

Wintersemester '21/22

Digitale Logik

Vom Abakus zum Supercomputer

Prof. Dr. Joachim Gerlach

gerlach@hs-albsig.de




Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Vom Abakus zum Supercomputer

Sinn und Zweck dieses Kapitels



- Ein kurzer Streifzug durch die Geschichte der Computertechnik...
- ...um zu verstehen, wieso „Computer heute so sind, wie sie sind“
 - Welche Erkenntnisse, Erfindungen, Zufälle, ... waren wegweisend in der Evolution der Computertechnik?
 - Was waren/sind die „treibenden Faktoren“ in der (Weiter-)Entwicklung der Computertechnik?
 - ➔ Die wesentlichen Konzepte, nach denen unsere heutigen Computer funktionieren, sind uralt...
 - ➔ ...trotzdem vergrößert sich die Leistungsfähigkeit von Computern explosionsartig 
- ...und ganz nebenbei...
 - Entwicklung eines (groben) Verständnisses, wie digitale Rechnersysteme aufgebaut sind und wie sie funktionieren... (to be refined)
 - ...und damit letztlich Antwort auf die Frage „Wozu Digitale Logik?“

Teil-1: Einführung in Digitale Rechnersysteme

- **Vom Abakus zum Supercomputer**

Teil-2: Grundlagen der Digitalen Datenverarbeitung

- **Grundlagen der Digitaltechnik**
- **Zahlendarstellung und Codes**
- **Boolesche Algebra**

Teil-3: Digitale Schaltungstechnik

- **Kombinatorische Schaltungen**
- **Sequentielle Schaltungen**
- **Entwurf digitaler Schaltungen heute**

- **Die elektrische Revolution**

- **Der Siegeszug des Transistors**
- **Die Explosion der Halbleitertechnologie**
- **Quo vadis ?**

Vom Abakus zum Supercomputer

Die ersten mechanischen Rechenhilfen



Abakus

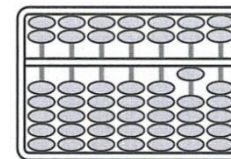
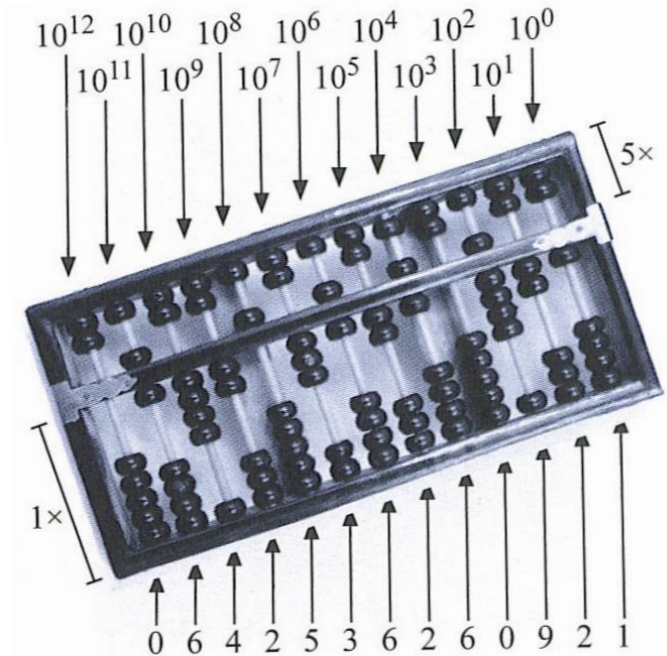
(China, 11. Jahrhundert vor Christus)

■ Funktionsweise

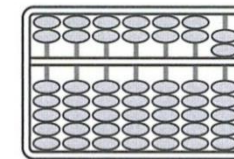
- Stäbe entsprechen Zehnerpotenzen
- Nur diejenigen Kugeln „zählen“, die an der mittleren Querstrebe anliegen
- Kugeln im unteren Segment zählen 1-fach
Kugeln im oberen Segment zählen 5-fach

■ Eigenschaften

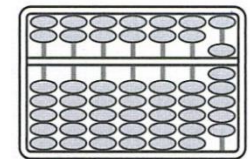
- **Diskretes (digitales) Funktionsprinzip:**
Informationsträger (= Kugeln) besitzen Zustand „true“ oder „false“
- **Problem:**
Zahlendarstellung ist nicht eindeutig



$$10 = 1 \cdot 10$$



$$10 = 2 \cdot 5$$



$$10 = 1 \cdot 5 + 5 \cdot 1$$

Vom Abakus zum Supercomputer

Die ersten mechanischen Rechenhilfen

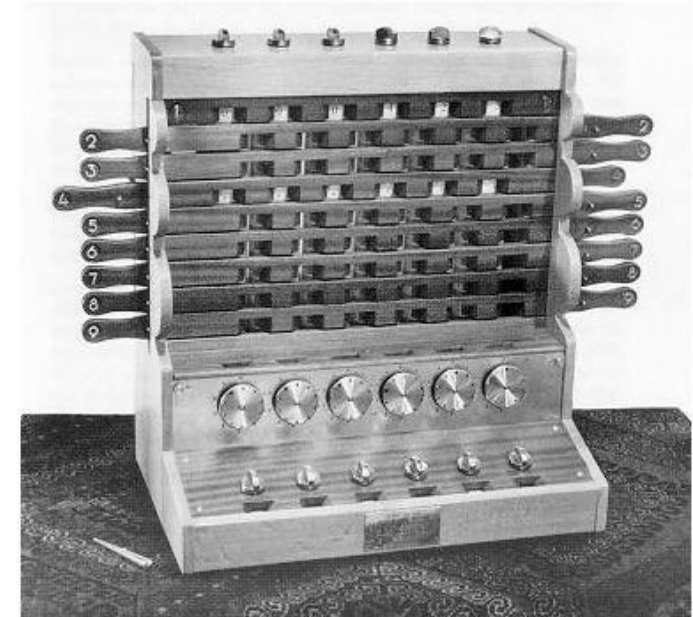
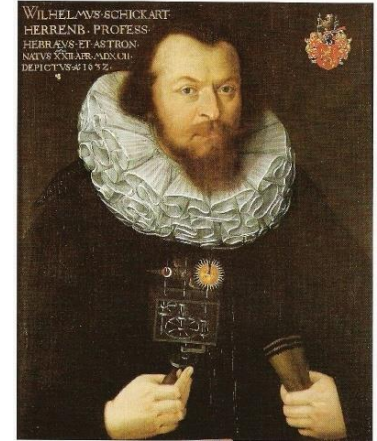
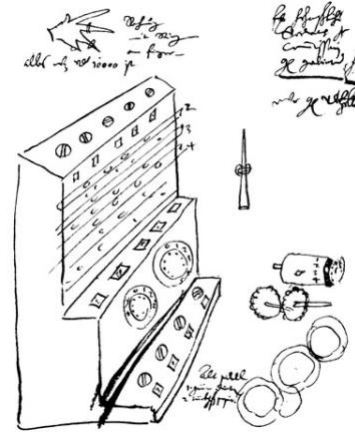


Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Schickard'sche Rechenuhr

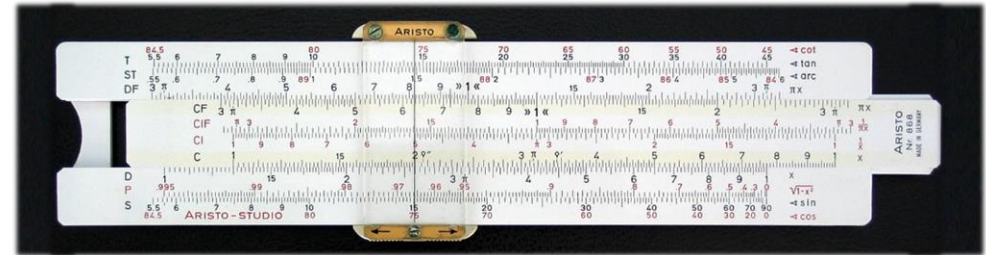
(Wilhelm Schickard, 1592–1635)
aus Tübingen/Herrenberg

- Erstes **mechanisches** Rechenwerk
- Funktionsumfang
 - Automatische Berechnung von Summen und Differenzen
 - Halbautomatische Berechnung von Produkten (Handeingabe der Zwischensummen)
- Ähnliche Rechenwerke dieser Zeit
 - 1641: Blaise Pascal
 - 1673: Gottfried Wilhelm Leibnitz



Rechenschieber

(William Oughtred, 1632 ... u.v.a.)



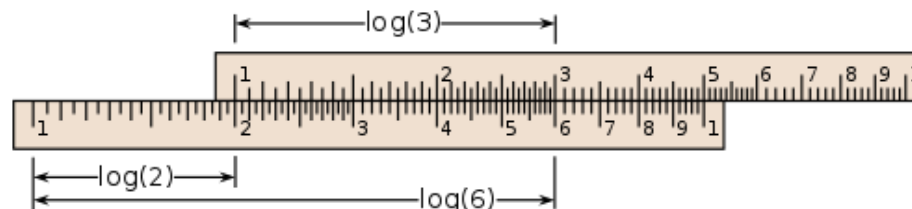
■ Funktionsprinzip:

Rückführung von Rechenoperationen auf die Addition bzw. Subtraktion von Strecken durch Anwendung der Logarithmen-Gesetze („Logarithmen-Stab“)

■ Funktionsumfang:

- Grundrechenarten, vorzugsweise der Multiplikation und Division
- Je nach Ausführung auch komplexere Rechenoperationen (Wurzel, Quadrat, Logarithmus, trigonometrische Funktionen)

Beispiel: $\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$



$$\begin{aligned} 2 \cdot 3 &= 10^{\log(2)} \cdot 10^{\log(3)} \\ &= 10^{\log(2) + \log(3)} \\ &= 10^{\log(2 \cdot 3)} = 10^{\log(6)} = 6 \end{aligned}$$

Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution



- Erster „Quantensprung“ in der Computergeschichte:
Verwendung **elektromechanischer** Bauteile

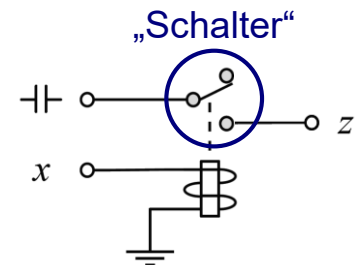
- Elektrische Spannung als Informationsträger

Heute nach wie vor...

- ermöglicht die Konstruktion von Rechenmaschinen mit höherer Komplexität und höherer Zuverlässigkeit als bei mechanischem Funktionsprinzip

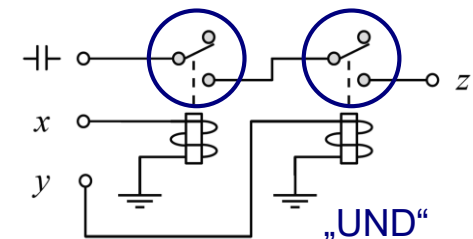
- Ein **Relais** entspricht einem elektromechanischen Schalter mit **zwei Zuständen: offen und geschlossen**

Mit diesem Schaltverhalten hält das **Binärsystem** (zwei Ziffern: **0** und **1**) Einzug in die Computertechnik



- Durch Seriell-/Parallel-Schaltung von Relais lassen sich komplexere **Schaltfunktionen** realisieren

- Serielle Verschaltung ↔ „und“-Verknüpfung
 - Parallele Verschaltung ↔ „oder“-Verknüpfung
- ...dazu später mehr...



Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution

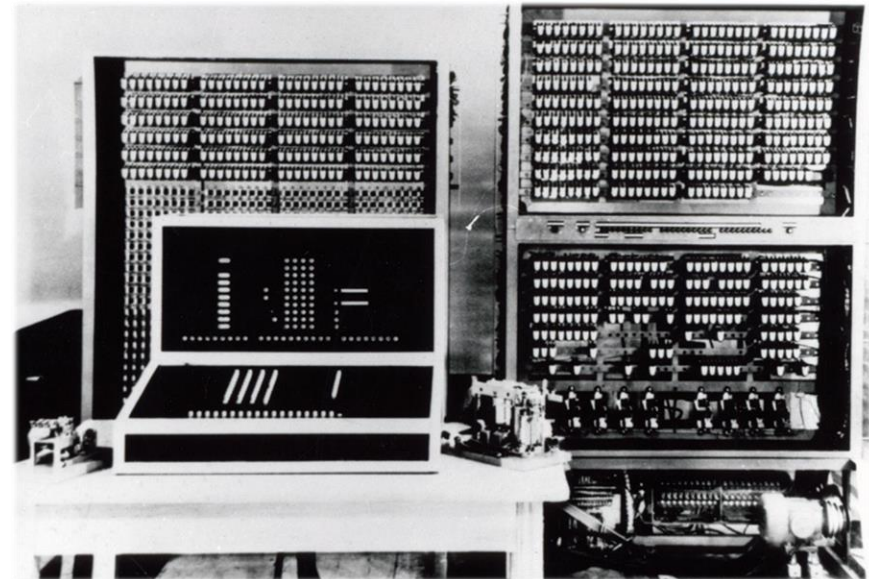
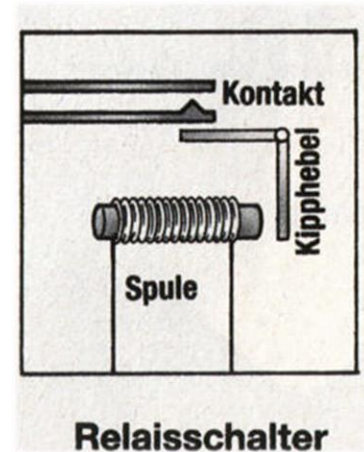


Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Z3 (Conrad Zuse, 1941)

- Funktionsprinzip: Relais / **elektromechanisch**
- Erste „**programmgesteuerte**“ Rechenmaschine:
Befehlssatz mit 9 Befehlen, keine Kontrollfluss-Befehle
- Aufgebaut aus 2000 Relais:
600 Relais für Rechenwerk
1400 Relais für Speicher
- Binärzahlen-Arithmetik
und Gleitkommazahlen
- Rechengeschwindigkeit:
Multiplikation in 3 Sekunden
(= 0,0000003 MIPS)

Heute nach wie vor...



Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution



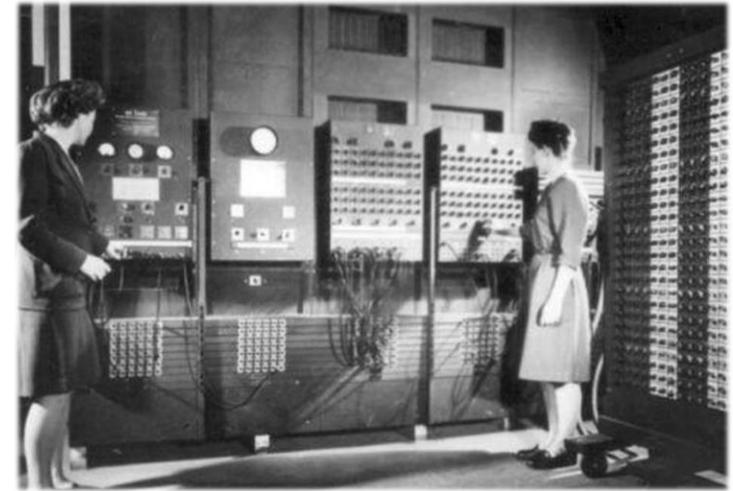
Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Mark II (Howard H. Aiken, 1944)

- Funktionsprinzip: Relais
- Wurde im 2. Weltkrieg erfolgreich eingesetzt, um chiffrierte Nachrichten des deutschen Militärs zu entschlüsseln

Bekannt (auch) durch folgende Anekdote...

„Der Sommer 1945 war sehr heiß, wir arbeiteten in einem Raum ohne Klimaanlage und ließen daher die Fenster offen. Plötzlich blieb Mark II stehen. Wir krochen natürlich sofort in die Maschine, um den Fehler zu lokalisieren. Nach langem Suchen fanden wir das defekte Relais: drinnen steckte eine Motte, welche leider das Zeitliche gesegnet hatte. Mit einer Pinzette holte ich das Insekt heraus, legte es ins Logbuch und klebte es mit ScotchTape [Klebeband] fest. Nun hatte Commander Aiken die Angewohnheit, unverhofft hereinzuplatzen und uns mit der Frage 'Are you making any numbers?' in Verlegenheit zu bringen. 'Machten' wir keine Zahlen, mussten wir eine Entschuldigung parat haben. Von der Zeit der Motte an hatte es damit keine Not mehr. Wir behaupteten einfach, dass wir mit 'Entwanzen' (englisch 'Debugging') beschäftigt seien.“ [Grace Hopper, Harvard University]



9/9

0800 Antan started
1000 " stopped - antan ✓ { 1.2700 9.0
1300 (032) HP-MC 2.130476415
(033) PRO-2 2.130476415
conv 2.130476415
Relays 6-2 in 033 failed special speed
in relay 11,000 test
Relays changed
1100 Started Cosine Tape (Sine check)
1525 Started Multi-Adder Test
1545 Relay #70 Pan (moth) in relay.
First actual case of bug being found
1700 closed down.

Vom Abakus zum Supercomputer

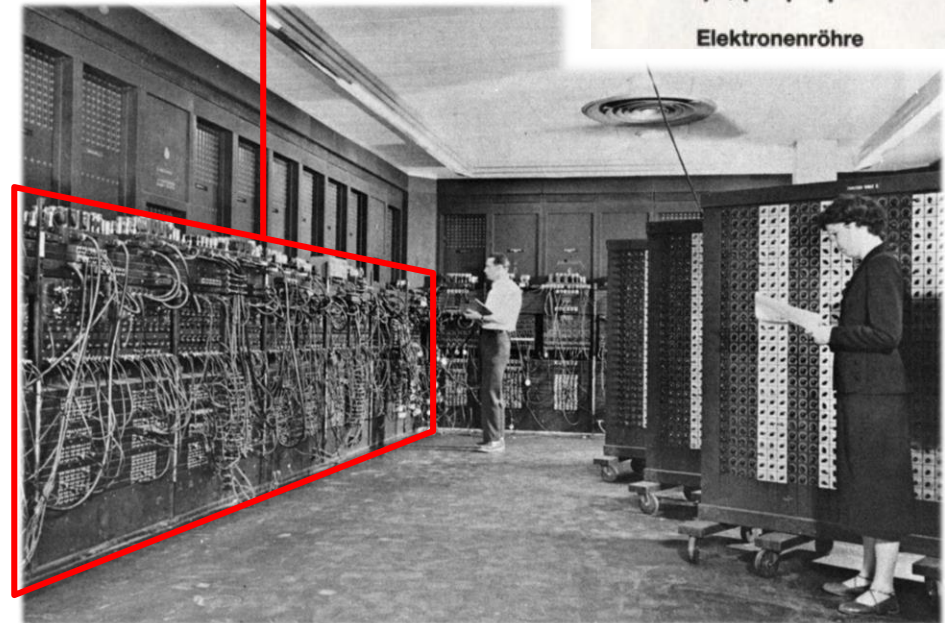
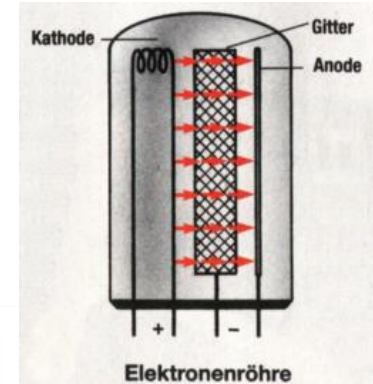
Die elektrische Revolution



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

ENIAC (Eckert/Mauchley, 1945)

- Funktionsprinzip: Vakuum-Röhre / **elektronisch**
- Programmierung durch „Kabelstecken“
- Einige Daten...
 - Gewicht: 35 Tonnen
 - Fläche: 140 m²
 - 18.000 Röhren
(50 defekte Röhren pro Tag)
 - Taktfrequenz: 100 KHz
 - Stromverbrauch: 175 KW
- Binärzahlen-Arithmetik,
keine Gleitkommazahlen
- Rechengeschwindigkeit: 5000 Additionen/Sekunde (= 0,005 MIPS)



Vom Abakus zum Supercomputer

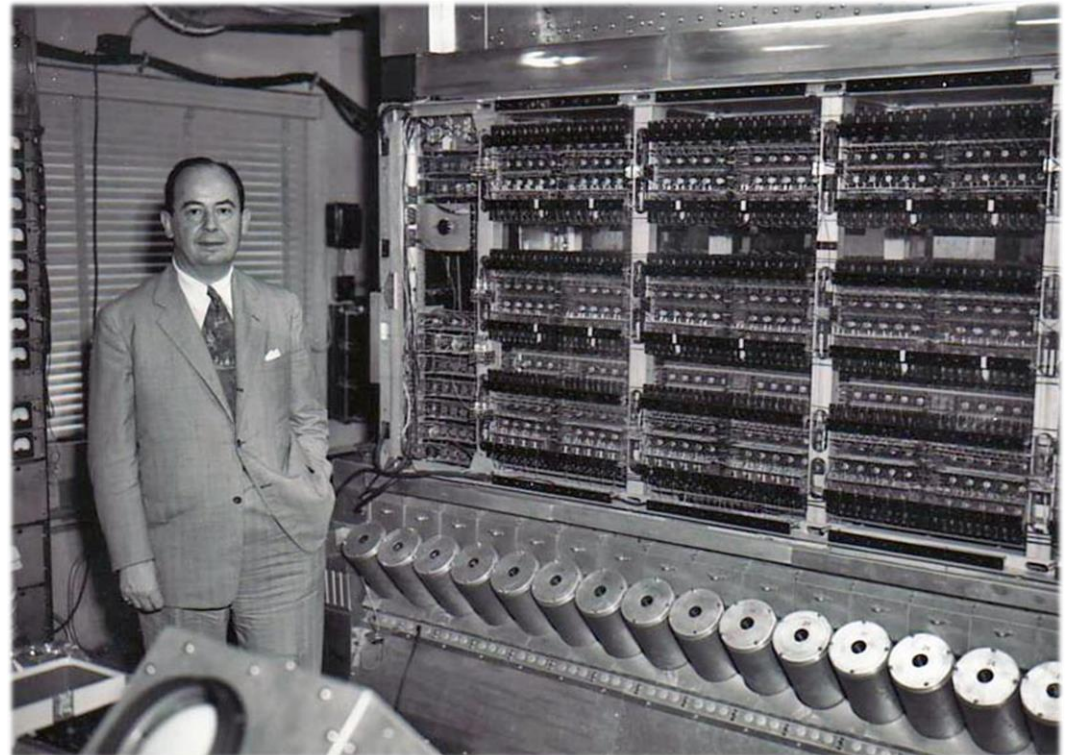
Die elektrische Revolution



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

IAS (John von Neumann, Princeton University, 1946-1952)

- Aufgebaut aus 2300 Röhren
(ursprünglich Vakuum-Röhren, später Umstieg auf Williams-Röhren)
- Rechengeschwindigkeit:
 - Addition: $62 \mu\text{s}$
 - Multiplikation: $713 \mu\text{s}$
($\approx 0,016 \text{ MIPS}$)
- Befehlssatz umfasst zwar nur 21 Befehle...
...beinhaltet aber u.a. bedingte Sprungbefehle
→ Ermöglicht verzweigenden Programmfluss !



IAS (John von Neumann, Princeton University, 1946-1952)

Steckbrief: **John von Neumann**

- Mathematik-Professor an der Princeton University
- „Universal-Genie“
(...half auch beim Bau der ersten Atombombe...)
- Berühmte Schrift:
„First Draft on a Report on the EDVAC“ (1945)
 - Entwurf eines „Electronic Discrete Variable Computer“
 - **Bahnbrechende Idee:**
 - Ablaufvorschriften **nicht fest verdrahten**, sondern **flexibel abspeichern** („Stored Programs“)
 - Konzeption einer Rechnerarchitektur um diese Idee:
Untergliederung der CPU in Rechenwerk + Steuerwerk,
Ein-/Ausgabe-Geräte, ein *gemeinsamer* Speicher für Daten + Befehle, ...



Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution



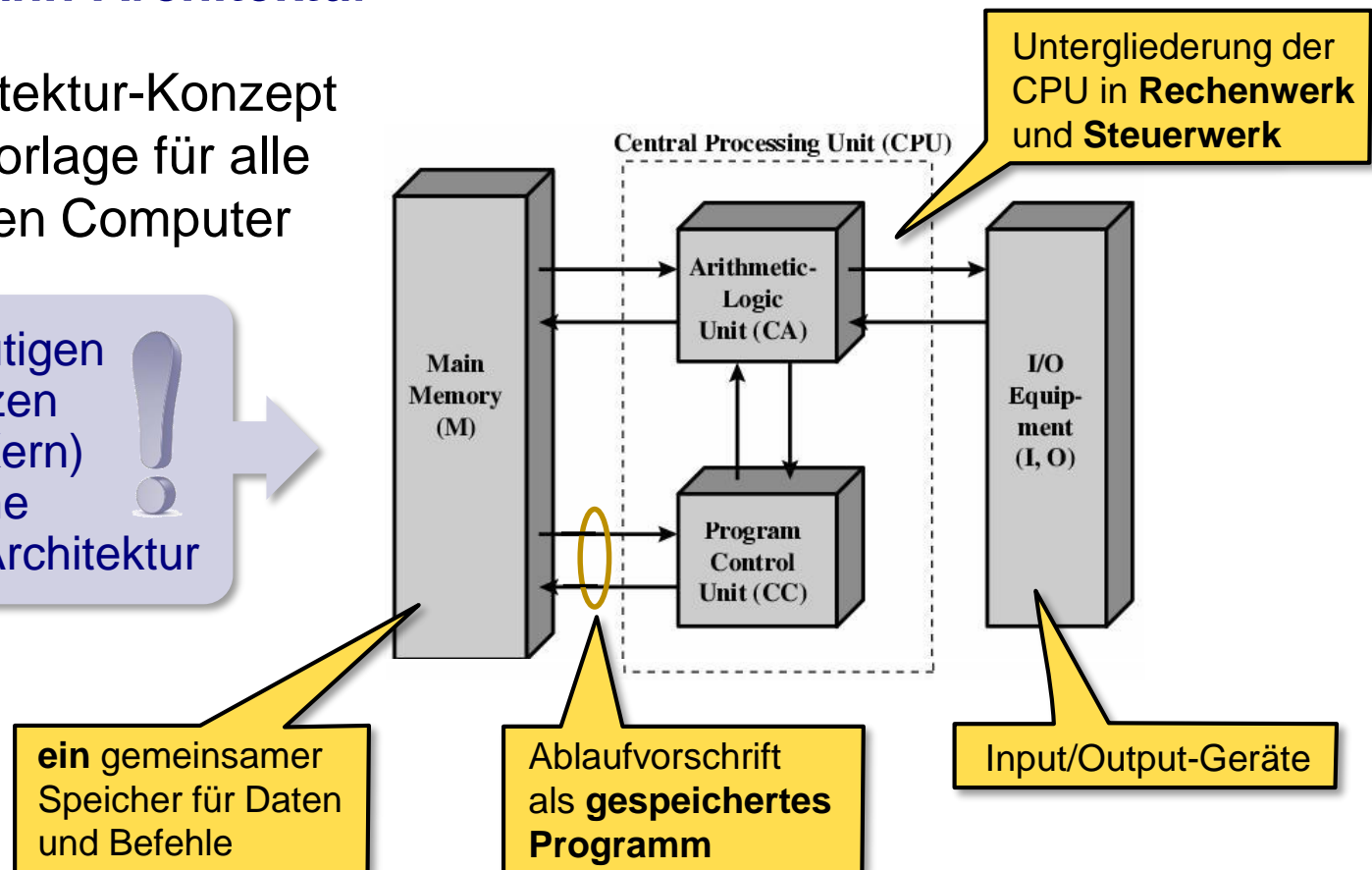
Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

IAS (John von Neumann, Princeton University, 1946-1952)

■ „Von-Neumann-Architektur“

- Dieses Architektur-Konzept lieferte die Vorlage für alle nachfolgenden Computer

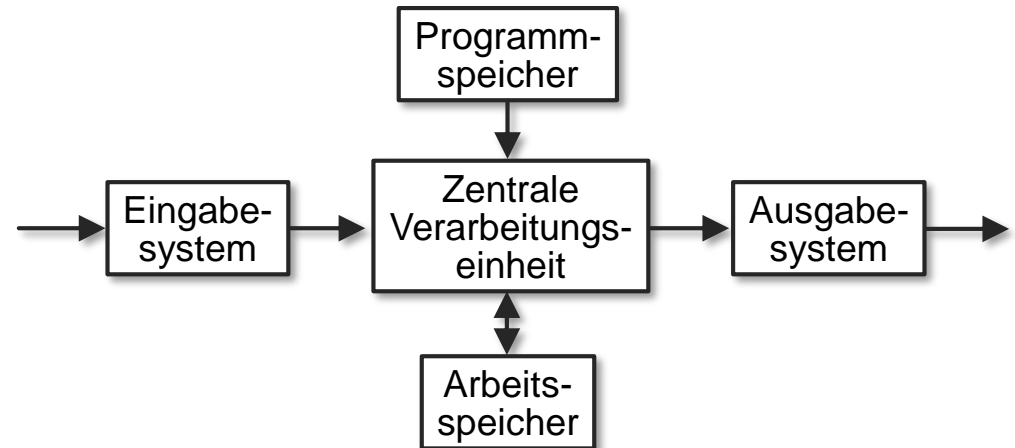
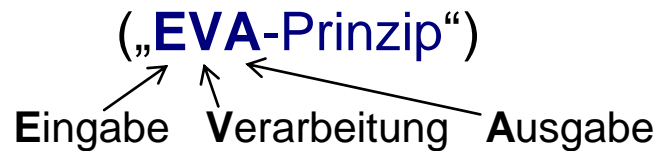
Die meisten heutigen Computer besitzen (zumindest im Kern) nach wie vor eine Von-Neumann Architektur



Grundlegende Begriffe

- **Programmgesteuerte Datenverarbeitungsanlagen** werden als **Computer** oder **Rechner** bezeichnet

- Grundstruktur einer programmgesteuerten Datenverarbeitungsanlage:



- Kern eines Computers ist die **zentrale Verarbeitungseinheit** (Central Processing Unit, CPU)
- Ein **Computerprogramm** ist eine Folge von **Anweisungen** (Befehlen, Instruktionen) die im Computer dazu benutzt werden, gezielt ein bestimmtes Resultat herbeizuführen

Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution



- In den 50iger Jahren wurde die Computerindustrie geboren...
- Die ersten Firmen waren:
 - Sperry
 - IBM
- Die ersten kommerziellen Modelle waren:
 - Der UNIVAC
 - Die IBM 700 – Reihe



IBM 700



UNIVAC

Vom Abakus zum Supercomputer

Die elektrische Revolution



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

- Dies führte zu einer „Elektrifizierung“ der Datenverarbeitung...

Beispiel: North American Aviation



„Menschliche Computer“
Mitte der 50er Jahre

vs.

Datenverarbeitung mit Computern
10 Jahre später



- Rechner auf Basis von Relais- oder Vakuumröhren-Technologie wurden später als **Computer der 1. Generation** bezeichnet
- Hoher Stromverbrauch und begrenzte Lebensdauer der Vakuumröhre entwickelten sich zunehmend zum limitierenden Faktor
→ Suche nach neuen Technologien...
- Zweiter „Quantensprung“ in der Computergeschichte:
Verwendung von **Transistoren** als Schaltelemente
- ...läutet das Zeitalter der **Computer der 2. Generation** ein

Teil-1: Einführung in Digitale Rechnersysteme

- **Vom Abakus zum Supercomputer**

Teil-2: Grundlagen der Digitalen Datenverarbeitung

- **Grundlagen der Digitaltechnik**
- **Zahlendarstellung und Codes**
- **Boolesche Algebra**

Teil-3: Digitale Schaltungstechnik

- **Kombinatorische Schaltungen**
- **Sequentielle Schaltungen**
- **Entwurf digitaler Schaltungen heute**

- Die elektrische Revolution

- **Der Siegeszug des Transistors**

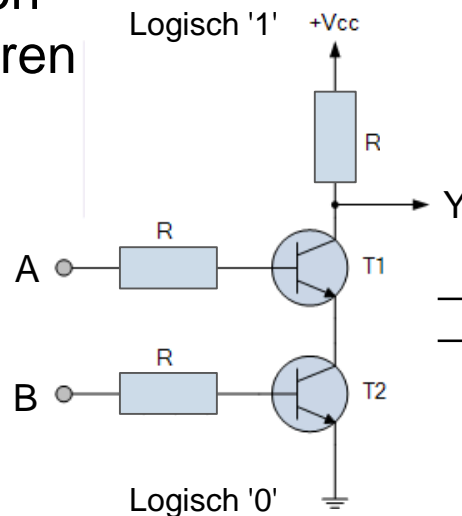
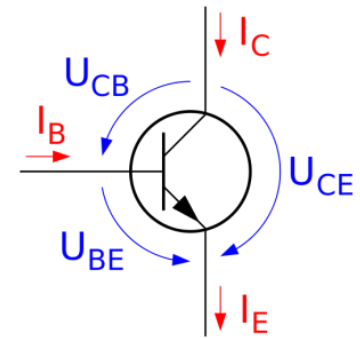
- Die Explosion der Halbleitertechnologie
- Quo vadis ?

Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors



- Erfindung des (**Bipolar-Transistors**)...
(Shockley/Bardeen/Brattain, Bell Laboratories, 1948 → Nobelpreis 1956)
- ...und Einsatz als elektronisches Schaltelement im Computer
(Grimsdale/Webb, Manchester University, 1953)
- Funktionsprinzip: Transistor / **elektronisch**
– Steuerung durch Strom
- Ermöglicht den Aufbau von Logikgatter aus Transistoren
- Dies führte zu einer „Transistorisierung“ der Computertechnik
(getrieben von Firmen wie IBM oder DEC ab Mitte fünfziger Jahre)



A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$$Y = \overline{A \wedge B}$$

„NAND“
(„not-and“)

...dazu später mehr...

Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors



DEC PDP-1 (1960)

(„PDP“ = „Programmable Data Processor“)

- Aufgebaut aus diskreten Transistoren
- Programmierung in Assembler oder Lisp
- Eingabegeräte
 - Fernschreiber als Tastatur
 - Lochstreifen
 - Lichtgriffel
- Ausgabegeräte
 - Rundes Oszilloskop (Vektorgrafik, 12 Zeichen Breite, technisch eher aus einem Radarschirm abgeleitet)
 - Fernschreiber als Drucker
 - Lochstreifen
- Erstes Computerspiel („Spacewar“, entwickelt am MIT)
Erste Anfänge der Textverarbeitung (Text-Codierung mittels ASCII)

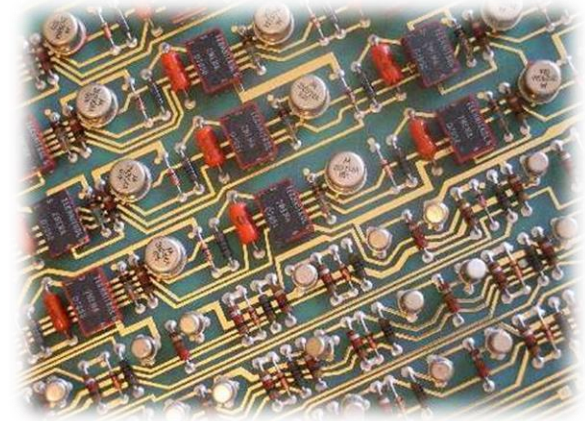


Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors



- In den 50er und frühen 60er Jahren wurden Transistoren separat gefertigt und einzeln (z.B. auf einer Platine) installiert+verbunden
→ „**Diskret** aufgebaute Schaltungen“



- Nachteile der diskreten Bauweise:
 - Aufwändiger Fertigungsprozess
 - Hohe Fehleranfälligkeit in der Herstellung und im Betrieb
 - Großer Platzbedarf
 - Hohe Leistungsaufnahme

Limitiert die Komplexität und Performance der realisierbaren Schaltung

- Dritter „Quantensprung“ in der Computergeschichte:
Übergang zu **Integrierten Schaltungen**

...läutet das Zeitalter der **Computer der 3. Generation** ein

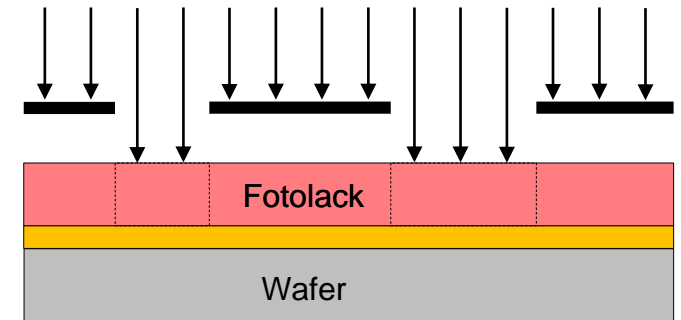
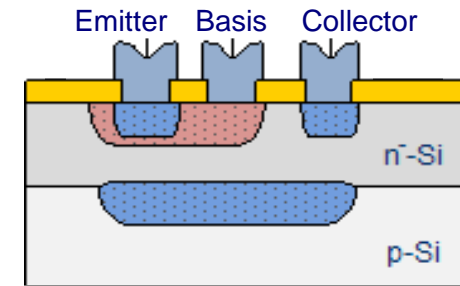
Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

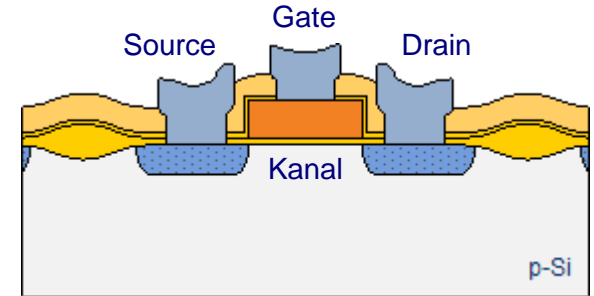
- Integration von Transistoren auf einem **halbleitenden** Substrat (**Silizium**)
- ...führt zur Erfindung der **Integrierten Schaltung** (Integrated Circuit, IC) (Jack Kilby, Texas Instruments, 1958 → Nobelpreis 2000)
- Funktionsprinzip: Transistor / **elektronisch**
 - Steuerung durch Strom
- Spezielles Fertigungsverfahren („**Fotolithographie**“) ermöglicht die Herstellung von ICs auf einer ebenen („planaren“) Oberfläche („**Silizium-Planar-Technik**“)
 - Wiederholte Durchführung der Prozessschritte
 - Auftragen von Fotolack
 - Belichten mit Belichtungsmaske
 - Ätzen, Dotieren, Oxidieren



Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors

- Übergang vom **bipolaren Transistor** zum (**unipolaren**) **Feldeffekt-Transistor**...
- ...ermöglicht die Realisierung von nahezu leistungsfrei steuerbaren Integrierten Schaltungen
 - Funktionsprinzip: Transistor/elektronisch – Steuerung durch **elektrisches Feld**
 - Obwohl das Grundprinzip bereits 1928 von Julius Lilienfeld entdeckt wurde...
 - ...verhinderte die schwierige Herstellung des isolierenden Gate-Oxids zwischen Kanal und Gate lange Zeit die Realisierung...
 - ...bis in den sechziger Jahren die technischen Probleme durch Einführung der **MOSFET-Technologie** gelöst werden konnten („MOSFET“ = „Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor“)



Vom Abakus zum Supercomputer

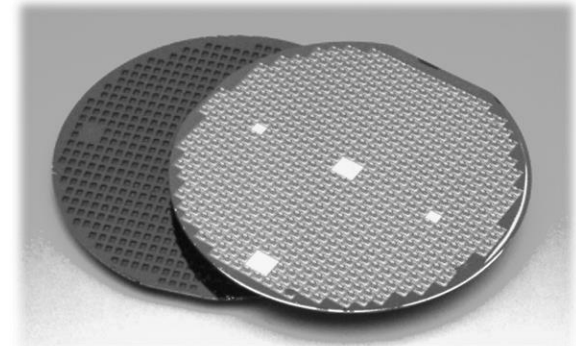
Der Siegeszug des Transistors



- Integrierte Schaltkreise in MOSFET-Technologie ermöglichen...
 - ...die Anwendung eines **lithographischen Fertigungsprozesses**
 - Wiederholte Durchführung der Prozessschritte Fotolack, Belichten, Ätzen/Oxidieren/Dotieren
 - ...die Realisierung der **gesamten Schaltung auf einem Chip**
 - Neben den eigentlichen Transistoren kann auch „alles andere“ (Verbindungsleitungen, Widerstände, Kapazitäten, ...) nach gleicher Vorgehensweise auf dem Silizium-Träger („**Wafer**“) realisiert werden
 - ...eine **Miniaturisierung**/Reduzierung der Strukturgröße
 - (Theoretische) Grenze ist die Wellenlänge des Lichts

→ „**Silizium-Planar Technik**“

- Seit ca. 1965 **explosionsartige Erhöhung der Integrationsdichte** integrierter Schaltungen
→ „**Moore'sches Gesetz**“



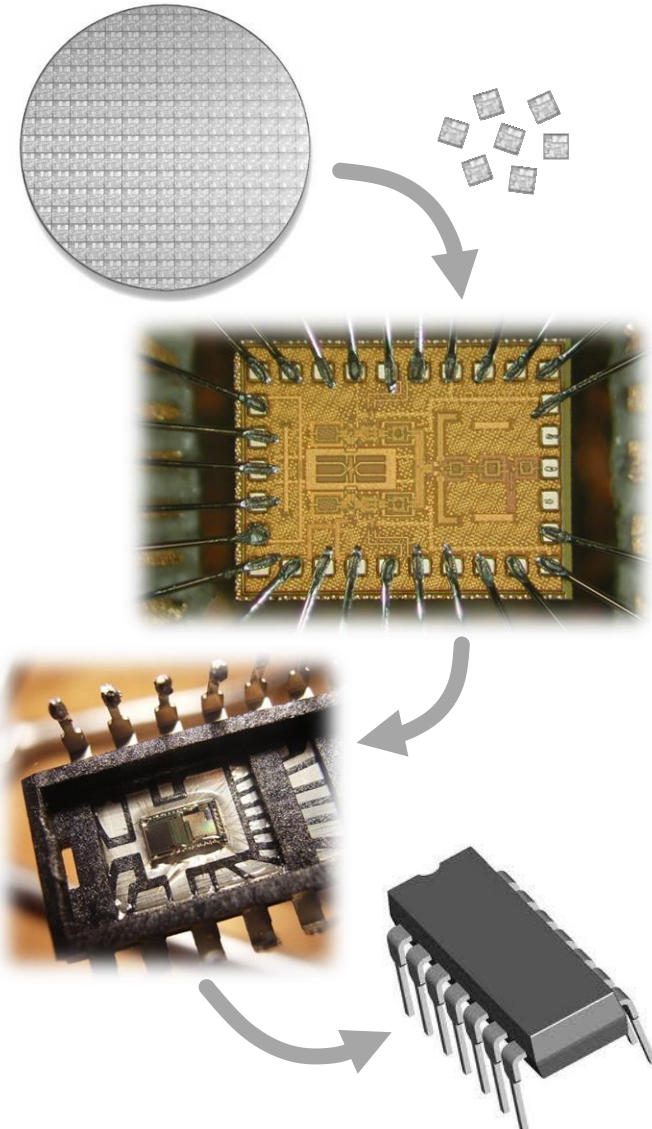
Vom Abakus zum Supercomputer

Der Siegeszug des Transistors



■ Vom Wafer zum Chip...

- Ein **Wafer** beinhaltet eine größere Anzahl integrierter Schaltkreise in Matrix-artiger Anordnung
- Durch Sägen des Wafers entstehen rechteckige **Chips**, die jeweils einen Schaltkreis beinhalten
- Jeder Chip besitzt in seinem Randbereich Anschlüsse (**Pad-Zellen**) welche die Ein- und Ausgabesignale des Schaltkreises realisieren
- Der Chip wird in einem Kunststoffgehäuse (**Package**) verpackt, welches externe Anschlüsse (**Pins**) bereitstellt
- Beim **Bonding** werden die Pad-Zellen mit den Pins mittels feiner Golddrähte verbunden



Teil-1: Einführung in Digitale Rechnersysteme

- **Vom Abakus zum Supercomputer**

Teil-2: Grundlagen der Digitalen Datenverarbeitung

- **Grundlagen der Digitaltechnik**
- **Zahlendarstellung und Codes**
- **Boolesche Algebra**

Teil-3: Digitale Schaltungstechnik

- **Kombinatorische Schaltungen**
- **Sequentielle Schaltungen**
- **Entwurf digitaler Schaltungen heute**

- Die elektrische Revolution
- Der Siegeszug des Transistors
- Die Explosion der Halbleitertechnologie
- Quo vadis ?

Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Moore'sches Gesetz

- **Integrationsdichte**
= Anzahl von Transistoren pro Flächeneinheit
- 1965 sah Gordon E. Moore, einer der Gründer von Intel, die Zukunft voraus:

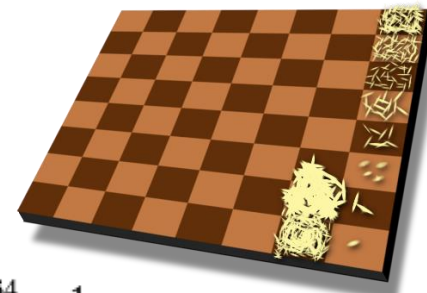
„**Moore's Law**“ („Moore'sche Gesetz“):

„Die Integrationsdichte
von Chips verdoppelt
sich alle zwei Jahre“

- Eine „gewagte Prognose“
 - Verdopplung pro konstanter Zeiteinheit bedeutet exponentielles Wachstum...



Gordon E. Moore
Mitgründer von Intel (1968)
Seit 1997 "Chairman Emeritus"



$$\begin{aligned} 2^{64} - 1 \\ = 18.446.744.073.709.551.615 \\ \approx 18,45 \text{ Trillionen Reiskörner} \end{aligned}$$

Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



Moore'sches Gesetz

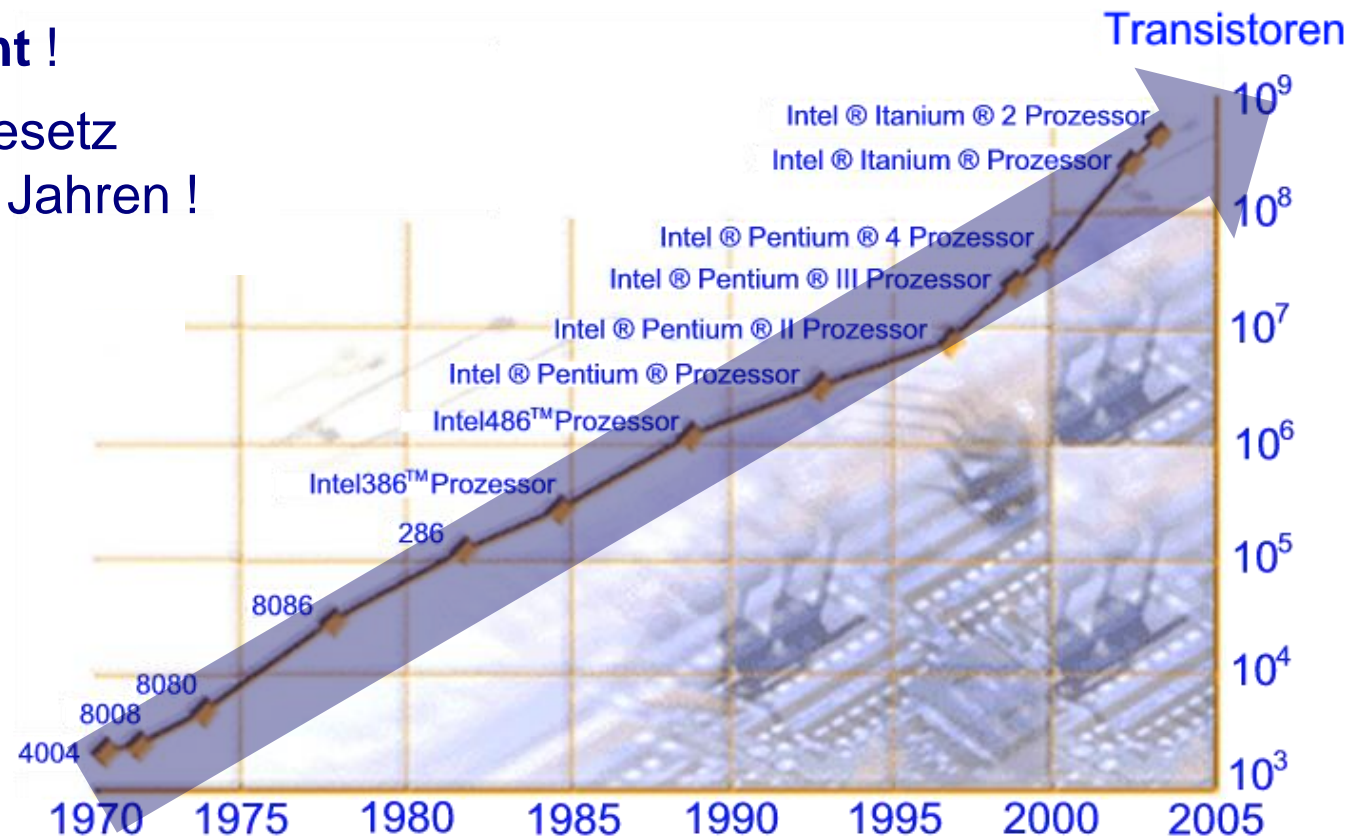
- Und das Verblüffende...

- **Moore hat recht !**

Moore'sches Gesetz
gilt seit über 50 Jahren !

Man beachte:

Logarithmischer Maßstab, der
(lineare) Pfeil beschreibt somit
ein exponentielles Wachstum



Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



- Ab Mitte der 60er Jahre:
 - Explosionsartiges Wachstum der technologischen Möglichkeiten
 - Kaum noch Veränderungen an der Basistechnologie
 - „Moore röhelt vor sich hin und sorgt zuverlässig dafür, dass die Komplexität und Leistungsfähigkeit unserer Chips in den Himmel wächst...“
- Nachfolgende Computer-Generationen:

Integrierte Schaltungen	Generation	Zeitraum	Technologie	Schaltelemente pro Baustein	Operationen pro Sekunde
	1	1946 – 1957	Relais, Vakuum-Röhre	1	40.000
	2	1958 – 1964	Transistor	1	200.000
	3	1965 – 1971	Small & Medium Scale Integration (SSI, MSI)	bis 100 bzw. bis 1.000	1.000.000
	4	1972 – 1977	Large Scale Integration (LSI)	1.000 bis 10.000	10.000.000
	...	1978 – 1991	Very Large Scale Integration (VLSI)	10.000 bis 100.000	100.000.000
	...	1991 – ...	Ultra Large Scale Integration (ULSI)	100.000 bis 1.000.000	1.000.000.000

Vereinbarung: Aktuelle Leading-Edge Technologie wird „**VLSI**“ bezeichnet...

Moore'sches Gesetz

- Da gab's auch deutlich schlechtere Prognosen... 😊

„Meines Erachtens gibt es einen Weltmarkt für vielleicht fünf Computer“
(Thomas Watson, Präsident von International Business Machines, 1943)

„Computer der Zukunft werden nicht mehr als 1,5 Tonnen wiegen“
(US-Zeitschrift Popular Mechanics, 1949)

„Es scheint, dass wir die Grenzen dessen erreicht haben, was mit Computer Technologie möglich ist“
(John von Neumann, 1949)

„Es gibt keinen Grund, warum Menschen zu Hause einen Computer haben sollten“
(Ken Olson, Gründer von Digital Equipment Corporation, 1977)

„640.000 Bytes Speicherkapazität sollten jedem genügen“
(William Gates, Gründer von Microsoft Corporation, 1981)

IBM System 360 (ab 1964)

- 1964 startet IBM auf Basis der integrierten Schaltungstechnologie mit enormem Ressourceneinsatz (bis zu 50.000 Mitarbeiter, Gesamtkosten über 5 Mrd. \$) den Aufbau einer neuen Computer-Serie
- Die IBM „**360er–Serie**“ (**S/360**) entwickelte sich mit einem Marktanteil von über 70% zum größten Erfolg des Jahrzehnts
- Die S/360 war die erste **geplante Computerfamilie**
 - Fünf verschiedene kompatible Modelle: S/360-30 bis S/360-75
 - Über vierzig verschiedene kompatible Peripheriegeräte
 - Drei Betriebssysteme: TOS/360, DOS/360, OS/360(Daher auch der Name: „allesabdeckender 360-Grad-Vollkreis“)
- Läutete das „**Ende der Pionierzeit der elektronischen Datenverarbeitung**“ und den „**Beginn der Ära der Mainframe-Computer**“ ein

IBM System 360 (ab 1964)

■ Technische Daten der Computer-Modelle der 360er-Serie:

Merkmal	Model 30	Model 40	Model 50	Model 65	Model 75
Maximale Speichergröße (Bytes)	64K	256K	256K	512K	512K
Datenrate zum Hauptspeicher (Mbytes/s)	0,5	0,8	2,0	8,0	16,0
Prozessor Zykluszeit (μ s)	1,0	0,625	0,5	0,25	0,2
Relative Geschwindigkeit	1	3,5	10	21	50
Maximale Anzahl von I/O-Kanälen	3	3	4	6	6

■ Vorteile der „Familien-Planung“:

- Baureihe deckt Bandbreite an Leistungsfähigkeit / Kosten ab
- **Möglichkeit, unter Weiterverwendung der bisher benutzten Software auf einen leistungsfähigeren Computer aufzurüsten**



■ Interessant...

- Hardware-Architektur der S/360 findet sich in aktuellen z-Mainframes wieder
- Software-Architektur des OS/360 findet sich im aktuellen z/Os wieder

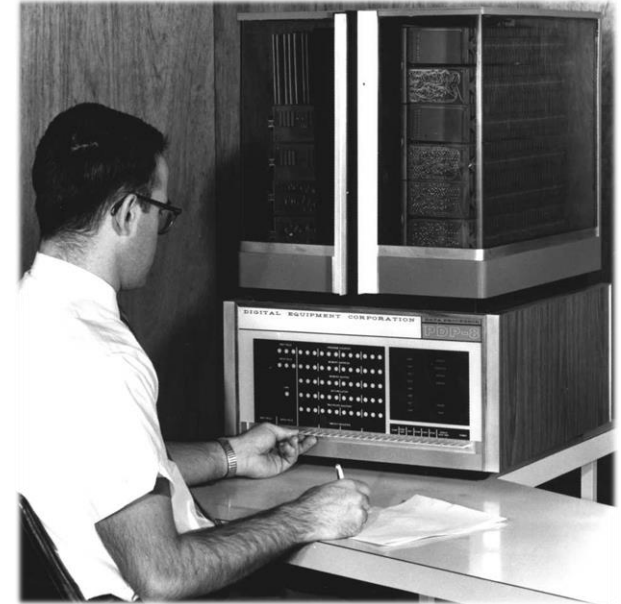
Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



DEC PDP-8 (1965)

- Erster kommerziell erfolgreicher „handlicher“ Minicomputer...
- ...den man sich auf den Schreibtisch stellen konnte
- ...der auch für Privatpersonen einigermaßen erschwinglich war
- Preis ca. 16.000 \$
ca. 300.000 verkaufte Exemplare
- Befehlssatz mit 8 Befehlen
Registersatz mit 4 Registern à 12 Bit
- Daten und Befehle konnten Bit-weise über Kippschalter eingegeben und über Lämpchen abgelesen werden

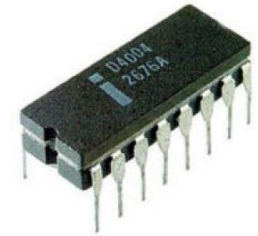


■ Übergang zur 4. (und letzten „echten“) **Computer-Generation**

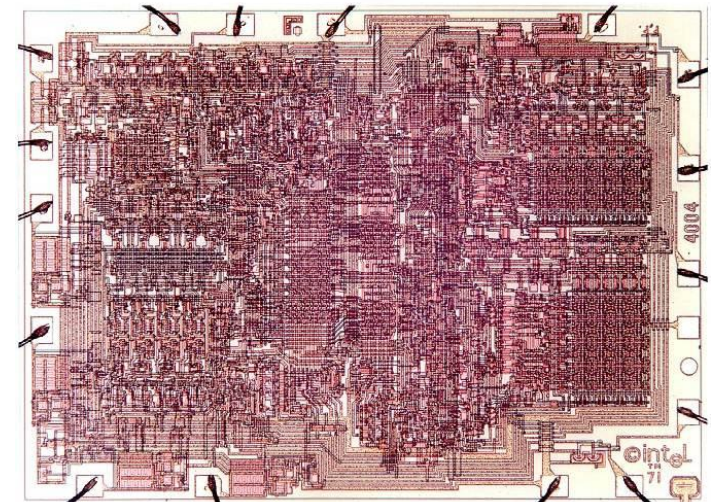
Mit zunehmender Integrationsdichte waren immer weniger Chips erforderlich, um eine komplette CPU zu realisieren – ein wichtiger Durchbruch kam 1971...

Intel 4004 (1971)

- Der Intel 4004 vereinigte erstmals **alle** Schaltkreise einer CPU auf **einem** Chip – die Geburt des **Mikroprozessors**



- Technische Daten des Intel 4004:
 - Aufgebaut aus 2300 Transistoren
 - Strukturbreite: 10 μm
 - Taktfrequenz: 500 – 740 kHz
 - Registersatz: 16 Register à 4 Bit
 - Befehlssatz: 16 Instruktionen
 - Breite des Datenbusses: 4 Bit
 - Adressierbarer Speicher: 640 Bytes



- Vorteile der „ganze CPU auf einem Chip“-Lösung:
 - Miniaturisierung von Geräten
→ Einfachere Handhabung, Einsparung von Werkstoffen
 - Kürzere Leitungslängen
→ Kürzere Signallaufzeiten → Höhere Geschwindigkeit
 - Geringere Leistungsaufnahme
→ Geringerer Strombedarf
 - Höhere Zuverlässigkeit
→ Keine zusätzliche Modulation, Filterung, Verstärkung von Signalen
→ Schutz vor Verschmutzung, Beschädigung, Alterung
 - Effizientere Fertigung
→ Hunderte Chips konnten simultan produziert werden
- Typische Anwendung:

parallel zur „3. Industriellen Revolution“

 - Einfache Steuerungen (Maschinen, Ampelanlagen, Aufzüge, ...)
 - Aufbau dezentraler Steuerkonzepte ←

Vom Abakus zum Supercomputer

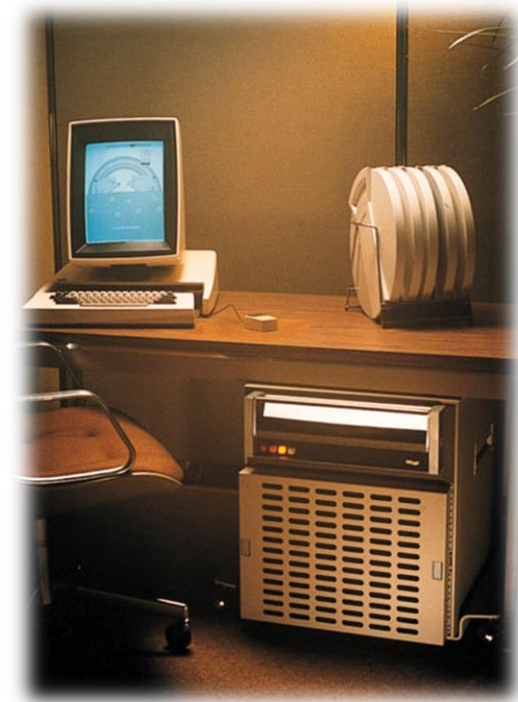
Die Explosion der Halbleitertechnologie



- Ein weiterer wichtiger Schritt: Computer werden „alltagstauglich“
 - der Anfang der **Personal Computer**...

Xerox-Alto (1973)

- „Erster Computer, der auch ohne Ausbildung zum Techniker bedient werden konnte“
- Technische Daten des Xerox-Alto:
 - 16-Bit CPU
 - Taktfrequenz 5,8 MHz
 - Hauptspeicher 128 KByte (bis 256 KByte)
 - Festplatte 2,5 MByte
 - Monochrom-Monitor, Tastatur, Drei-Tasten-Maus
 - Preis 32.000 \$
- Erster Computer mit graphischer Oberfläche (Rastergrafik)
 - Viele der Ansätze wurden später für Apple-Computer übernommen...



Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



Altair 8800 (1974)

- Erster „Low-Cost PC“
- Technische Daten des Altair 8800:
 - 8-Bit CPU (Intel 8080)
 - Taktfrequenz 2 MHz
 - Hauptspeicher 256 Byte (bis 64 KByte)
 - Preis 750 \$ (bzw. als Bausatz 495 \$)
- Einfachste Benutzerschnittstelle...
 - Kein Bildschirm – Frontpanel mit LEDs
 - Keine Tastatur – Kippschalter zur Bit-weisen Programmierung
 - Programme konnten kaum mehr als „LEDs blinken lassen“...
- Erst im Lauf der Zeit wurden zusätzliche Peripheriegeräte verfügbar
 - z.B. Lochstreifen-Leser/Schreiber, Datasette, ...



Apple II (1977)

- Technische Daten des Apple II:
 - 8-Bit CPU (MOS-Technology 6502)
 - Taktfrequenz 1 MHz
 - Hauptspeicher 4 KByte (bis 64 KByte)
 - Zwei 5¼ Zoll Diskettenlaufwerke
 - Preis 1298 \$
- Programmierung:
 - BASIC als integrierte Programmiersprache
 - Betriebssysteme: AppleDOS, ProDOS, ... (von Diskette)
 - Verschiedene Hochsprachen-Compiler (Pascal, Modula-II, ...)
- Die Apple-II Baureihe war als **offenes System** konzipiert
 - Steckplätze für Erweiterungskarten und Veröffentlichung aller wesentlichen Konstruktionsdetails (z.B. Firmware)...
 - ...führten zur raschen Verfügbarkeit von Erweiterungskarten/Peripherie



Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



IBM-PC (1981)

- Technische Daten des IBM-PC:
 - 16-Bit CPU (Intel 8088)
 - Taktfrequenz 4,77 MHz
 - Hauptspeicher 16 KByte oder 64 KByte
 - Zwei 5¼ Zoll Diskettenlaufwerke
 - Preis 3000 \$
- Ebenfalls als **offenens System** konzipiert (Konzept geklaut bei Apple II...)
- Entwickelte sich zum **inoffiziellen Industriestandard**, da Architektur offengelegt wurde und ohne Lizenzkosten nachgebaut werden durfte
 - Dadurch Entwicklung einer Vielzahl „**IBM-kompatibler**“ PCs
 - Dadurch rasche Verfügbarkeit von Erweiterungskarten/Peripherie und einer Vielzahl von Software



Vom Abakus zum Supercomputer

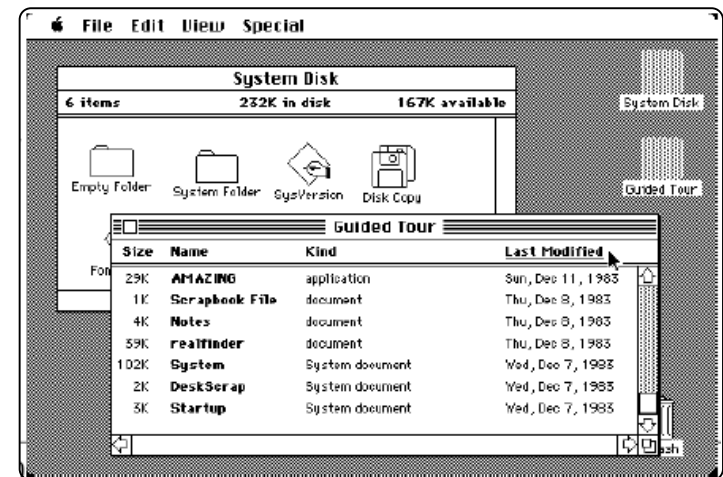
Die Explosion der Halbleitertechnologie



Hochschule
Abstadt-Sigmaringen
Abstadt-Sigmaringen University

Apple Macintosh (1984)

- Merkmale des Apple Macintosh:
 - 16-Bit CPU (**Motorola 68000**)
 - Taktfrequenz 8 MHz
 - Hauptspeicher 128 KByte
 - Ein 3,5 Zoll Diskettenlaufwerk
 - Integrierter 9 Zoll Monitor
 - Preis 2495 \$
- **Eingebautes Betriebssystem**
(„System“, erst sehr viel später „MacOS“)
- **Graphische Benutzerschnittstelle**
und **Benutzungsphilosophie**
(„Icons“ / „Drag-&-Drop“ / „Schreibtisch“ / ...)
 - Erfindung des „**WYSIWYG**“-Prinzips
(„What-You-See-Is-What-You-Get“)



Vom Abakus zum Supercomputer

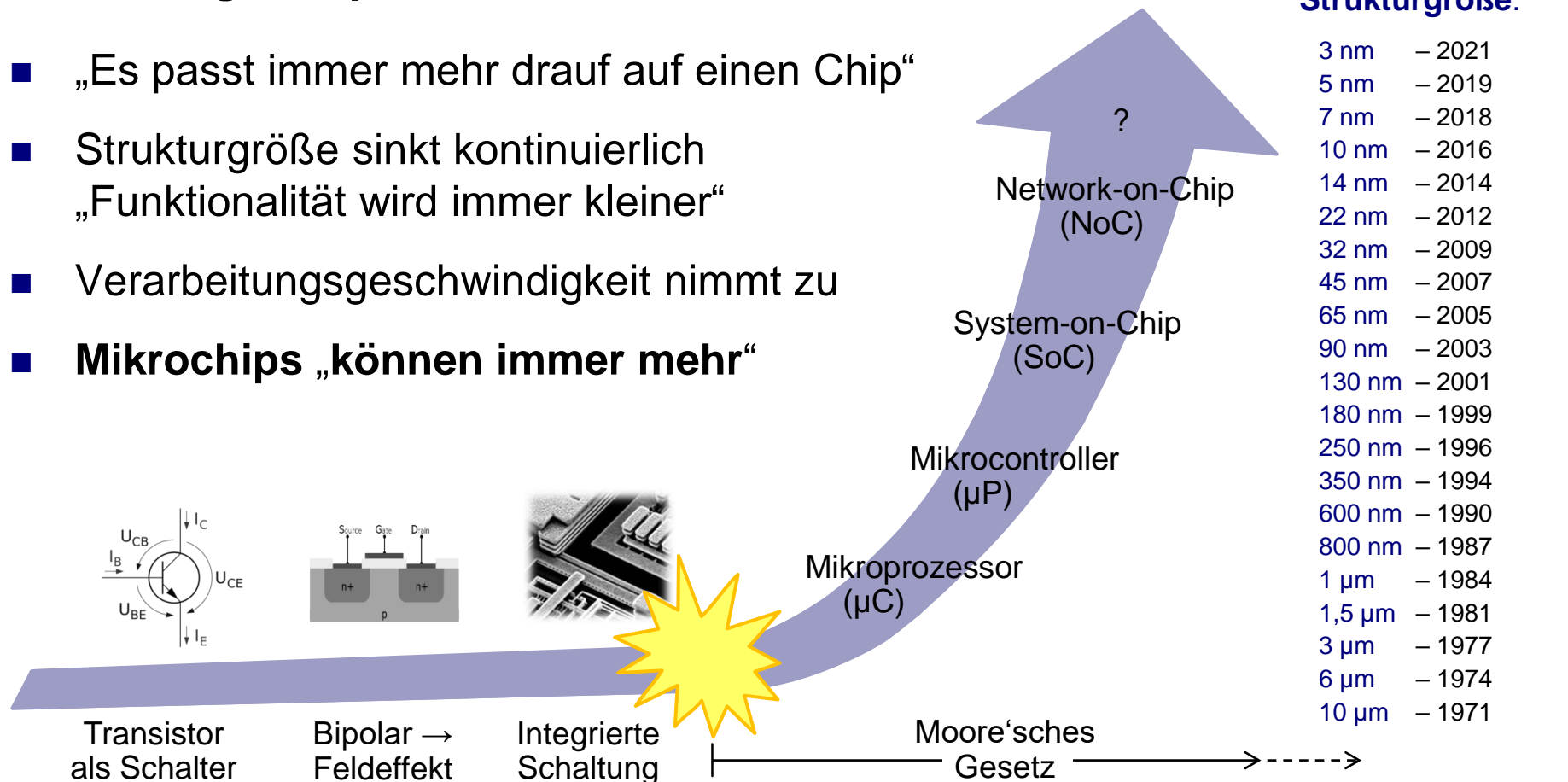
Die Explosion der Halbleitertechnologie



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Konsequenzen der Technologie-Explosion

- „Es passt immer mehr drauf auf einen Chip“
- Strukturgröße sinkt kontinuierlich
„Funktionalität wird immer kleiner“
- Verarbeitungsgeschwindigkeit nimmt zu
- **Mikrochips „können immer mehr“**



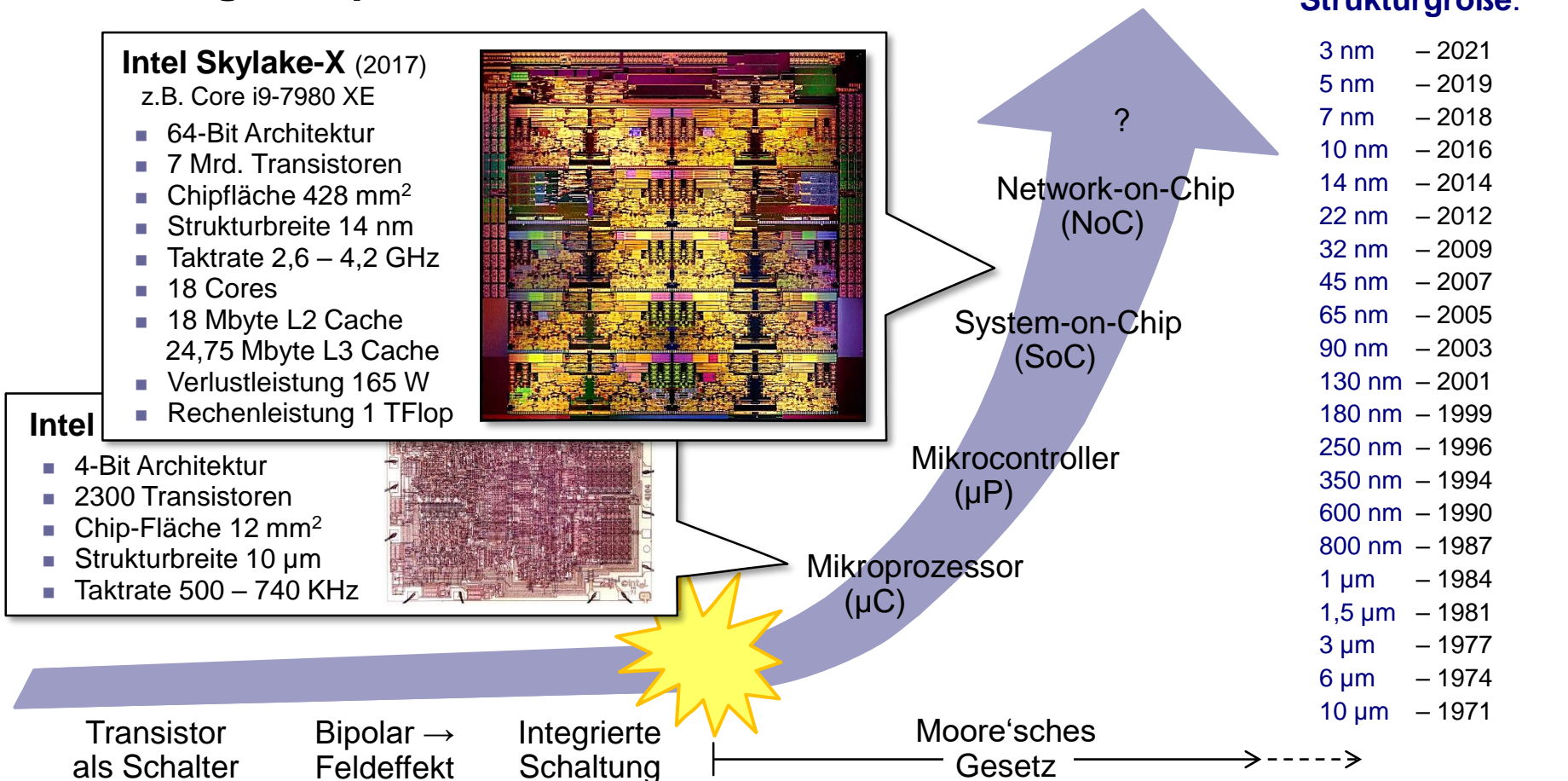
Vom Abakus zum Supercomputer

Die Explosion der Halbleitertechnologie



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Konsequenzen der Technologie-Explosion



Vom Abakus zum Supercomputer

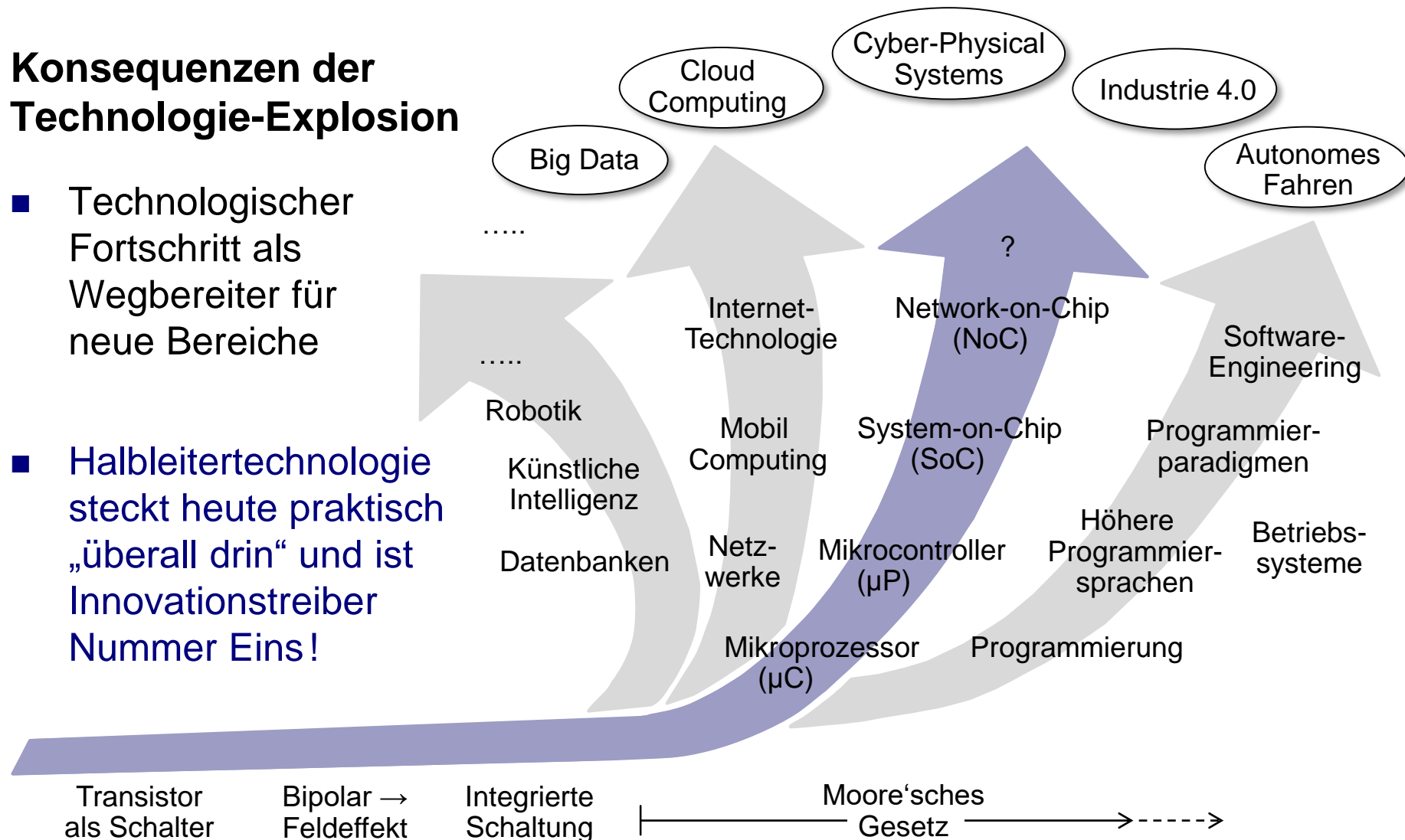
Die Explosion der Halbleitertechnologie



Hochschule
Albstadt-Sigmaringen
Albstadt-Sigmaringen University

Konsequenzen der Technologie-Explosion

- Technologischer Fortschritt als Wegbereiter für neue Bereiche
- Halbleitertechnologie steckt heute praktisch „überall drin“ und ist Innovationstreiber Nummer Eins!



Teil-1: Einführung in Digitale Rechnersysteme

- **Vom Abakus zum Supercomputer**

Teil-2: Grundlagen der Digitalen Datenverarbeitung

- **Grundlagen der Digitaltechnik**
- **Zahlendarstellung und Codes**
- **Boolesche Algebra**

Teil-3: Digitale Schaltungstechnik

- **Kombinatorische Schaltungen**
- **Sequentielle Schaltungen**
- **Entwurf digitaler Schaltungen heute**

- Die elektrische Revolution
- Der Siegeszug des Transistors
- Die Explosion der Halbleitertechnologie
- Quo vadis?

Wird das Moore'sche Gesetz „ewig so weitergehen“ ?

- (Früherer) Werbespruch von Intel:
» **No exponential is forever ...but we can delay „forever“** «
- **Nein!** – In (naher) Zukunft ist eine Verlangsamung (ein Stopp) der Integrationsdichte-Explosion zu erwarten !
- Gründe dafür ?

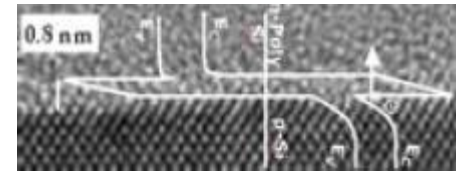
- **Physikalische Grenzen**



- Transistorgröße liegt längst im „atomaren Bereich“
- „Harte“ (aber vollkommen utopische) Grenzen:
- Transistorgröße kann nicht kleiner als Größe *eines* Atoms sein
- Ladungsdifferenz zwischen Logisch-High und Logisch-Low kann nicht kleiner als Elementarladung *eines* Elektrons sein



Si-Atom: 0,22 nm



Gateoxid: 0,8 nm

Wird das Moore'sche Gesetz „ewig so weitergehen“?

■ Gründe dafür? [Fortsetzung]

■ Energiedichte auf Chips

- Bei minimal möglicher Ladungsdifferenz zwischen Logisch-High und Logisch-Low von einem Elektron wäre die Energiedichte ca. 3,7 MW/cm²
- Zum Vergleich: Sonnenoberfläche: 6 KW/cm²
Heutige Prozessoren: 100 – 200 W/cm²
Herdplatte: 9 W/cm²

■ Fertigungsausbeute („Yield“)

- Heutige Gateoxid-Dicke eines Transistors entspricht gerade mal 8 Atomlagen
- Dadurch große relative Fehler – mindestens 12,5%

■ Quantenmechanische Effekte

- Heiße Elektronen, Tunneleffekte, ...

„Das Ende des Moore'schen Gesetzes
ist kein technisches Problem, sondern
ein ökonomisches“
(Bill Bottoms)

Wird das Moore'sche Gesetz „ewig so weitergehen“ ?

■ „More Moore“ or „More than Moore“ ?

Fortsetzung der
bisherigen Strategie
(kleiner-shrinken)

Übergang zu
neuen Strategien

■ „Vorboten“ von „More than Moore“ ...

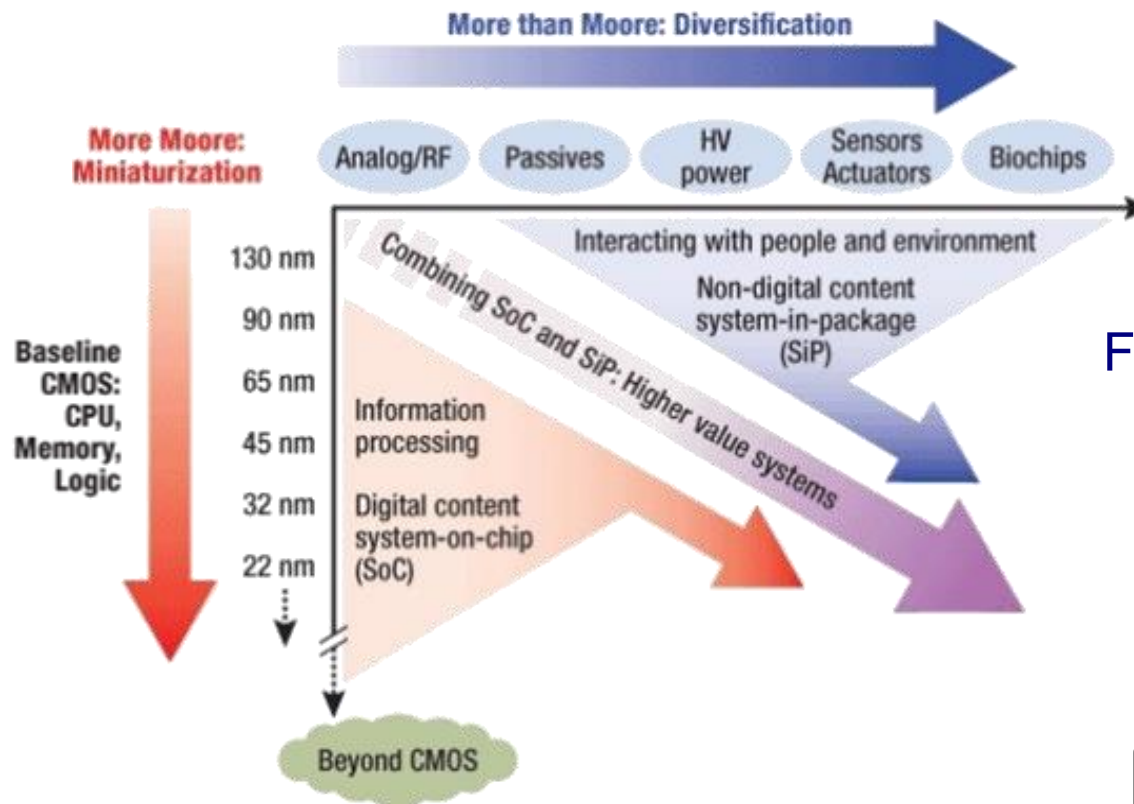
Ab ca. 2005:

- Kaum noch Erhöhung der Taktfrequenz (ca. 2–4 GHz)
- Übergang zu Multicore-Architekturen, Skalierung der Anzahl Cores (Single-Core → Dual-Core → Quad-Core → Oct-Core → ...)

„The processor is the NAND gate of the 21st century“
(Chris Rowen, CEO Tensilica)

Ausblick auf „More than Moore“

■ ITRS-Roadmap:



Kernaussage :

„Miniaturisierung digitaler Funktionalität“ („More Moore“)

wird mehr und mehr ergänzt durch

„funktionale Diversifikation“ („More than Moore“)

〔 „Diversifikation“ = Mannigfaltigkeit, Heterogenität, mehrumfassend 〕

[Quelle: ITRS Nanoelectronics Technology Roadmap]

Ausblick auf „More than Moore“

- Diversifikation...
 - Heterogener Mix verschiedener Entwurfsdomänen
Digital → Digital + Analog + Mixed-Signal + HV + RF + Mikromechanik + ...
 - Ausdehnung der Systemgrenzen
„System-on-Chip“ (SoC) → „Cyber-Physical Systems“ (CPS)
Processing → Sensorik + Processing + Aktorik + ... + Environment
 - Neue Materialien
Silizium → GaAs, Nano-Tubes, ...
 - Neue Fertigungstechniken
planar → 3D, Shrunked, Stacked, SiP, ...
 -
 - Neue Funktionsprinzipien
Halbleiter → Mehrwertige Logik, Elektronenspin, ... , Quanten-Computing, ...