeme sind nicht verfügbar, da der Benchmark inzwischen überholt ist

- ▶ J. Mauchly, J.P. Eckert, J. von-Neumann 1945
  - ▶ Abstrakte Maschine mit minimalem Hardwareaufwand
    - ▶ System mit Prozessor, Speicher, Peripheriegeräten
    - ▶ die Struktur ist unabhängig von dem Problem, das Problem wird durch austauschbaren Speicherinhalt (Programm) beschrieben
  - ▶ gemeinsamer Speicher für Programme und Daten
    - ▶ fortlaufend adressiert
    - ▶ Programme können wie Daten manipuliert werden
    - ▶ Daten können als Programm ausgeführt werden
  - ▶ Befehlszyklus: Befehl holen, decodieren, ausführen
- ⇒ enorm flexibel
- ▶ **alle** aktuellen Rechner basieren auf diesem Prinzip
  - ▶ aber vielfältige Architekturvarianten, Befehlssätze usw.

# von-Neumann Rechner: IAS Computer

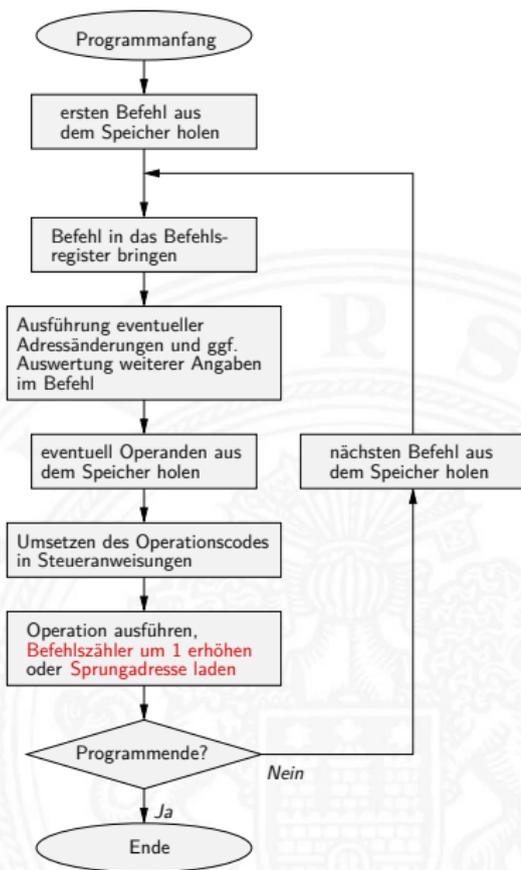
1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

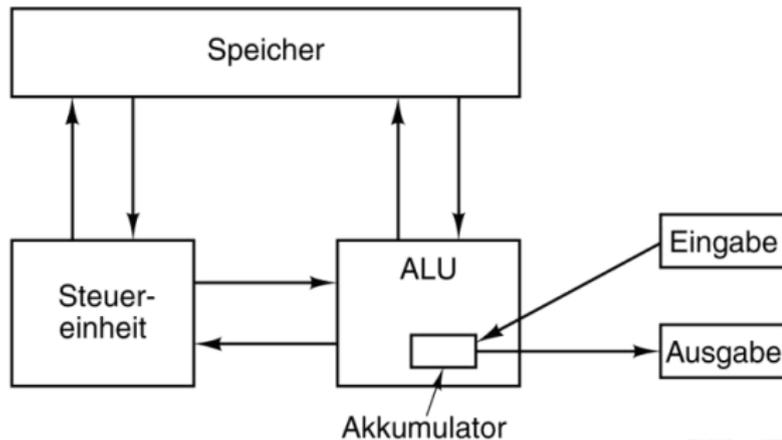
64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



John von Neumann, R. J. Oppenheimer, IAS Computer Princeton [www.computerhistory.org](http://www.computerhistory.org)

- ▶ Programm als Sequenz elementarer Anweisungen (Befehle)
- ▶ als Bitvektoren im Speicher codiert
- ▶ Interpretation (Operanden, Befehle und Adressen) ergibt sich aus dem Kontext (der Adresse)
- ▶ zeitsequenzielle Ausführung der Instruktionen

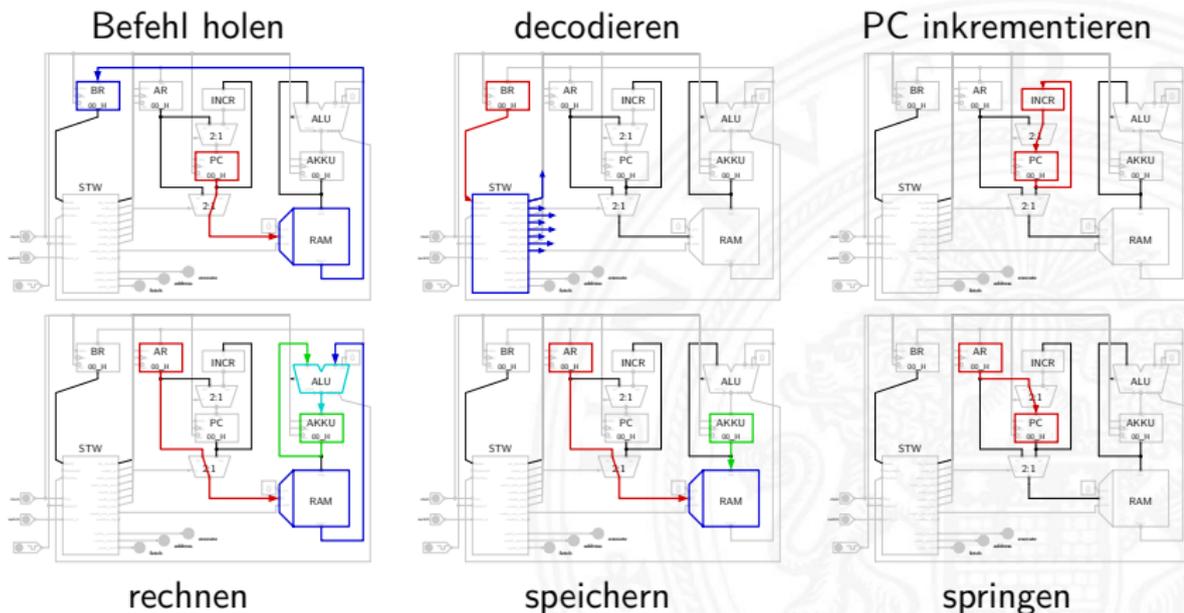




Fünf zentrale Komponenten:

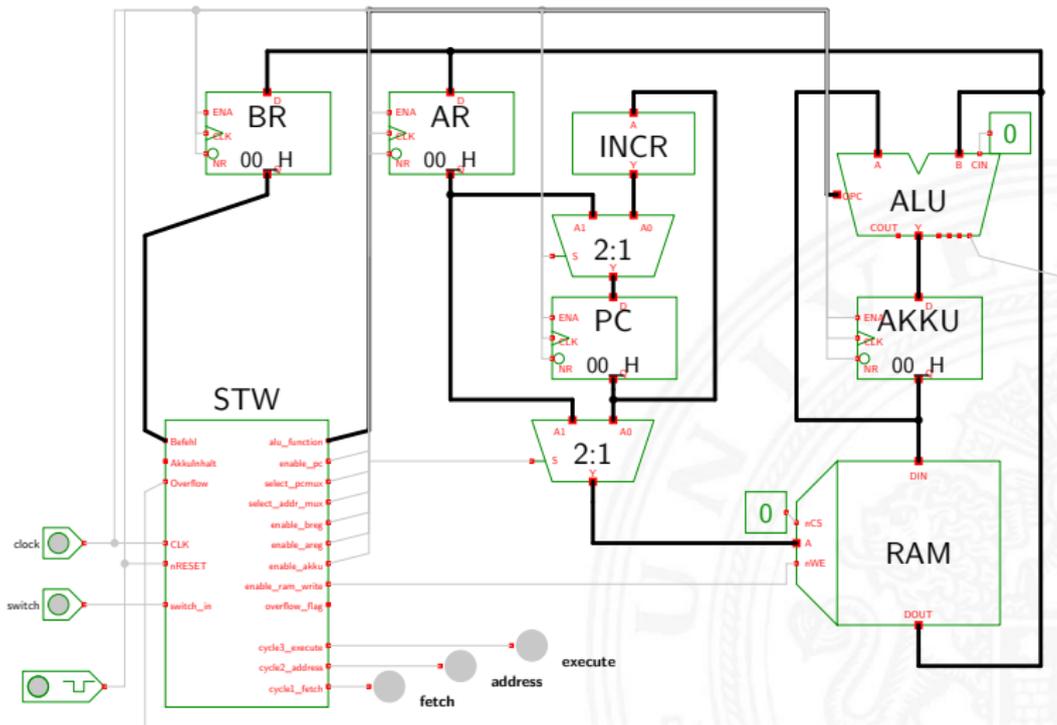
- ▶ Prozessor mit **Steuerwerk** und **Rechenwerk** (ALU, Register)
- ▶ **Speicher**, gemeinsam genutzt für Programme und Daten
- ▶ **Eingabe-** und **Ausgabewerke**
- ▶ verbunden durch Bussystem

- ▶ Verschaltung der Hardwarekomponenten für alle mögl. Datentransfers
- ▶ abhängig vom Befehl werden nur bestimmte Pfade aktiv
- ▶ Ausführungszyklus



# Beispiel: PRIMA (die primitive Maschine)

- ▶ ein (minimaler) 8-bit von-Neumann Rechner



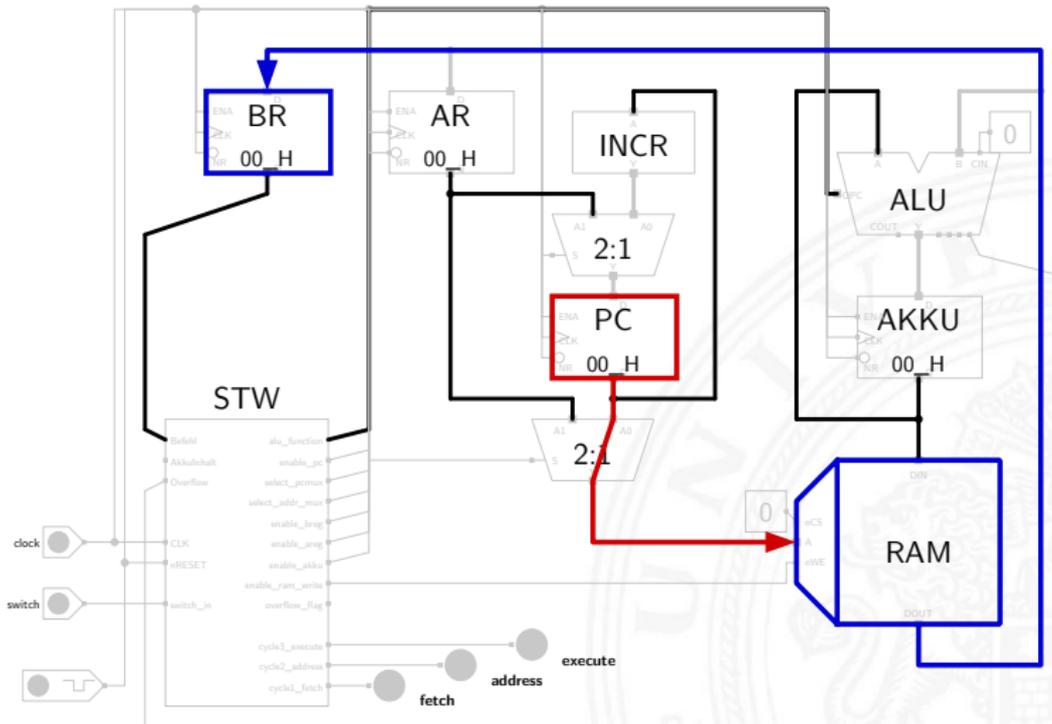


# PRIMA: Befehl holen

BR = RAM[PC]

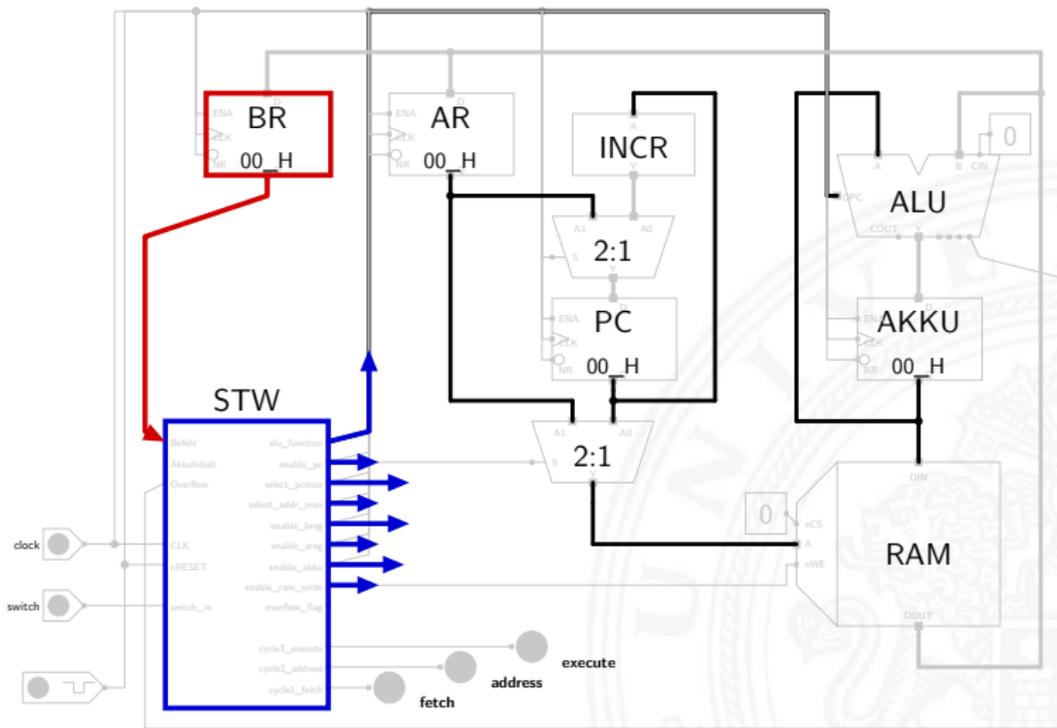
1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



# PRIMA: decodieren

Steuersignale = decode(BR)



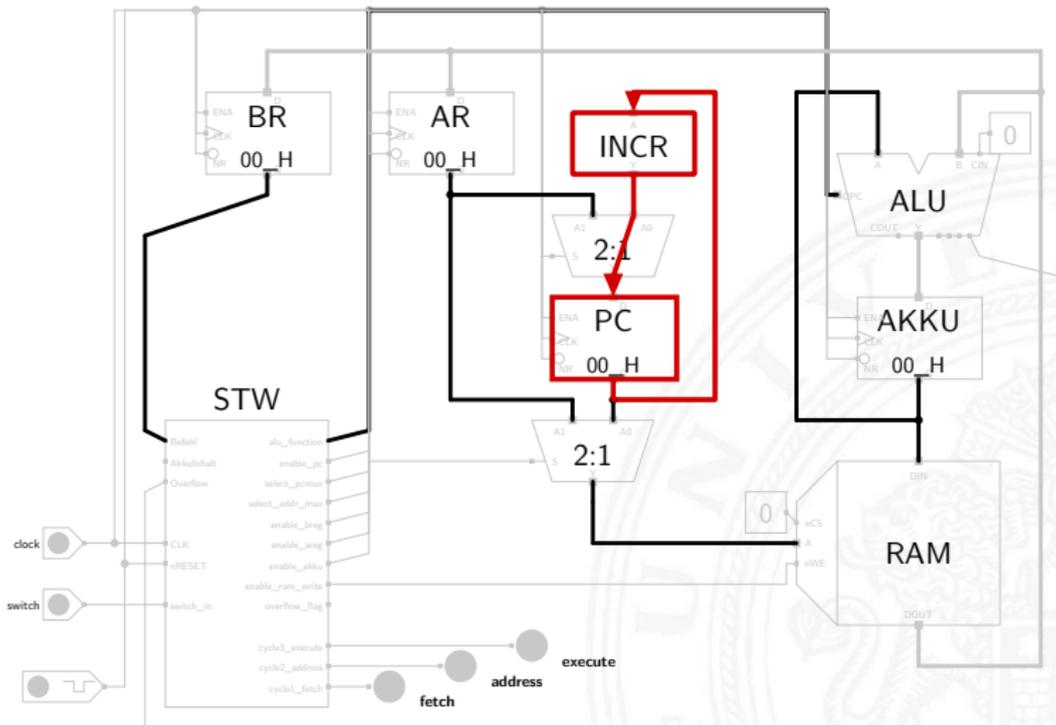


# PRIMA: PC inkrementieren

PC = PC+1

1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



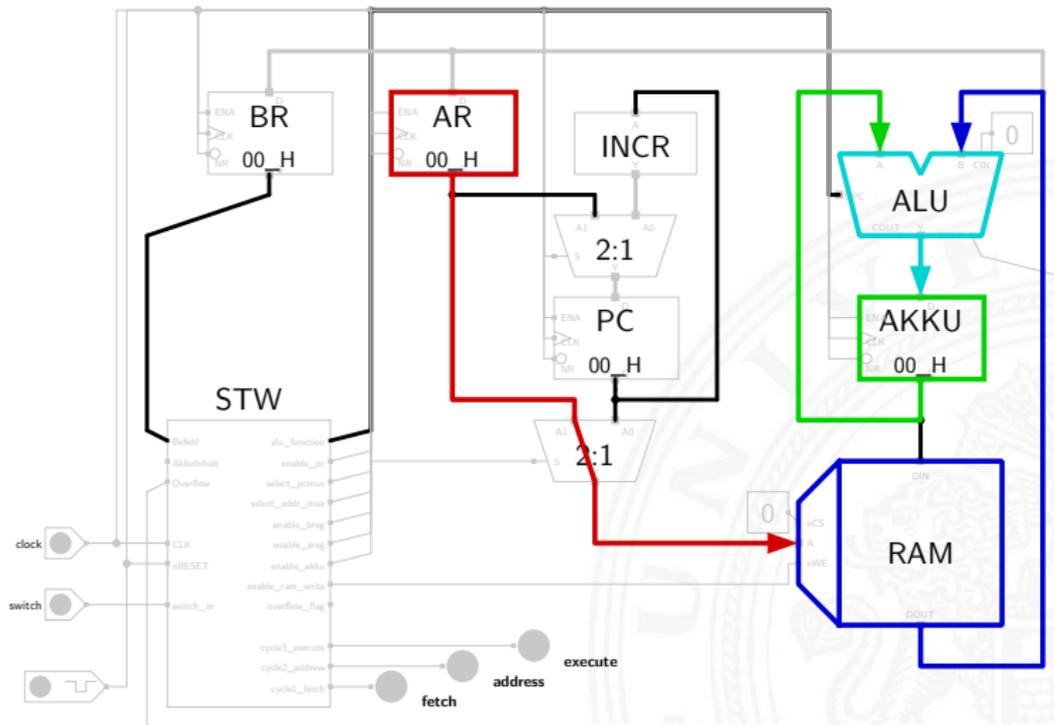


# PRIMA: rechnen

Akku = Akku + RAM[AR]

1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



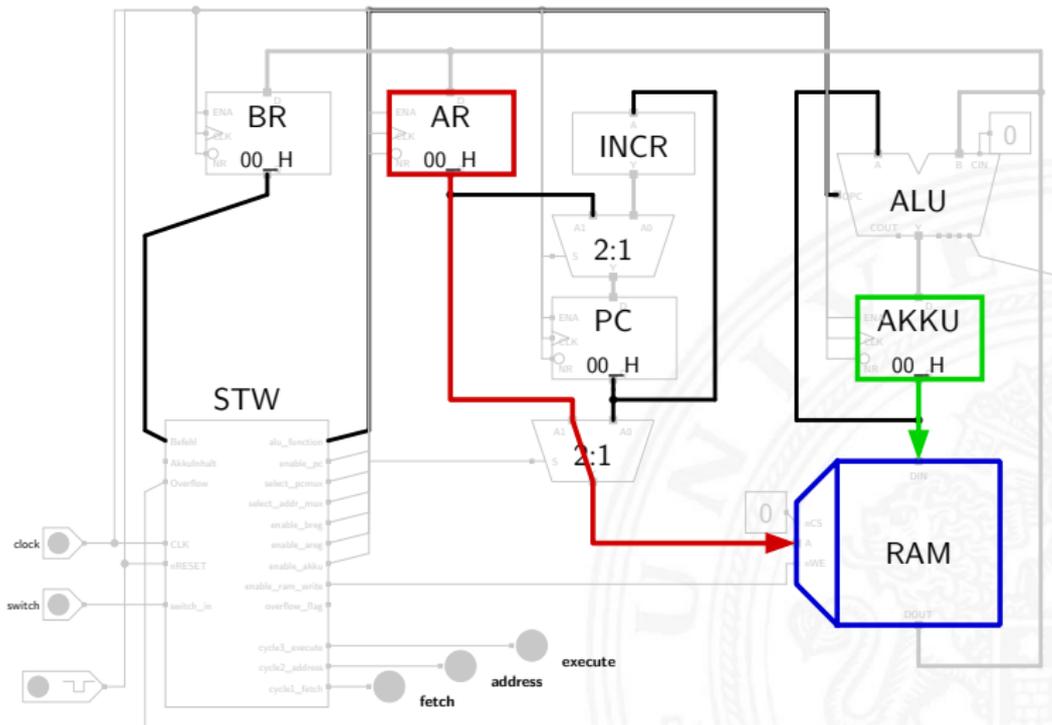


# PRIMA: speichern

RAM[AR] = Akku

1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



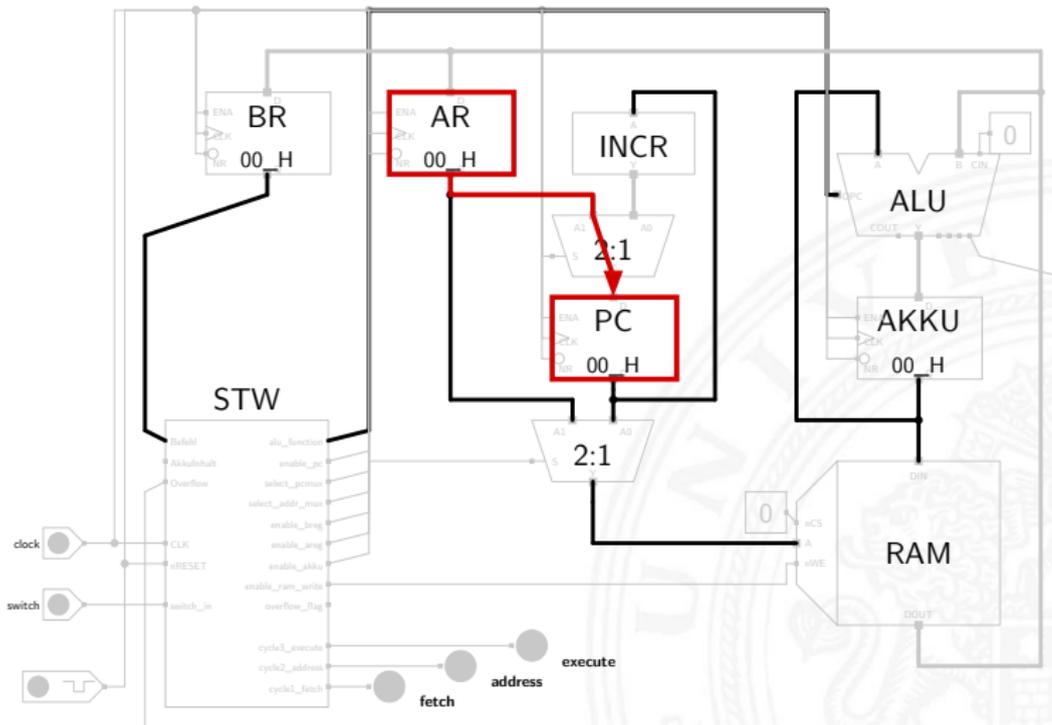


# PRIMA: springen

PC = AR

1.1 Einführung - von-Neumann Konzept

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



später dazu mehr...

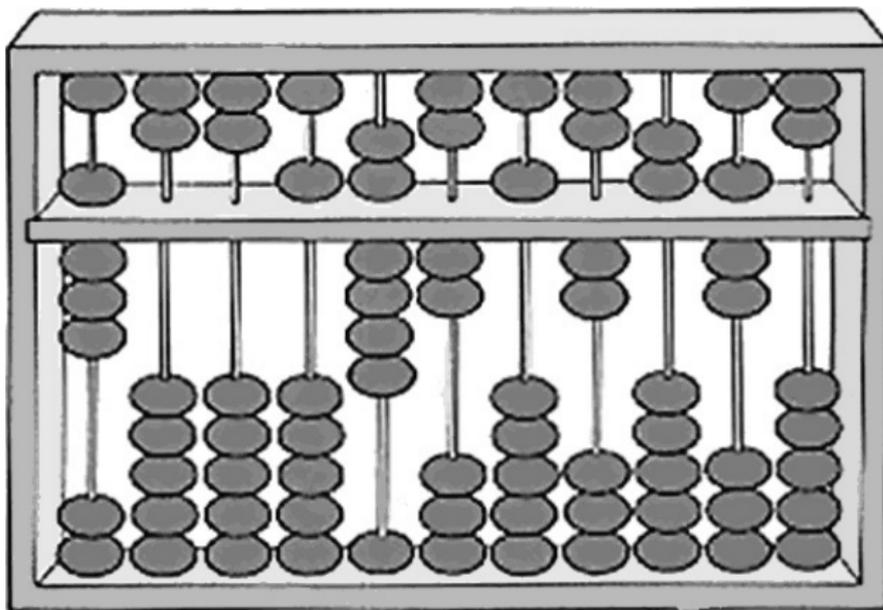
- ???? Abakus als erste Rechenhilfe
- 1642 Pascal: Addierer/Subtrahierer
- 1671 Leibniz: Vier-Operationen-Rechenmaschine
- 1837 Babbage: Analytical Engine
  
- 1937 Zuse: Z1 (mechanisch)
- 1939 Zuse: Z3 (Relais, Gleitkomma)
- 1941 Atanasoff & Berry: ABC (Röhren, Magnettrommel)
- 1944 Mc-Culloch Pitts (Neuronenmodell)
- 1946 Eckert & Mauchly: ENIAC (Röhren)
- 1949 Eckert, Mauchly, von Neumann: EDVAC  
(erster speicherprogrammierter Rechner)
- 1949 Manchester Mark-1 (Indexregister)

Wert in Spalte

8 0 0 5 14 2 5 2 10 7 0

Kugel = 5

Kugel = 1



Zehnerpotenz  
der Spalte

$10^{10}$   $10^9$   $10^8$   $10^7$   $10^6$   $10^5$   $10^4$   $10^3$   $10^2$   $10^1$   $10^0$



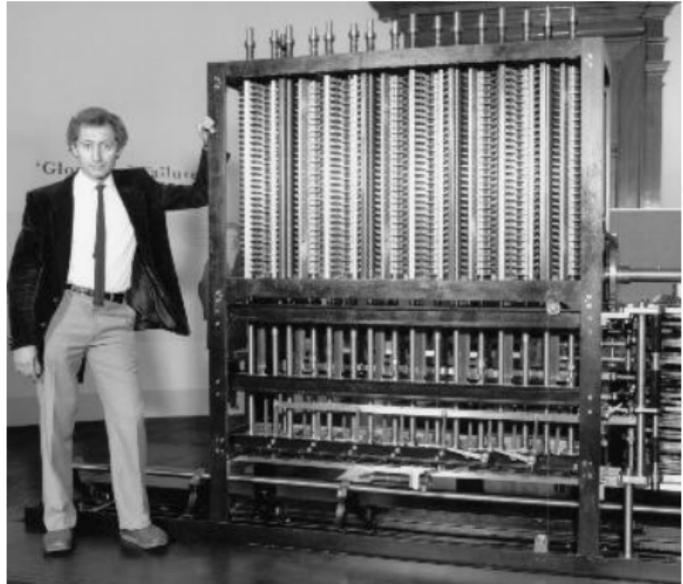
- 1623 Schickard: Sprossenrad, Addierer/Subtrahierer
- 1642 Pascal: „Pascalene“
- 1673 Leibniz: Staffelwalze, Multiplikation/Division
- 1774 Philipp Matthäus Hahn: erste gebrauchsfähige „4-Spezies“-Maschine

# Difference Engine

## Charles Babbage 1822: Berechnung nautischer Tabellen

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



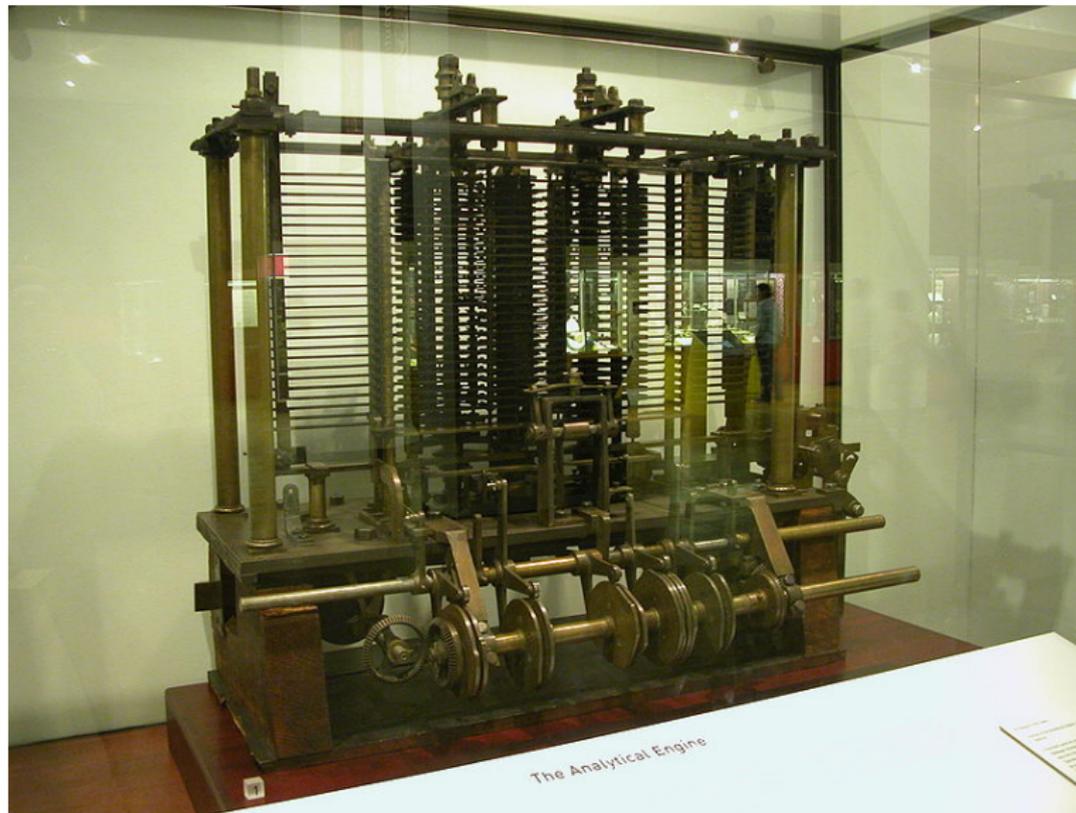
Original von 1832 und Nachbau von 1989, London Science Museum

# Analytical Engine

Charles Babbage 1837-1871: frei programmierbar, Lochkarten, unvollendet

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

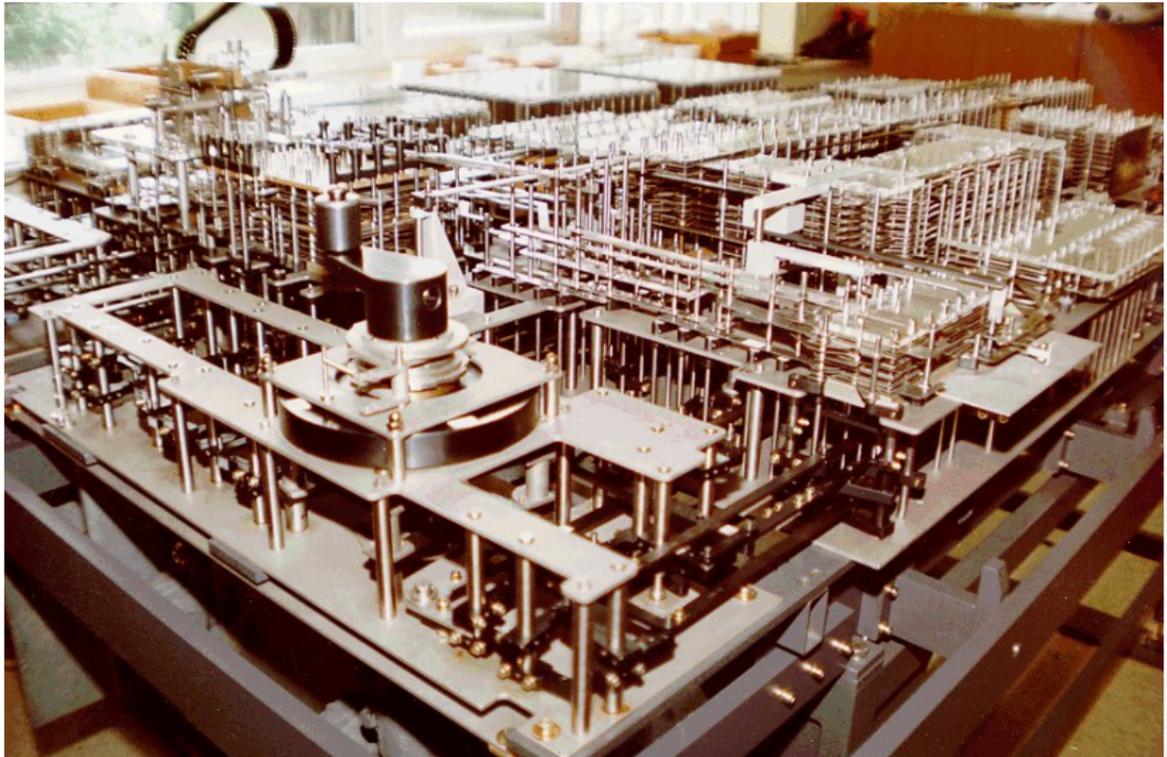


# Zuse Z1

Konrad Zuse 1937: 64 Register, 22-bit, mechanisch, Lochfilm

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

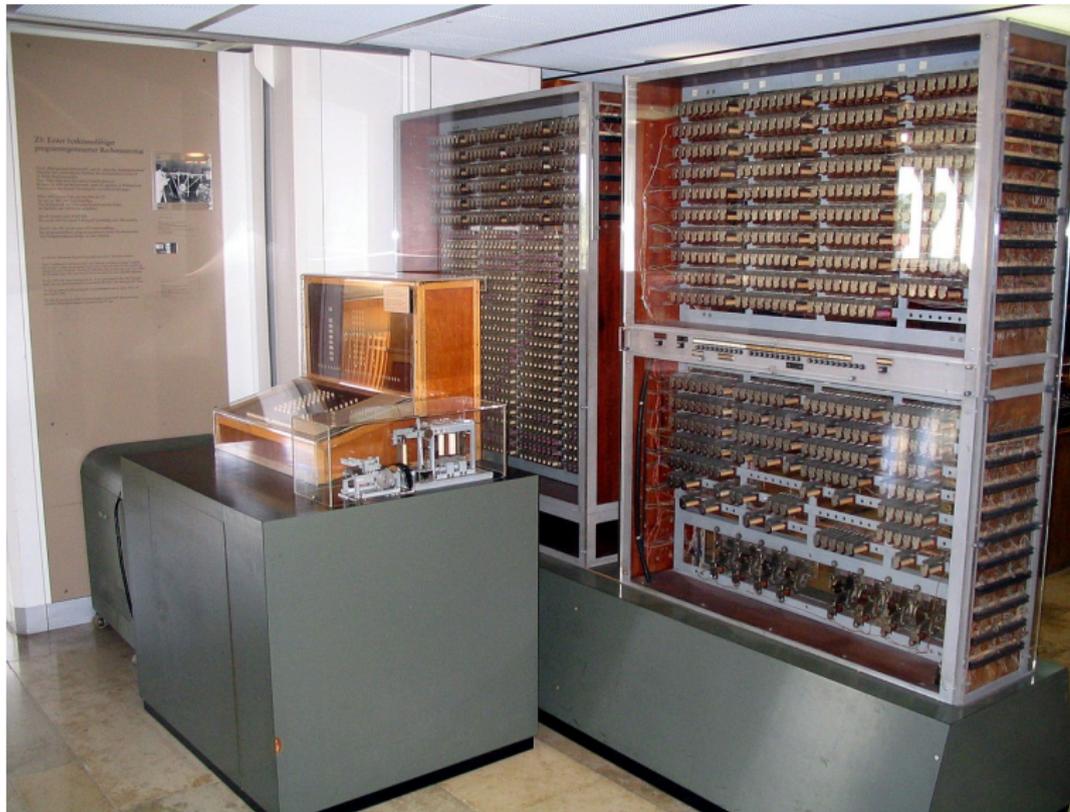


# Zuse Z3

Konrad Zuse 1941, 64 Register, 22-bit, 2000 Relays, Lochfilm

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

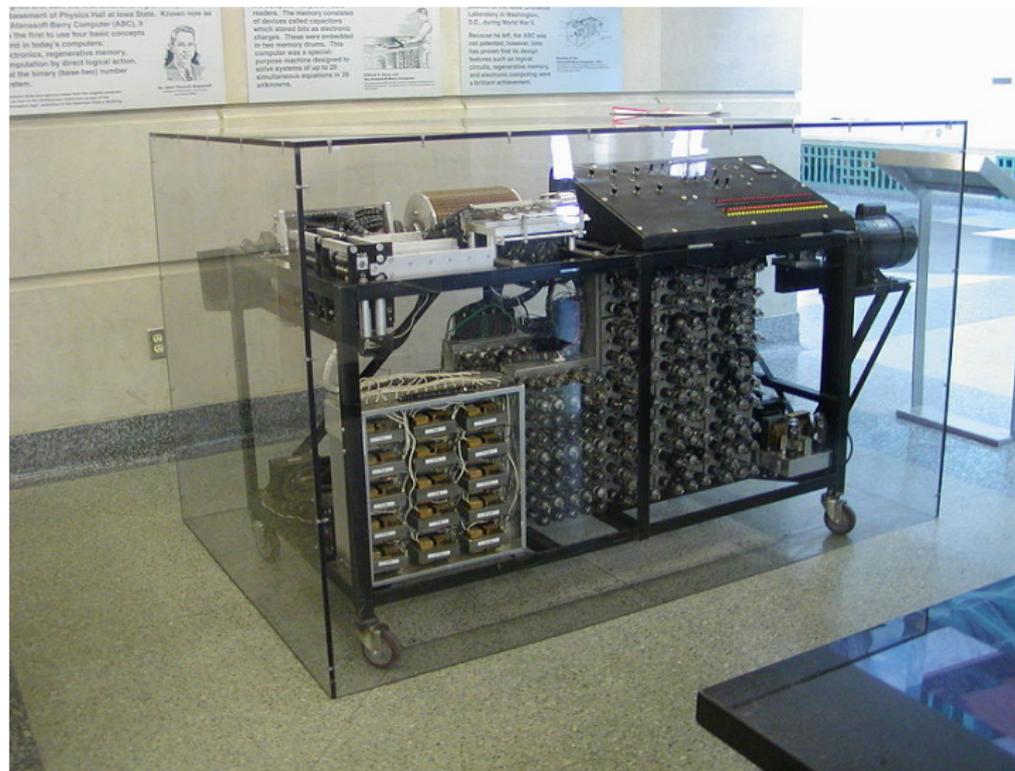


# Atanasoff-Berry Computer (ABC)

J.V. Atanasoff 1942: 50-bit Festkomma, Röhren und Trommelspeicher, fest programmiert

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

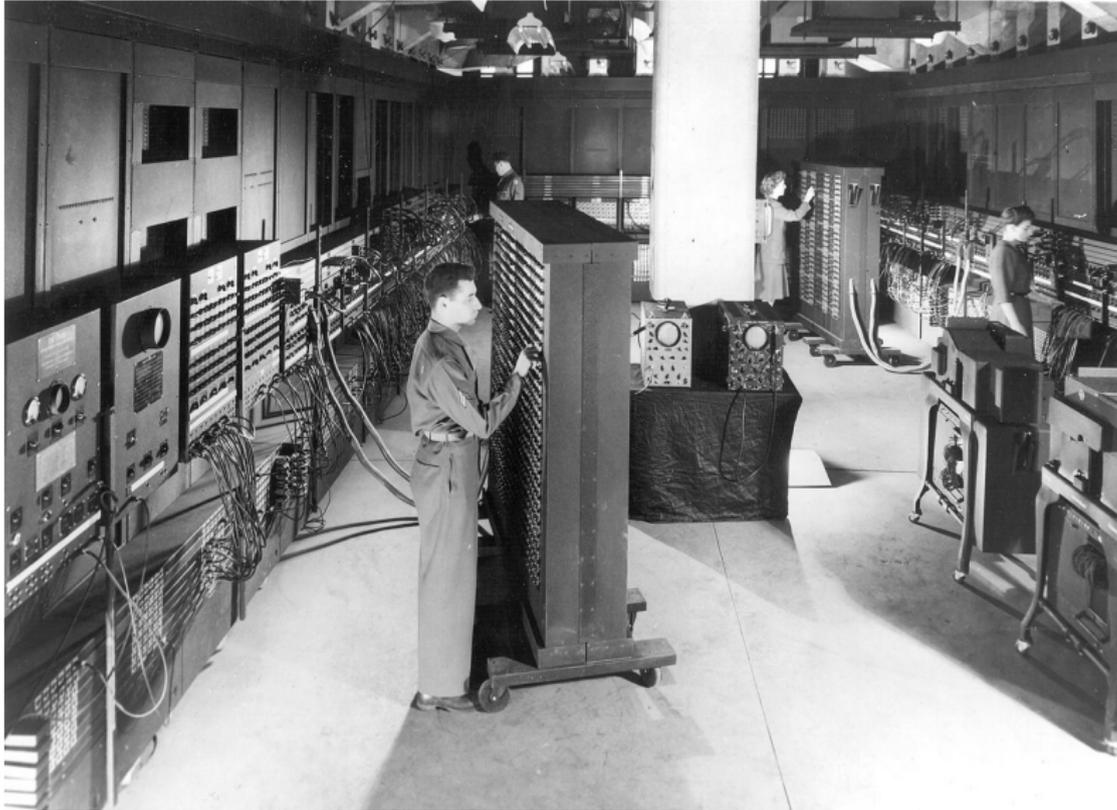


# ENIAC – Electronic Numerical Integrator and Computer

Mauchly & Eckert, 1946: Röhren, Steckbrett-Programm

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme





# EDVAC

Mauchly, Eckert & von Neumann, 1949: Röhren, speicherprogrammiert

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

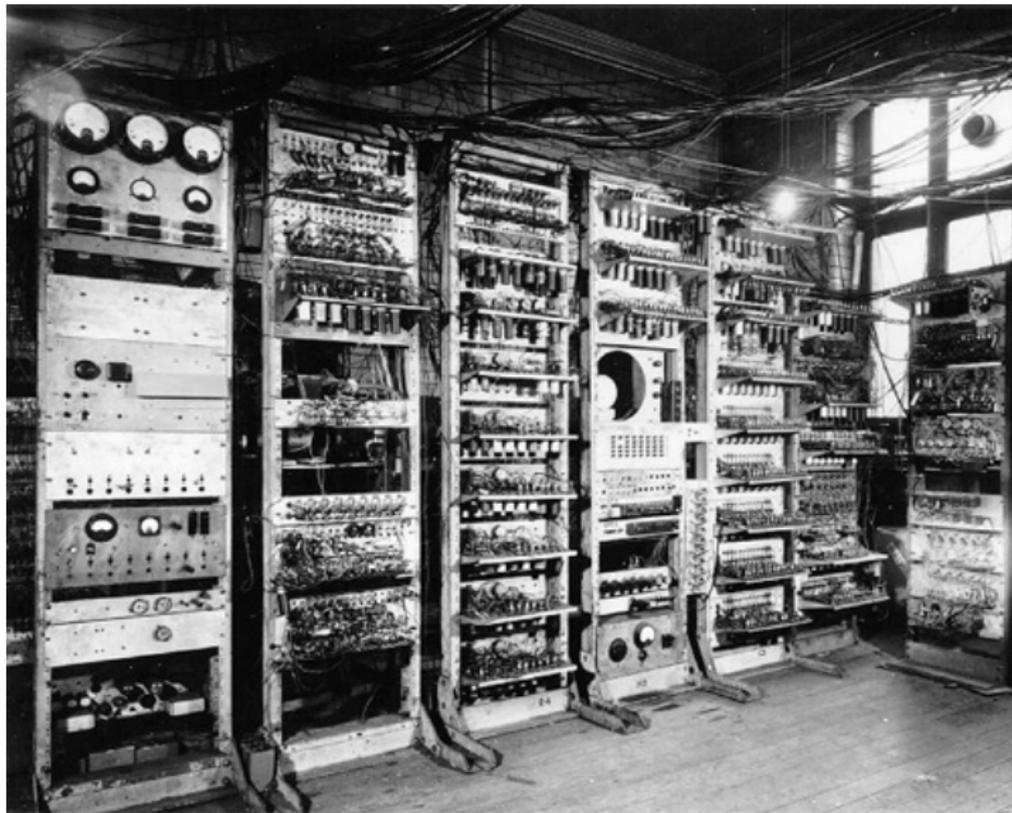


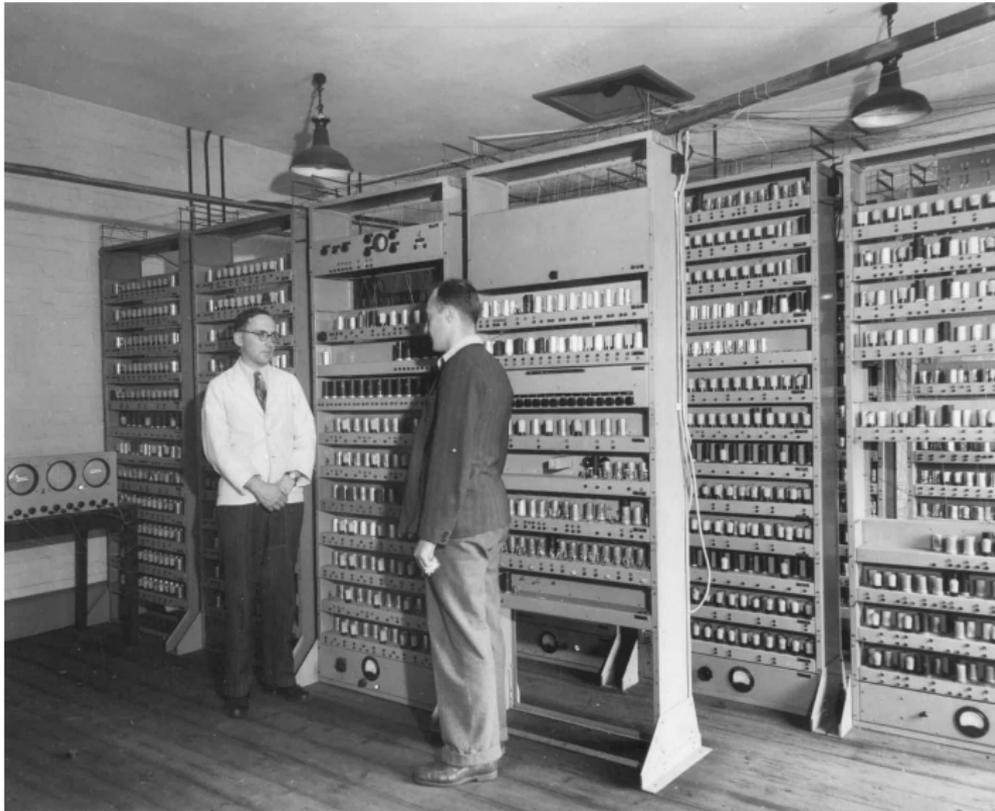
# Manchester Mark-1

Williams & Kilburn, 1949: Trommelspeicher, Indexregister

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme





- ▶ zunächst noch kaum Softwareunterstützung
- ▶ nur zwei Schichten:
  1. Programmierung in elementarer Maschinensprache (ISA level)
  2. Hardware in Röhrentechnik (device logic level)
    - Hardware kompliziert und unzuverlässig

## Mikroprogrammierung (Maurice Wilkes, Cambridge, 1951):

- ▶ Programmierung in komfortabler Maschinensprache
- ▶ Mikroprogramm-Steuerwerk (Interpreter)
- ▶ einfache, zuverlässigere Hardware
- ▶ Grundidee der sog. **CISC**-Rechner (68000, 8086, VAX)

- ▶ erste Rechner jeweils nur von einer Person benutzt
  - ▶ Anwender = Programmierer = Operator
  - ▶ Programm laden, ausführen, Fehler suchen usw.
- ⇒ Maschine wird nicht gut ausgelastet
- ⇒ Anwender mit lästigen Details überfordert

## Einführung von **Betriebssystemen**

- ▶ „system calls“
- ▶ Batch-Modus: Programm abschicken, warten
- ▶ Resultate am nächsten Tag abholen

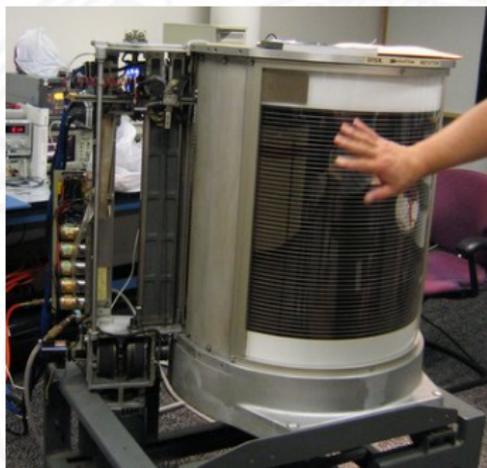
- ▶ Erfindung des Transistors 1948
- ▶ schneller, zuverlässiger, sparsamer als Röhren
- ▶ Miniaturisierung und dramatische Kostensenkung
  
- ▶ Beispiel Digital Equipment Corporation PDP-1 (1961)
  - ▶ 4Ki Speicher (4096 Worte à 18-bit)
  - ▶ 200 KHz Taktfrequenz
  - ▶ 120 000 \$
  - ▶ Grafikdisplay: erste Computerspiele
- ▶ Nachfolger PDP-8: 16 000 \$
  - ▶ erstes Bussystem
  - ▶ 50 000 Stück verkauft

J. Bardeen, W. Brattain, W. Shockley



## Massenspeicher bei frühen Computern

- ▶ Lochkarten
  - ▶ Lochstreifen
  - ▶ Magnetband
  
  - ▶ Magnettrommel
  - ▶ Festplatte
- IBM 350 RAMAC (1956)  
5 MByte, 600 ms Zugriffszeit



- ▶ Erfindung der integrierten Schaltung 1958 (Noyce, Kilby)
- ▶ Dutzende. . . Hunderte. . . Tausende Transistoren auf einem Chip
- ▶ IBM Serie-360: viele Maschinen, ein einheitlicher Befehlssatz
- ▶ volle Softwarekompatibilität

Eigenschaft	Model 30	Model 40	Model 50	Model 65
Rel. Leistung [Model 30]	1	3,5	10	21
Zykluszeit [ns]	1 000	625	500	250
Max. Speicher [KiB]	64	256	256	512
Pro Zyklus gelesene Byte	1	2	4	16
Max. Anzahl von Datenkanälen	3	3	4	6



- ▶ VLSI = *Very Large Scale Integration*
- ▶ ab 10 000 Transistoren pro Chip
  
- ▶ gesamter Prozessor passt auf einen Chip
- ▶ steigende Integrationsdichte erlaubt immer mehr Funktionen

1972 Intel 4004: erster Mikroprozessor

1975 Intel 8080, Motorola 6800, MOS 6502 ...

1981 IBM PC („personal computer“) mit Intel 8088

...

- ▶ Massenfertigung erlaubt billige Prozessoren (< 1\$)
- ▶ Miniaturisierung ermöglicht mobile Geräte

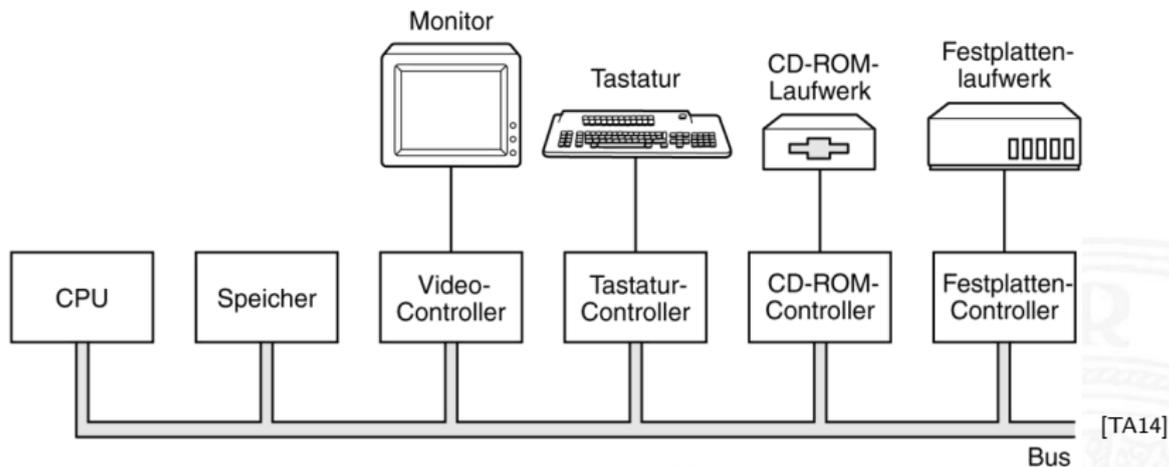
# Xerox Alto: first workstation

1.2 Einführung - Exkurs: Geschichte

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



# Personal Computer: Aufbau des IBM PC (1981)

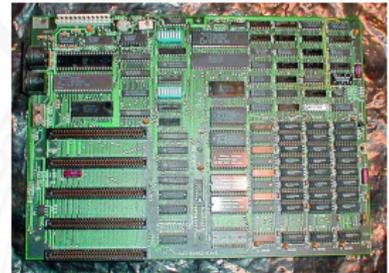
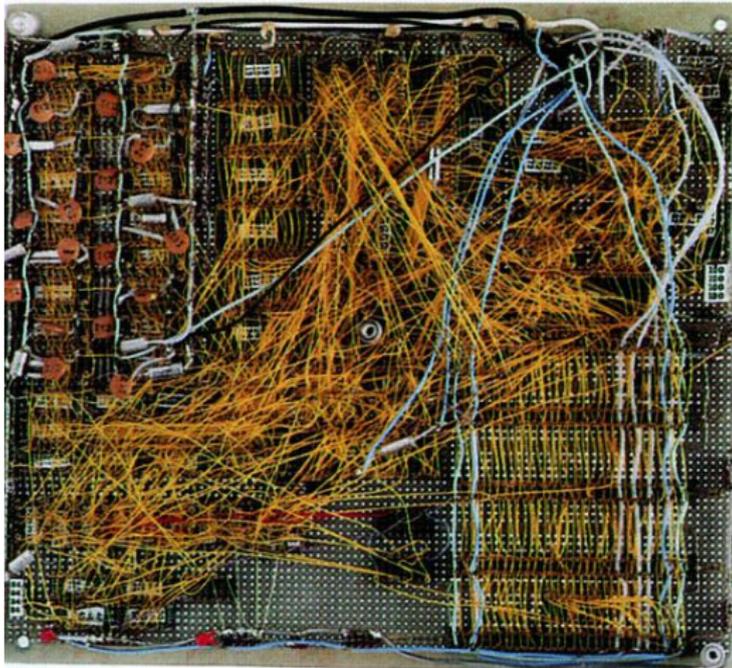


- ▶ Intel 8086/8088, 512 KByte RAM, Betriebssystem MS-DOS
- ▶ alle Komponenten über den zentralen (ISA-) Bus verbunden
- ▶ Erweiterung über Einsteckkarten

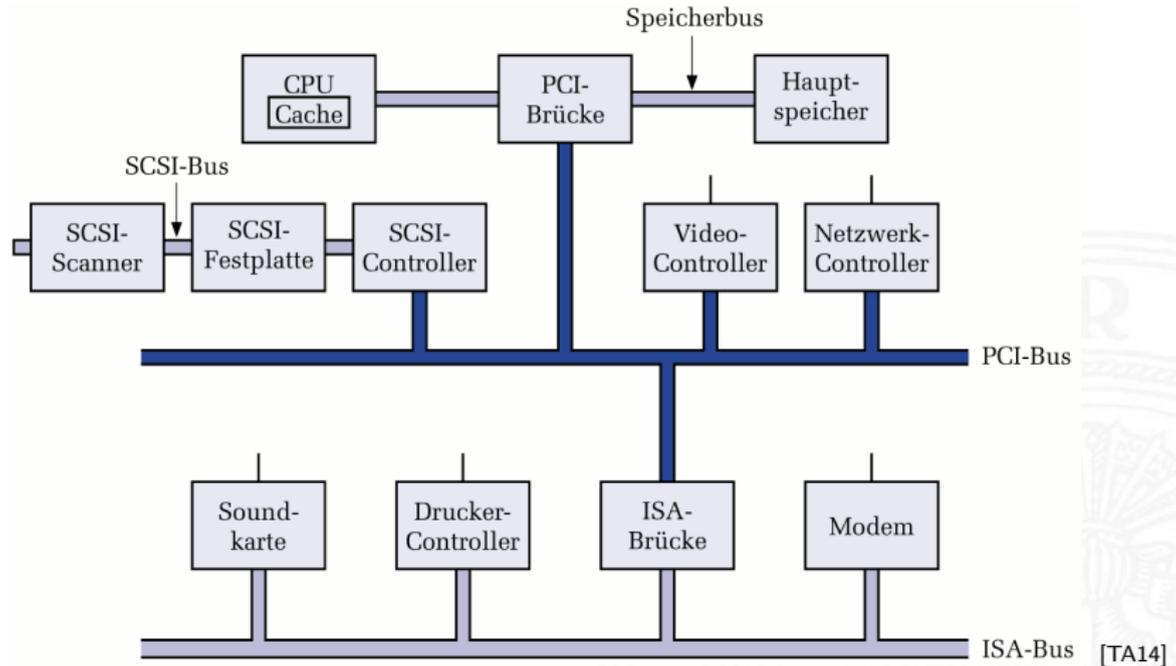
# PC Prototyp (1981) und Hauptplatine

1.3 Einführung - Personal Computer

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



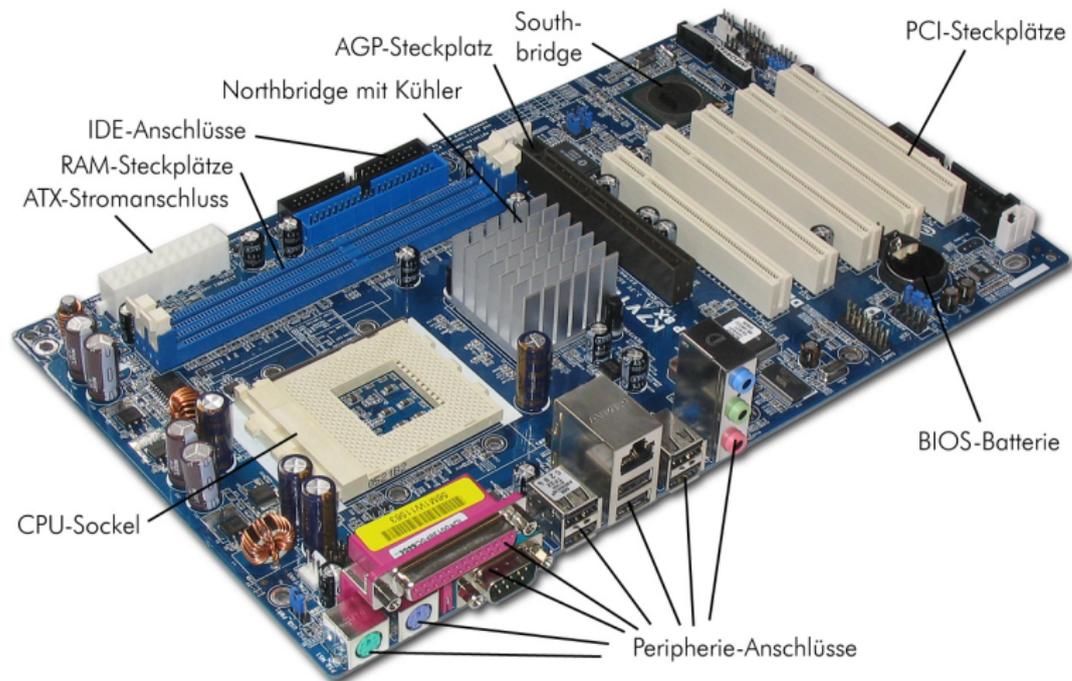
# Aufbau mit PCI-Bus (2000)



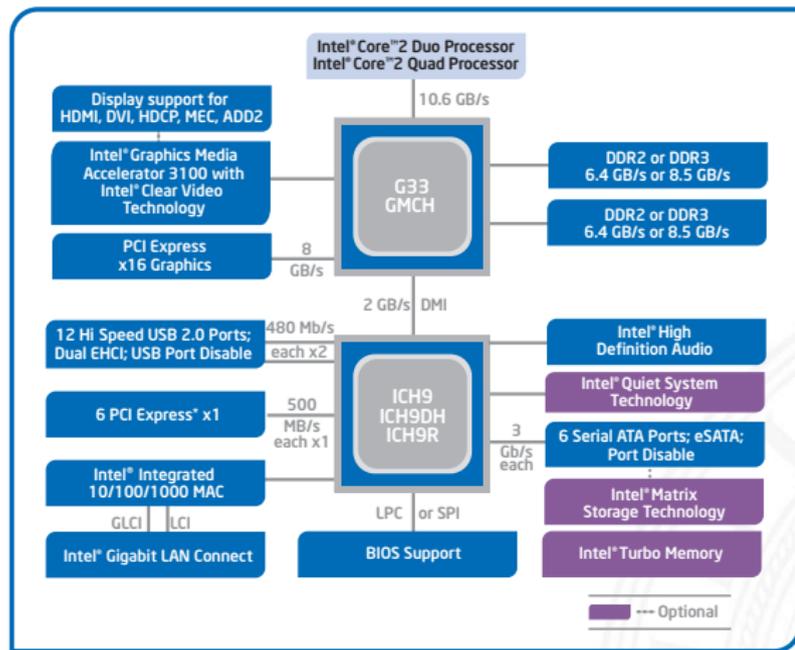
# Hauptplatine (2005)

1.3 Einführung - Personal Computer

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

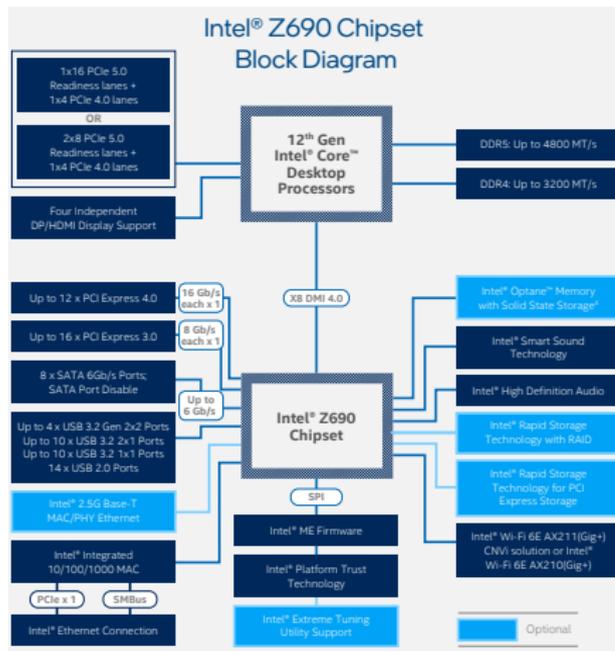


[de.wikibooks.org/wiki/Computerhardware\\_für\\_Anfänger](http://de.wikibooks.org/wiki/Computerhardware_für_Anfänger)



Intel ark.intel.com

- ▶ Mehrkern-Prozessoren („dual-/quad-/octa-core“)
- ▶ schnelle serielle Direktverbindungen statt PCI/ISA Bus



Intel ark.intel.com

- ▶ Speichercontroller und externe Anbindung (PCI Express) in CPU
- ▶ Grafikprozessor in CPU

## ► Anzahl an Systemen / Prozessoren – weltweit

System	Anzahl (geschätzt!)
PCs, Workstation, Server	2 Milliarden
Tablets	1,3 Milliarden
Smartphones	4,8 Milliarden
„Embedded Systems“	75-100 Milliarden

## ► Preis des Prozessors

Typ	Preis [\$]	Beispielanwendung
Wegwerfcomputer	0,5	Glückwunschkarten
Mikrocontroller	5	Uhren, Geräte, Autos
Mobile Computer und Spielkonsolen	50	Smartphones, Tablets, Heimvideospiele
Personalcomputer	500	Desktop- oder Notebook-Computer
Server	5 000	Netzwerkserver
Workstation Verbund	50 000 – 500 000	Abteilungsrechner (Minisupercomp.)
Großrechner (Mainframe)	5 Millionen	Batch-Verarbeitung in einer Bank
Supercomputer	> 50 Millionen	Klimamodelle, Simulationen

- ▶ bessere Technologie ermöglicht immer kleinere Transistoren
  - ▶ Materialkosten sind proportional zur Chipfläche
- ⇒ bei gleicher Funktion kleinere und billigere Chips
- ⇒ bei gleicher Größe leistungsfähigere Chips

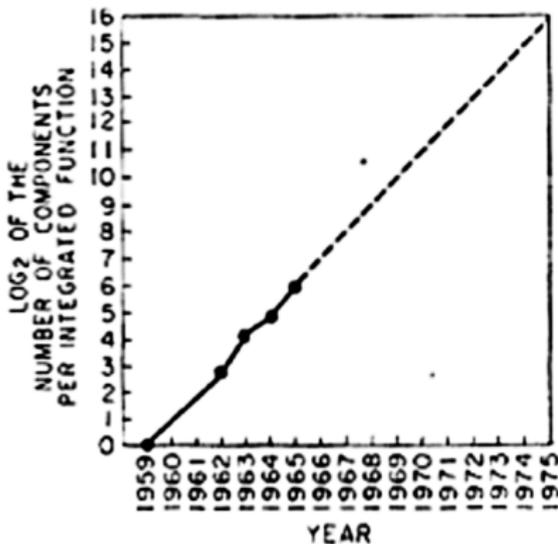
## Moore's Law

Gordon Moore, Mitgründer von Intel, 1965

Speicherkapazität von ICs vervierfacht sich alle drei Jahre

- ⇒ schnelles **exponentielles Wachstum**
- ▶ klares Kostenoptimum bei hoher Integrationsdichte
  - ▶ trifft auch auf Prozessoren zu

# Moore's Law (cont.)

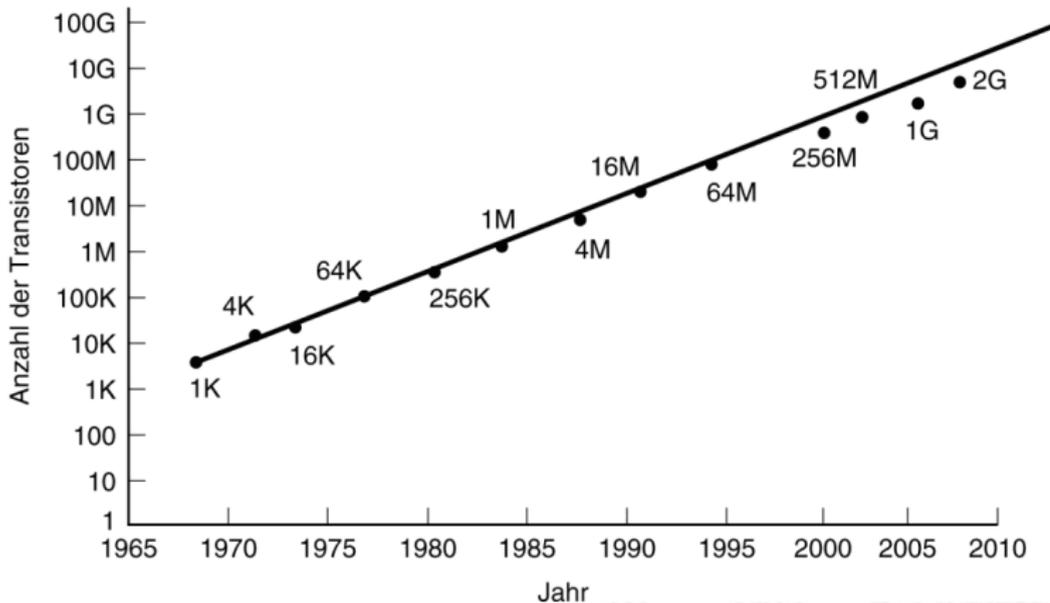


Gordon Moore, 1965, [Moo65]:  
*Cramming more components onto integrated circuits*

*Wird das so weitergehen?*

- ▶ Vorhersage gilt immer noch
- ▶ „IRDS“ Prognosen bis zum Jahr 2034 [IRDS20]

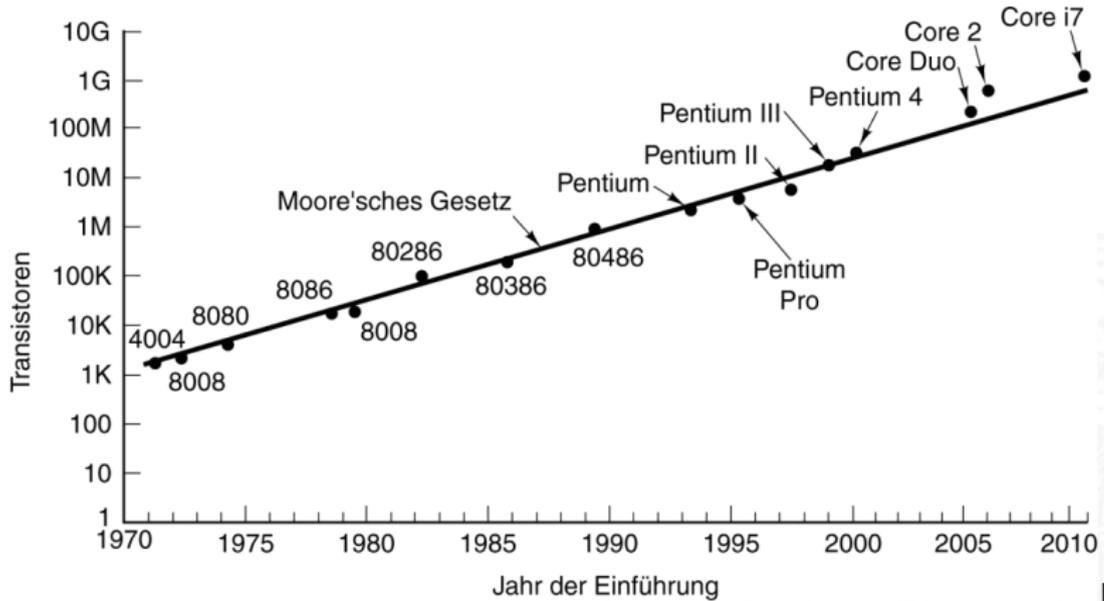
# Moore's Law: Transistoren pro Speicherchip



[TA14]

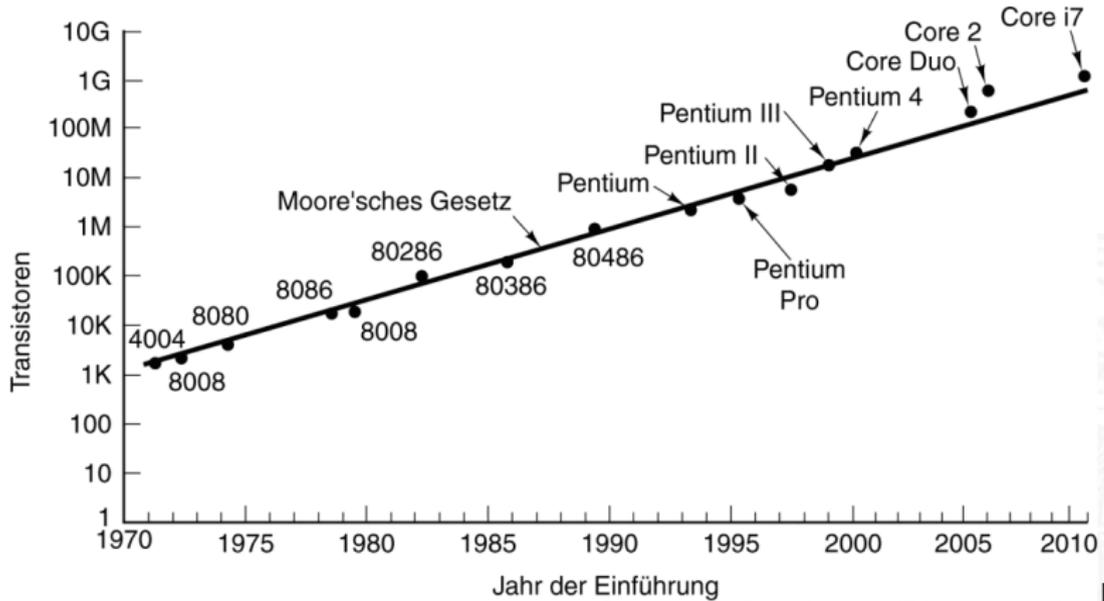
- ▶ Vorhersage: 60% jährliches Wachstum der Transistoranzahl pro IC  
Verdopplung alle 18 Monate (12...24 Monate)

# Moore's Law: Evolution der Prozessoren



[TA14]

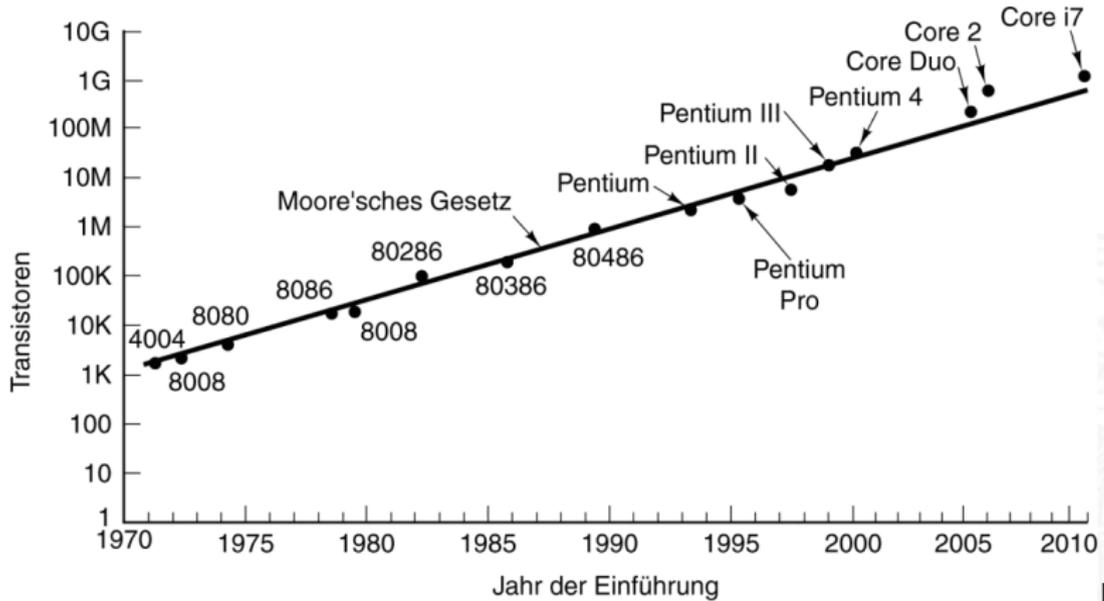
# Moore's Law: Evolution der Prozessoren



[TA14]

Modell		Typ	Jahr	# Trans.
M1	Apple	CPU	2020	16,0 Mrd.
AWS Graviton2	AWS	CPU	2019	30,0 Mrd.

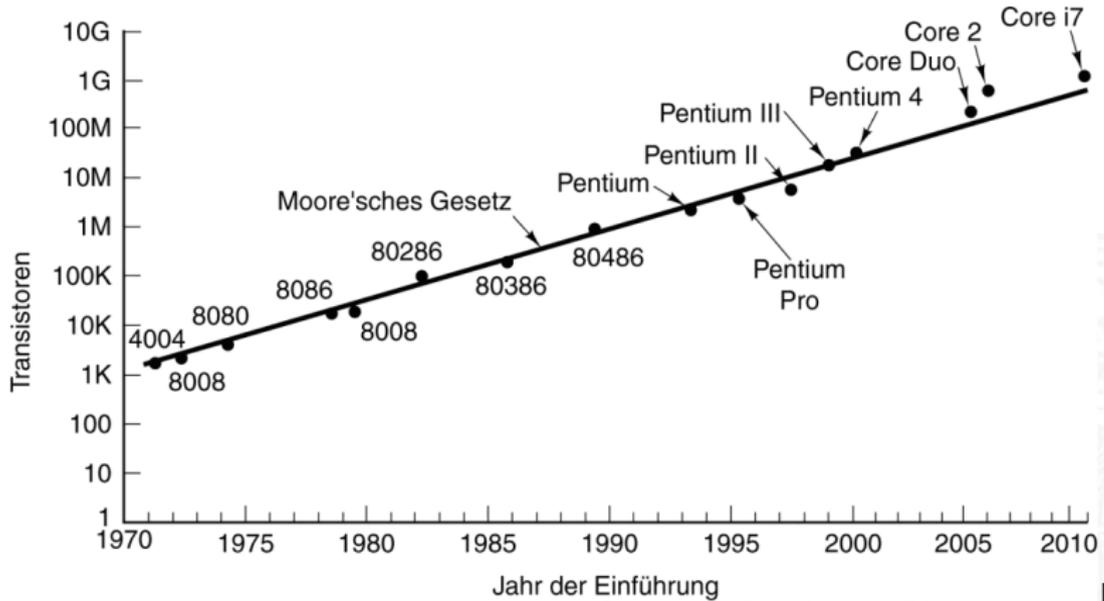
# Moore's Law: Evolution der Prozessoren



[TA14]

Modell		Typ	Jahr	# Trans.
M1	Apple	CPU	2020	16,0 Mrd.
AWS Graviton2	AWS	CPU	2019	30,0 Mrd.
HiSilicon Kirin 9000	Huawei	SOC	2020	15,3 Mrd.

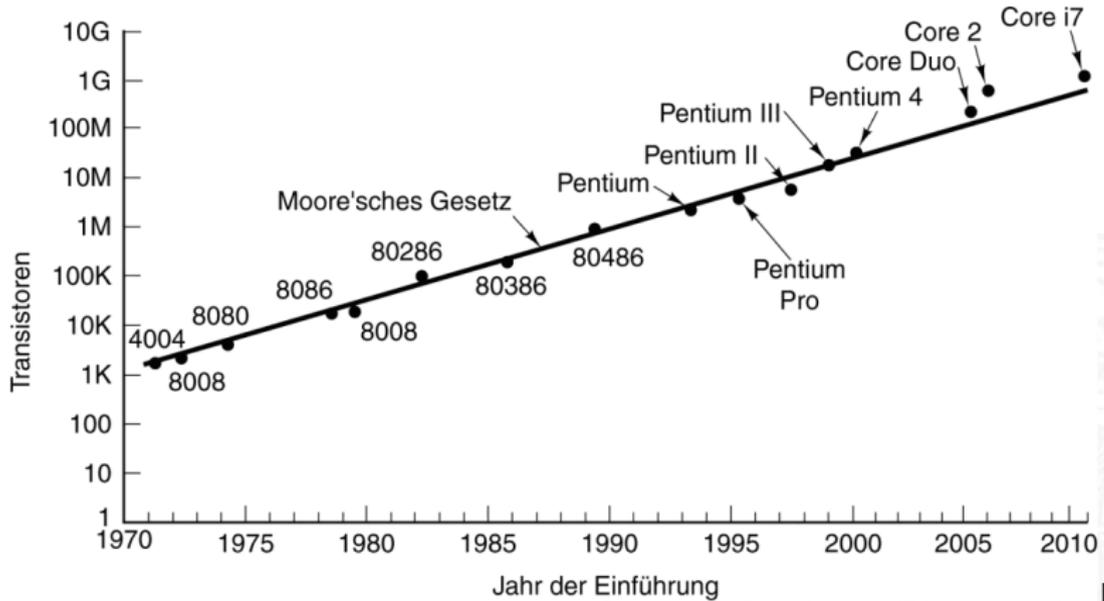
# Moore's Law: Evolution der Prozessoren



[TA14]

Modell		Typ	Jahr	# Trans.
M1	Apple	CPU	2020	16,0 Mrd.
AWS Graviton2	AWS	CPU	2019	30,0 Mrd.
HiSilicon Kirin 9000	Huawei	SOC	2020	15,3 Mrd.
GA100 Ampere	Nvidia	GPU	2020	54,0 Mrd.

# Moore's Law: Evolution der Prozessoren



[TA14]

Modell		Typ	Jahr	# Trans.
M1	Apple	CPU	2020	16,0 Mrd.
AWS Graviton2	AWS	CPU	2019	30,0 Mrd.
HiSilicon Kirin 9000	Huawei	SOC	2020	15,3 Mrd.
GA100 Ampere	Nvidia	GPU	2020	54,0 Mrd.
Versal VP 1802	Xilinx	FPGA	2021	≈ 92,0 Mrd.

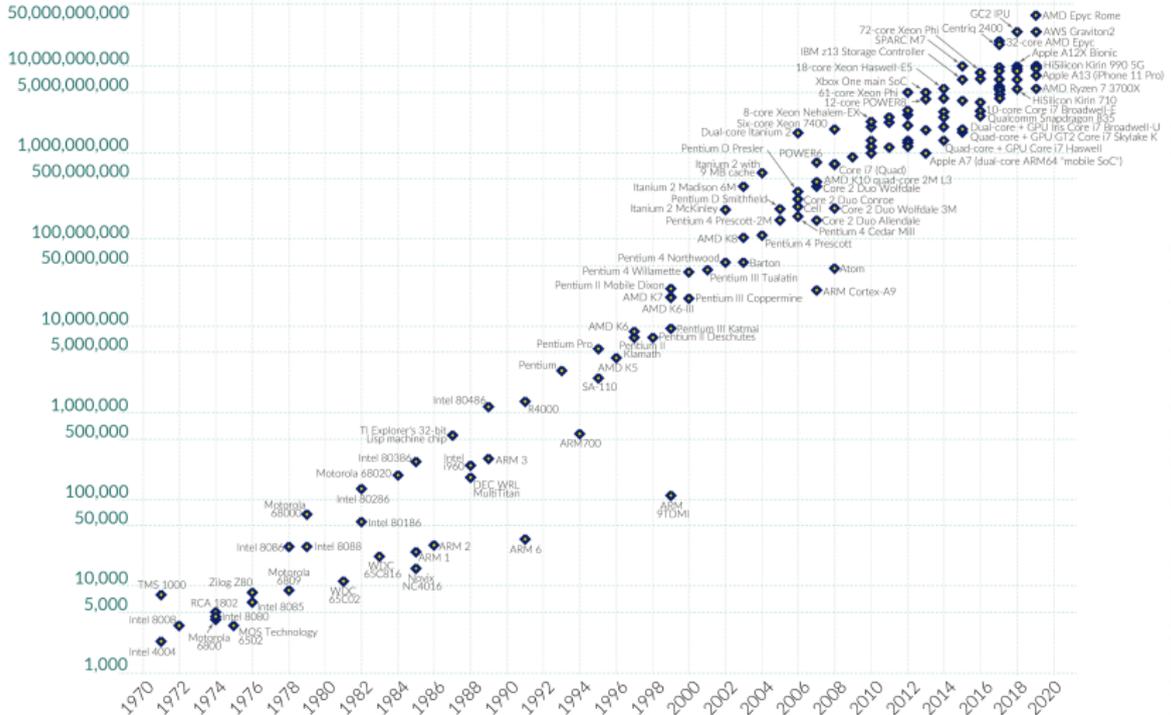
# Moore's Law: Evolution der Prozessoren (cont.)

## Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Our World  
in Data

### Transistor count

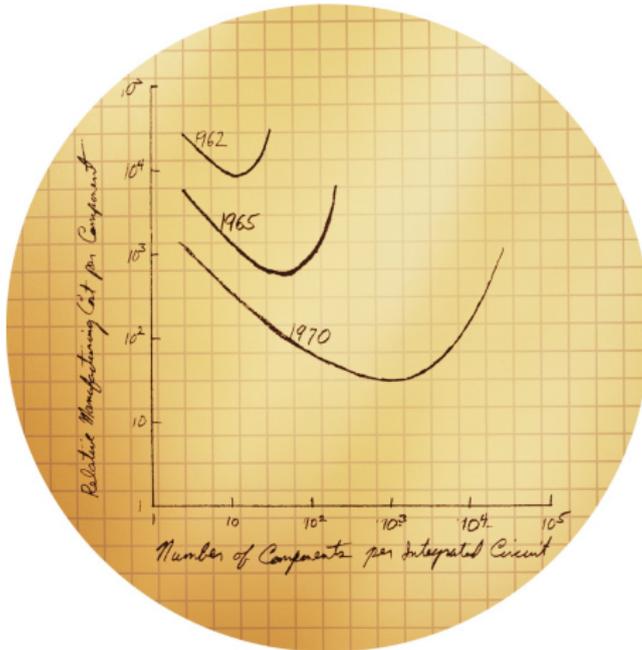


Data source: Wikipedia ([wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://wikipedia.org/wiki/Transistor_count))

OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

# Moore's Law: Kosten pro Komponente



Originalskizze von G. Moore [Intel]

$$L(t) = L(0) \cdot 2^{t/18}$$

mit:  $L(t)$  = Leistung zum Zeitpunkt  $t$ ,  
 $L(0)$  = Leistung zum Zeitpunkt 0,  
und Zeit  $t$  in Monaten.

Einige Formelwerte:

Jahr 1:	1,5874
Jahr 2:	2,51984
Jahr 3:	4
Jahr 5:	10,0794
Jahr 6:	16
Jahr 7:	25,3984
Jahr 8:	40,3175

# Leistungssteigerung der Spitzenrechner seit 1993

[www.top500.org](http://www.top500.org) [de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer](http://de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer)

Jahr	Rechner	CPU	Linpack [TFlop/s]	Prozessoren
1993	TMC CM-5/1024	(SuperSparc 32MHz)	0,0597	1 024
1994	Intel XP/S140	(80860 50MHz)	0,1434	3 680
1995	Fujitsu NWT	(105 MHz)	0,17	140
1996	Hitachi SR2201/1024	(HARP-1E 120MHz)	0,2204	1 024
1997	Intel ASCI Red	(Pentium Pro 200MHz)	1,068	7 264
1999	Intel ASCI Red	(Pentium Pro 333MHz)	2,121	9 472
2001	IBM ASCI White	(Power3 375MHz)	7,226	8 192
2002	NEC Earth Simulator	(NEC 1GHz)	35,86	5 120
2005	IBM BlueGene/L	(PowerPC 440 2C 700MHz)	136,8	65 536
2006	IBM BlueGene/L	(PowerPC 440 2C 700MHz)	280,6	131 072
2008	IBM Roadrunner (Opteron 2C 1,8GHz + IBM Cell 9C 3,2 GHz)		1 026,0	122 400
2010	Cray XT5-HE Jaguar	(Opteron 6C 2,6GHz)	1 759,0	224 162
2011	Fujitsu K computer	(SPARC64 VIIIfx 2.0GHz)	8 162,0	548 352
2012	IBM SuperMUC	(Xeon E5-2680 8C 2,7GHz)	2 897,0	147 456
2012	IBM BlueGene/Q Sequoia	(Power BQC 16C 1,6GHz)	16 324,8	1 572 864
2013	IBM BlueGene/Q JUQUEEN	(Power BQC 16C 1,6GHz)	5 008,9	458 752
2013	NUDT Tianhe-2 (Xeon E5-2692 12C 2,2 GHz + Xeon Phi 31S1P)		33 862,7	3 120 000
2016	Sunway TaihuLight (Sunway SW26010 260C 1,45 GHz)		93 014,6	10 649 600
2018	Summit (IBM Power9 22C 3,07 GHz + NVIDIA GV100)		143 500,0	2 397 824
2021	JUWELS [D #8] (Epyc 7404 24C 2,8 GHz + NVIDIA A100)		44 120,0	449 280
2021	Fugaku (Fujitsu A64FX 48C 2,2 GHz)		442 010,0	7 630 848

# Leistungssteigerung der Spitzenrechner seit 1993

[www.top500.org](http://www.top500.org) [de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer](http://de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer)

1.4 Einführung - Moore's Law

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

Jahr	Rechner	CPU	Linpack [TFlop/s]	Prozessoren	Power [KW]
1993	TMC CM-5/1024	(SuperSparc 32MHz)	0,0597	1 024	
1994	Intel XP/S140	(80860 50MHz)	0,1434	3 680	
1995	Fujitsu NWT	(105 MHz)	0,17	140	
1996	Hitachi SR2201/1024	(HARP-1E 120MHz)	0,2204	1 024	
1997	Intel ASCI Red	(Pentium Pro 200MHz)	1,068	7 264	
1999	Intel ASCI Red	(Pentium Pro 333MHz)	2,121	9 472	
2001	IBM ASCI White	(Power3 375MHz)	7,226	8 192	
2002	NEC Earth Simulator	(NEC 1GHz)	35,86	5 120	3 200
2005	IBM BlueGene/L	(PowerPC 440 2C 700MHz)	136,8	65 536	716
2006	IBM BlueGene/L	(PowerPC 440 2C 700MHz)	280,6	131 072	1 433
2008	IBM Roadrunner (Opteron 2C 1,8GHz + IBM Cell 9C 3,2 GHz)		1 026,0	122 400	2 345
2010	Cray XT5-HE Jaguar	(Opteron 6C 2,6GHz)	1 759,0	224 162	6 950
2011	Fujitsu K computer	(SPARC64 VIIIfx 2.0GHz)	8 162,0	548 352	9 899
2012	IBM SuperMUC	(Xeon E5-2680 8C 2,7GHz)	2 897,0	147 456	3 423
2012	IBM BlueGene/Q Sequoia	(Power BQC 16C 1,6GHz)	16 324,8	1 572 864	7 890
2013	IBM BlueGene/Q JUQUEEN	(Power BQC 16C 1,6GHz)	5 008,9	458 752	2 301
2013	NUDT Tianhe-2 (Xeon E5-2692 12C 2,2 GHz + Xeon Phi 31S1P)		33 862,7	3 120 000	17 808
2016	Sunway TaihuLight (Sunway SW26010 260C 1,45 GHz)		93 014,6	10 649 600	15 371
2018	Summit (IBM Power9 22C 3,07 GHz + NVIDIA GV100)		143 500,0	2 397 824	9 783
2021	JUWELS [D #8] (Epyc 7404 24C 2,8 GHz + NVIDIA A100)		44 120,0	449 280	1 764
2021	Fugaku (Fujitsu A64FX 48C 2,2 GHz)		442 010,0	7 630 848	29 899

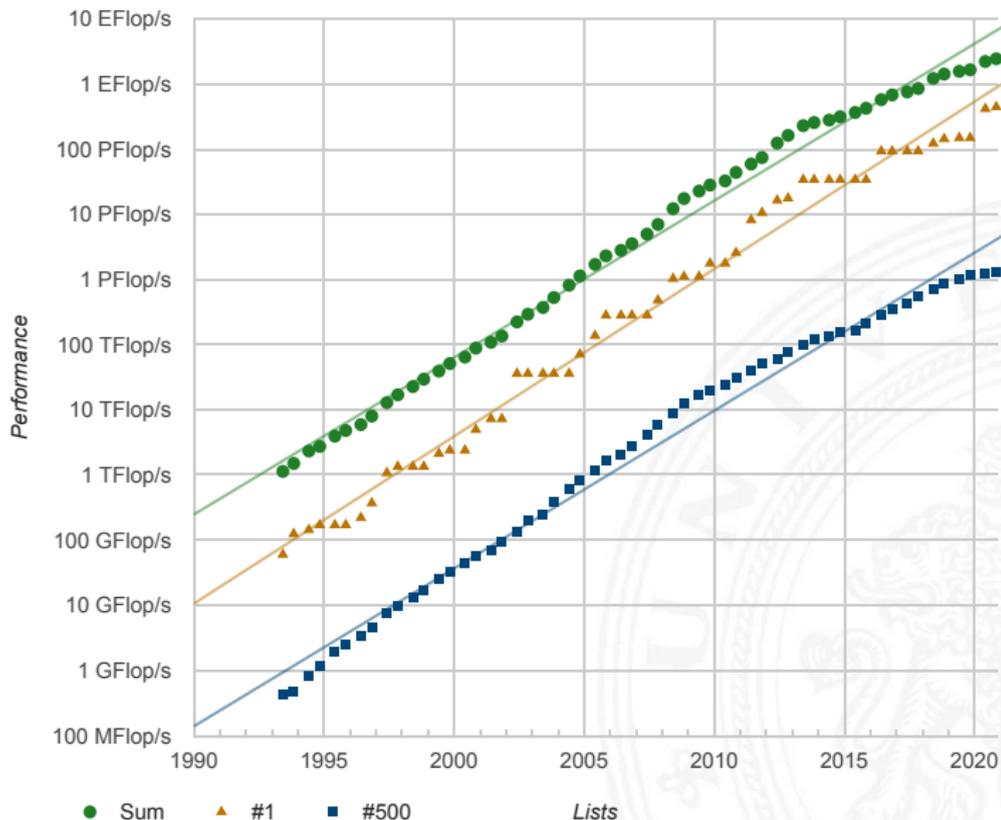


# Leistungssteigerung der Spitzenrechner seit 1993 (cont.)

[www.top500.org](http://www.top500.org) [de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer](https://de.wikipedia.org/wiki/Supercomputer)

1.4 Einführung - Moore's Law

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme



- ▶ Miniaturisierung schreitet weiter fort
- ▶ aber Taktraten erreichen physikalisches Limit
- ▶ steigender Stromverbrauch, zwei Effekte:
  1. Leckströme
  2. proportional zu Taktrate

## Entwicklungen

- ▶ > 4 GByte Hauptspeicher sind Standard
- ▶ 64-bit Adressierung
- ⇒ seit 2011: CPU plus Grafikeinheit
- ⇒ Integration mehrerer CPUs auf einem Chip (2-...32-Cores)
- ⇒ Cache Speicher (SRAM) auf dem Die
- ⇒ Integration von Peripheriegeräten (Speicherinterface, PCIe, ...)
- ⇒ **SoC**: „System on a chip“

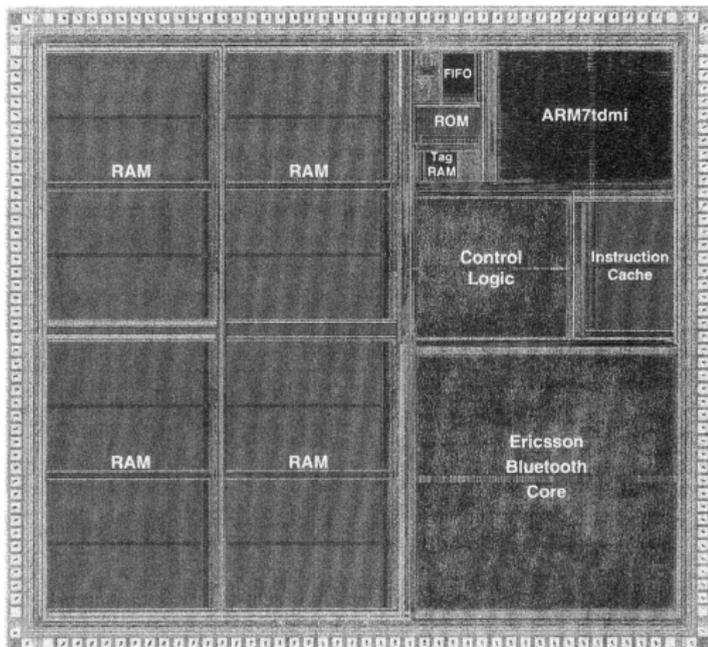


Gesamtes System auf einem Chip integriert:

- ▶ ein oder mehrere Prozessoren, z.T. verschiedene Typen
  - ▶ hohe Rechenleistung
  - ▶ energieeffizient
- ⇒ z.B. ARM mit *big.LITTLE* Konzept
- ▶ Cache Hierarchie: 1-Level D- und I-Cache / 2-Level
- ▶ dedizierte Prozessoren: Grafik, Video(de)codierung, DSP, AI ...
- ▶ Hauptspeicher (evtl. auch extern), Speichercontroller
- ▶ weitere Speicher für Medien/Netzwerkoperationen

- ▶ Peripherieblöcke nach Kundenwunsch konfiguriert:
  - ▶ Displaysteuerung: DP, HDMI ...
  - ▶ A/V-Schnittstellen: Kamera, Mikrofone, Audio ...
  - ▶ serielle und parallele Schnittstellen, SPI, I/O-Pins ...
  - ▶ Feldbusse: I<sup>2</sup>C, CAN ...
  - ▶ PC-like: USB, Firewire, SATA ...
  - ▶ Netzwerk kabelgebunden (Ethernet)
  - ▶ Funkschnittstellen: WLAN, Bluetooth, 5G ...
- ▶ Smartphones, Tablet-Computer, Medien-/DVD-Player, WLAN-Router, NAS-/Home-Server ...

## ▶ Bluetooth-Controller (2000)



© VLSI Technology, Inc. [Fur00]

Prozess	0,25 $\mu\text{m}$
Metall	3-Layer
$V_{DD}$	2,5 V
Transistoren	4,3 Mill.
Chipfläche	20 $\text{mm}^2$
Taktrate	0 ... 13 MHz
MIPS	12
Power	75 mW
MIPS/W	160

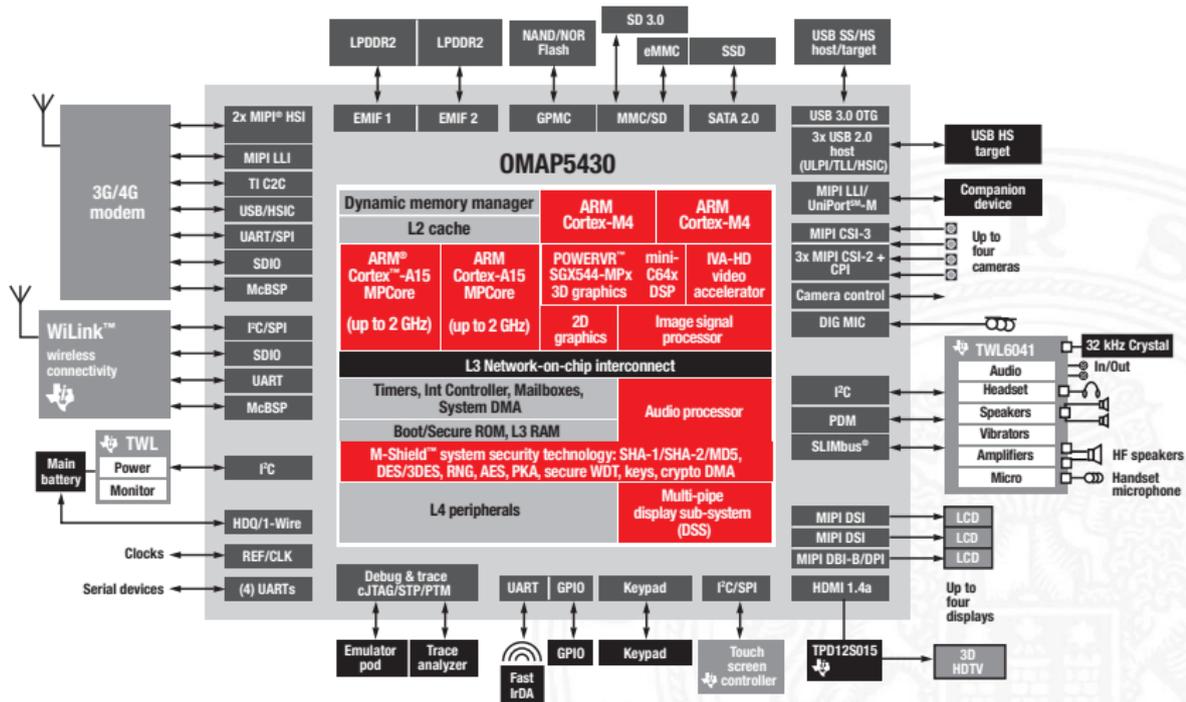
# SoC Beispiele (cont.)

1.5 Einführung - System on a chip

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

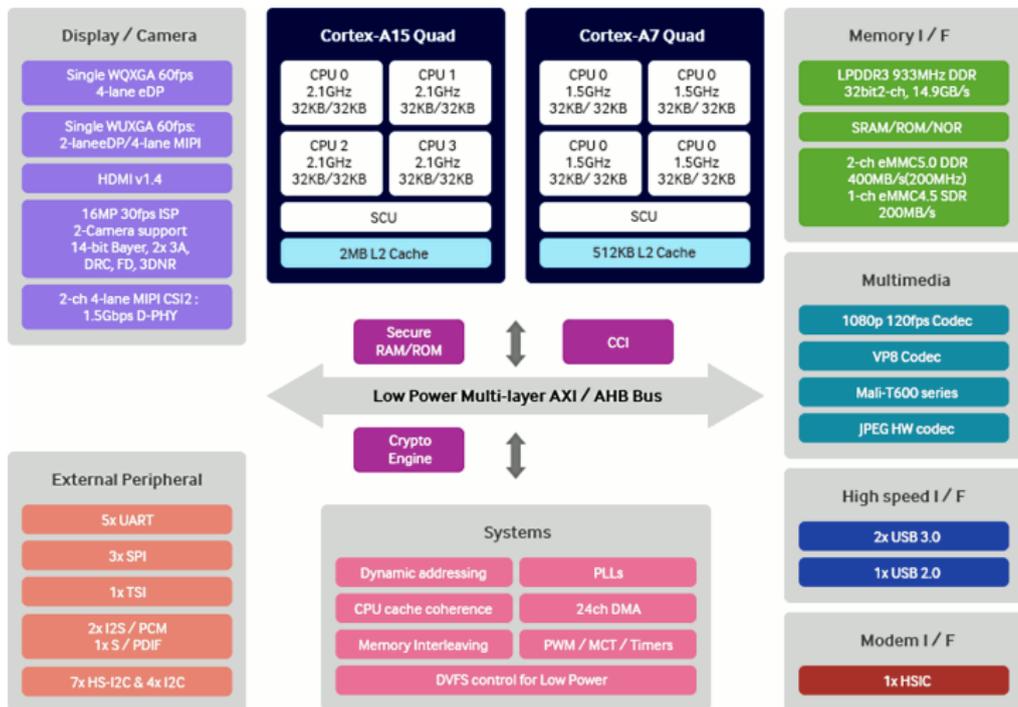
## ► Texas Instruments OMAP 5430 (2011)

[T1]



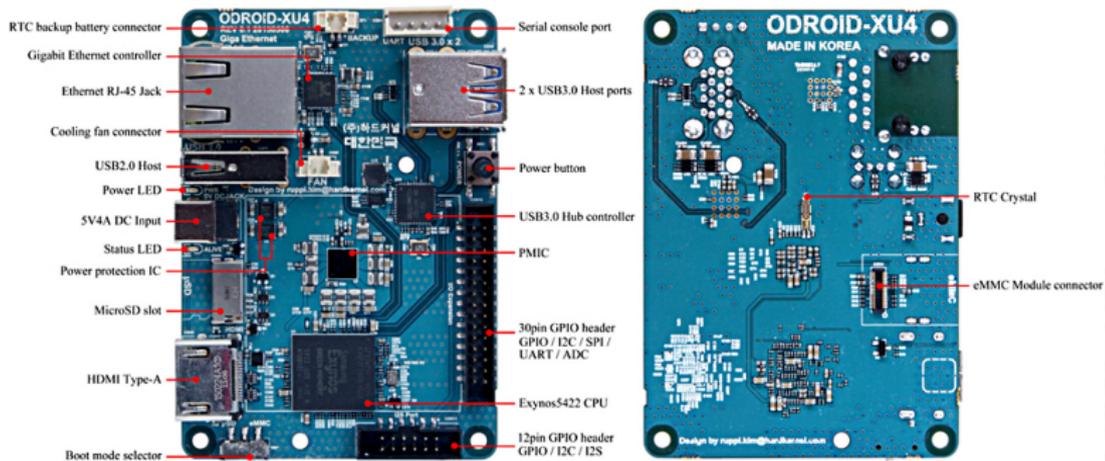
## ► Samsung Exynos-5422 (2014)

[Samsung]



## ▶ Beispiel: Odroid XU4

[HK]



- ▶ vollständiger 8-Kern Microcomputer
- ▶ Betriebssystem: Android oder Linux

- ▶ Jeder exponentielle Verlauf stößt irgendwann an natürliche oder wirtschaftliche Grenzen
- ▶ Beispiel: physikalische Limits
  - ▶ Eine DRAM-Speicherzelle speichert etwa 200 Elektronen (2012)  
Skalierung: es werden mit jeder neuen Technologiestufe weniger
  - ▶ Offensichtlich ist die Grenze spätestens dann erreicht, wenn nur noch ein einziges Elektron gespeichert würde
  - ▶ Ab diesem Zeitpunkt gibt es bessere Performanz nur noch durch bessere Algorithmen / Architekturen!
- ⇒ Annahme: 50 % Skalierung pro Jahr, 200 Elektronen/Speicherzelle  
gesucht:  $x \hat{=}$  Jahre Fortschritt
- ⇒  $200 / (1,5^x) \geq 1$   
 $x = \ln(200) / \ln(1,5) \approx 13$  Jahre

$$a^b = \exp(b \cdot \ln a)$$

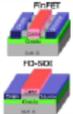
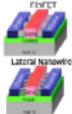
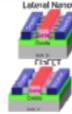
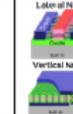
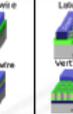
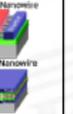
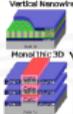
## IEEE International Roadmap for **D**evelopments and **S**ystems

<https://irds.ieee.org/editions/2020>

- ▶ IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ▶ Beteiligung von
  - ▶ Halbleiterherstellern
  - ▶ Geräte-Herstellern
  - ▶ Universitäten und Forschungsinstituten
  - ▶ Fachverbänden aus USA, Europa, Asien
- ▶ Publikation von langjährigen Vorhersagen
- ▶ Zukünftige Entwicklung der Halbleitertechnologie
- ▶ Prognosen zu Fertigungsprozessen, Modellierung, Simulation, Entwurf etc.
- ▶ für Chips (Speicher, Prozessoren, SoC . . . ) und Systeme

# Roadmap: IRDS (cont.)

Table MM01 – More Moore – Logic Core Device Technology Roadmap (Ausschnitt, 2017)

YEAR OF PRODUCTION	2017	2019	2021	2024	2027	2030	2033
Logic industry "Node Range" Labeling (nm)	P54M36	P48M28	P42M24	P36M21	P32M14	P32M14T2	P32M14T4
IDM-Founary node labeling	"10"	"7"	"5"	"3"	"2.1"	"1.5"	"1.0"
Logic device structure options	i10-F7	i7-F5	i5-F3	i3-F2.1	i2.1-F1.5	i1.5-F1.0	i1.0-F0.7
Logic device mainstream device	finFET	finFET	LGAA	LGAA	LGAA	VGAA, LGAA	VGAA, LGAA
DEVICE STRUCTURES	FDSOI	LGAA	finFET	VGAA	VGAA	3DVL SI	3DVL SI
DEVICE STRUCTURES	finFET	finFET	LGAA	LGAA	LGAA	VGAA	VGAA
DEVICE STRUCTURES							
DEVICE STRUCTURES							
LOGIC TECHNOLOGY ANCHORS							
Patterning technology inflection for Mx interconnect	193i, EUV	193i, EUV DP	193i, EUV DP	193i, High-NA EUV	193i, High-NA EUV+(DSA)	193i, High-NA EUV+(DSA)	193i, High-NA EUV+(DSA)
Channel material technology inflection	Si	SiGe25%	SiGe50%	Ge, IIIV (TFET?), 2D Mat	Ge, IIIV (TFET?), 2D Mat	Ge, IIIV (TFET?), 2D Mat	Ge, IIIV (TFET?), 2D Mat
Process technology inflection	Conformal deposition	Conformal Doping, Contact	Channel, RMG	Stacked-device Non-Cu Mx	Stacked-device Non-Cu Mx	Steep-SS, 3D	Steep-SS, 3D
Stacking generation inflection	2D	2D	3D-stacking: W2W D2W	3D-device: P-over-N Hetero	3D-device: Mem-on-Logic Hetero	3D-device: Mem-on-Logic Hetero	3D-device: Logic-on-Logic Hetero
LOGIC TECHNOLOGY INTEGRATION CAPACITY							
Design scaling factor for standard cell	-	0,98	1,09	0,96	1,03	2,00	1,00
Design scaling factor for SRAM (111) bitcell	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00
POWER AND PERFORMANCE SCALING FACTORS							
V <sub>dd</sub> (V)	0,75	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55
Physical gate length for HP Logic (nm)	20,0	18,0	16,0	14,0	12,0	12,0	12,0
Datapath speed improvement at V <sub>dd</sub> - relative	1,00	1,19	1,21	1,34	1,56	1,60	1,70
POWER AND PERFORMANCE SCALING FACTORS							
Power density of logic path cube at f <sub>max</sub> - relative	1,00	1,20	1,21	1,82	2,69	4,49	8,00
f <sub>max</sub> of a single CPU core at V <sub>dd</sub> (GHz)	2,5	3,0	3,0	3,3	3,9	4,0	4,2
f <sub>avg</sub> at constant power density and V <sub>dd</sub> (GHz)	2,50	2,48	2,51	1,84	1,45	0,89	0,53
CPU SiP throughput at f <sub>max</sub> (TFLOPS/sec)	0,16	0,27	0,46	0,79	1,34	2,27	3,86
INTERCONNECT TECHNOLOGY							
Conductor	Cu, non-Cu	Cu, non-Cu					
Number of wiring layers	14	16	18	20	20	20	20



# Moore's Law

## Beispiel für die Auswirkung von Moore's Law

Angenommen die Lösung einer Rechenaufgabe dauert derzeit vier Jahre und die Rechenleistung wächst jedes Jahr um 60 %.

*Wie lösen wir das Problem ?*





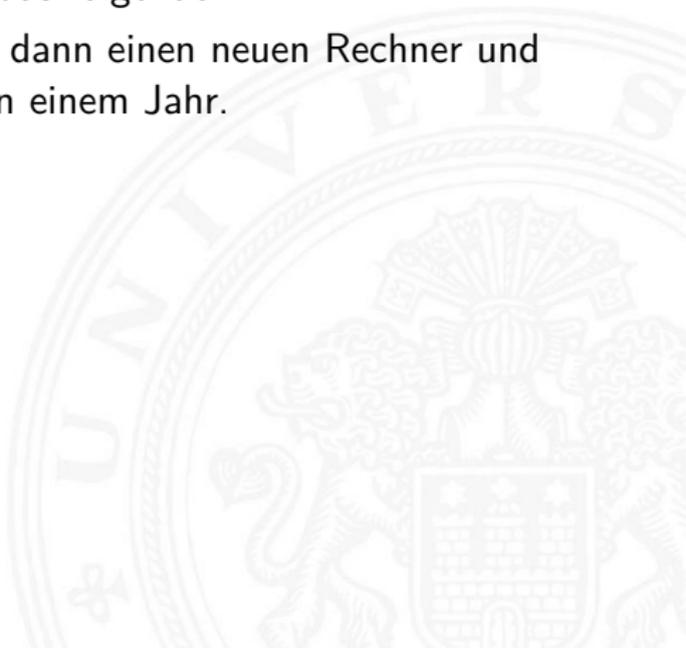
# Moore's Law: Schöpferische Pause

## Beispiel für die Auswirkung von Moore's Law

Angenommen die Lösung einer Rechenaufgabe dauert derzeit vier Jahre und die Rechenleistung wächst jedes Jahr um 60 %.

Ein mögliches Vorgehen ist dann das folgende:

- ▶ Wir warten drei Jahre, kaufen dann einen neuen Rechner und erledigen die Rechenaufgabe in einem Jahr.
- ▶ *Wie das ?*





# Moore's Law: Schöpferische Pause

## Beispiel für die Auswirkung von Moore's Law

Angenommen die Lösung einer Rechenaufgabe dauert derzeit vier Jahre und die Rechenleistung wächst jedes Jahr um 60 %.

Ein mögliches Vorgehen ist dann das folgende:

- ▶ Wir warten drei Jahre, kaufen dann einen neuen Rechner und erledigen die Rechenaufgabe in einem Jahr.
- ⇒ Nach einem Jahr können wir einen Rechner kaufen, der um den Faktor 1,6 Mal schneller ist, nach zwei Jahren bereits  $1,6 \cdot 1,6$  Mal schneller, und nach drei Jahren (also am Beginn des vierten Jahres) gilt  $(1 + 60\%)^3 = 4,096$ .
- ▶ Wir sind also sogar ein bisschen schneller fertig, als wenn wir den jetzigen Rechner die ganze Zeit durchlaufen lassen.

Ab jetzt erst mal ein *bottom-up* Vorgehen:

Start mit grundlegenden Aspekten

- ▶ Informationsverarbeitung und -repräsentation
- ▶ Darstellung von Zahlen und Zeichen
- ▶ arithmetische und logische Operationen
- ▶ Schaltnetze, Schaltwerke, endliche Automaten

dann Kennenlernen aller Basiskomponenten des Digitalrechners

- ▶ Gatter, Flipflops ...
- ▶ Register, ALU, Speicher ...

und Konstruktion eines Rechners (HW)  
mit seinen Betriebsmitteln (SW)

- ▶ Befehlssatz, -abarbeitung, Assembler
- ▶ Pipelining, Speicherhierarchie
- ▶ Dateisystem, Ein- / Ausgabe
- ▶ Prozesskontrolle, Locking, Interrupts
- ▶ ...

- [TA14] A.S. Tanenbaum, T. Austin: *Rechnerarchitektur – Von der digitalen Logik zum Parallelrechner*.  
6. Auflage, Pearson Deutschland GmbH, 2014.  
ISBN 978–3–8689–4238–5
- [HenHA] N. Hendrich: *HADES — HAMBURG DDesign System*.  
Universität Hamburg, FB Informatik, Lehrmaterial.  
[tams.informatik.uni-hamburg.de/applets/hades/webdemos](http://tams.informatik.uni-hamburg.de/applets/hades/webdemos)
- [Fur00] S. Furber: *ARM System-on-Chip Architecture*.  
2nd edition, Pearson Education Limited, 2000.  
ISBN 978–0–201–67519–1
- [Moo65] G.E. Moore: *Cramming More Components Onto Integrated Circuits*. in: *Electronics* 38 (1965), April 19, Nr. 8

[IRDS20] *International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) 2020 Edition*. IEEE International Roadmap for Devices and Systems, 2020. [irds.ieee.org/editions/2020](https://irds.ieee.org/editions/2020)

[Intel] Intel Corp.; Santa Clara, CA.

[www.intel.com](http://www.intel.com)

[www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-gordon-moore-law.html](http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-gordon-moore-law.html)

[TI] Texas Instruments Inc.; Dallas, TX. [www.ti.com](http://www.ti.com)

[Samsung] Samsung Electronics Co., Ltd.; Suwon, Südkorea.

[www.samsung.com](http://www.samsung.com)

[HK] Hardkernel co., Ltd.; AnYang, Südkorea.

[www.hardkernel.com](http://www.hardkernel.com)