

Vorlesung

Entwurf digitaler Schaltungen

Kapitel 1: Einführung

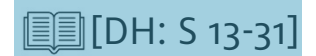
Bernhard Rinner

12.09.2024 16:35



Institut für Vernetzte und Eingebettete Systeme

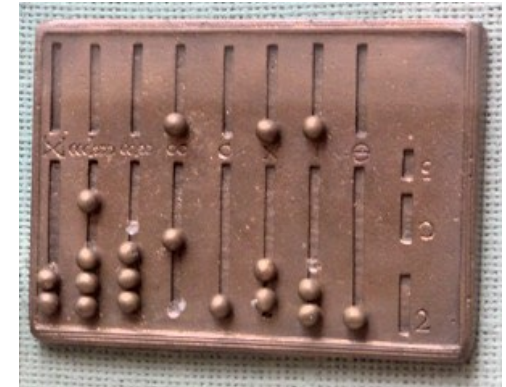
1. Geschichtliche Entwicklung des Computers
2. Digitale Schaltungen



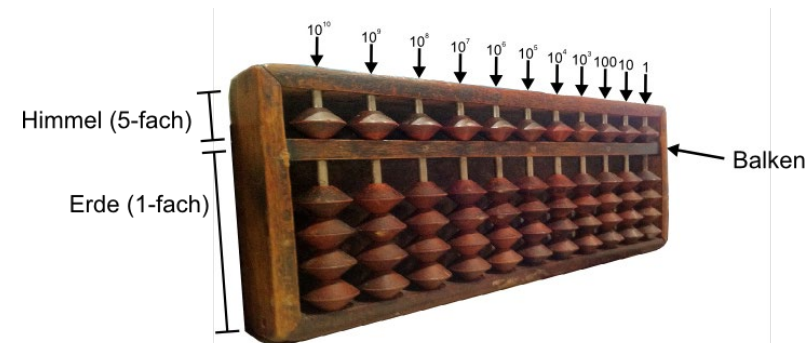
Geschichtliche Entwicklung des Computers

Erste Rechenmaschinen

- Abakus
 - Eines der ältesten Rechenhilfsmittel, vermutlich sumerischen Ursprungs
 - (wiederholtes) Addieren von ganzen Zahlen
- Japanischer Abakus (Soroban) ca. 1600
 - Jeder Stab repräsentiert eine Ziffer von 0 bis 9
 - Kugeln unterhalb Balken zählen 1-fach die Kugel oberhalb 5-fach
 - Kugeln werden gezählt, wenn sie gegen den Balken geschoben sind



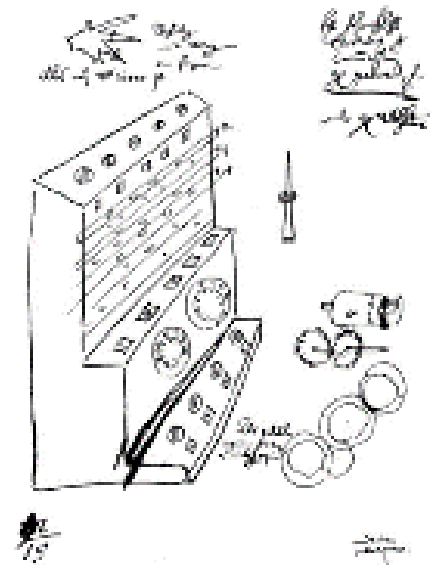
Rekonstruktion eines
römischen Abakus
© Wikipedia



Japanischer Abakus
© Wikipedia

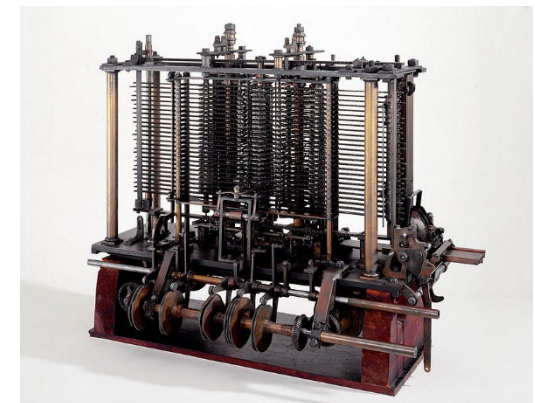
Mechanische Rechenmaschinen

- Wilhelm Schickard (1623)
 - Erste urkundliche Erwähnung (Brief an Kepler)
 - Addier- und Subtrahierwerk, sowie Vorrichtung zum Multiplizieren und Dividieren
 - Nicht für Alltagsgebrauch geeignet
 - Varianten auch von Blaise Pascal, Georg Wilhelm Leibniz



Originalzeichnung aus
F.Seck „Wilhelm Schickard 1592-1635“

- Charles Babbage (1791-1871): Analytical Engine
 - Entwurf einer mechanischen Rechenmaschine für allgemeine Anwendungen
 - Konzept wurde nicht vollständig realisiert; Entwurfspläne waren funktionstüchtig
 - Grundlage eines Computers



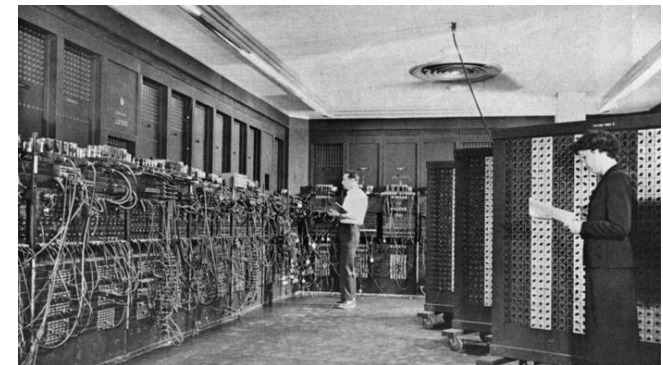
Science Museum London

Beginn des Computer-Zeitalters

- Konrad Zuse (1910-1995)
 - Z1: mechanischer Rechner im binären Zahlensystem
 - Elektromotor als Taktgeber (1 Hz)
 - Z2: Kombination aus Relais und mechan. RW
 - 1941 Z3: aus ca. 2000 Relais
- ENIAC (1946)
 - Electronic Numerical Integrator and Computer
 - Vakuumröhren (>17.000) anstelle von Relais beschleunigt Taktfrequenz
 - Programmierung durch Verdrahtung
 - UNIVAC I (1951): Nachfolgemodell



© Nachbau. Deutsches Museum München
vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Zuse_Z3

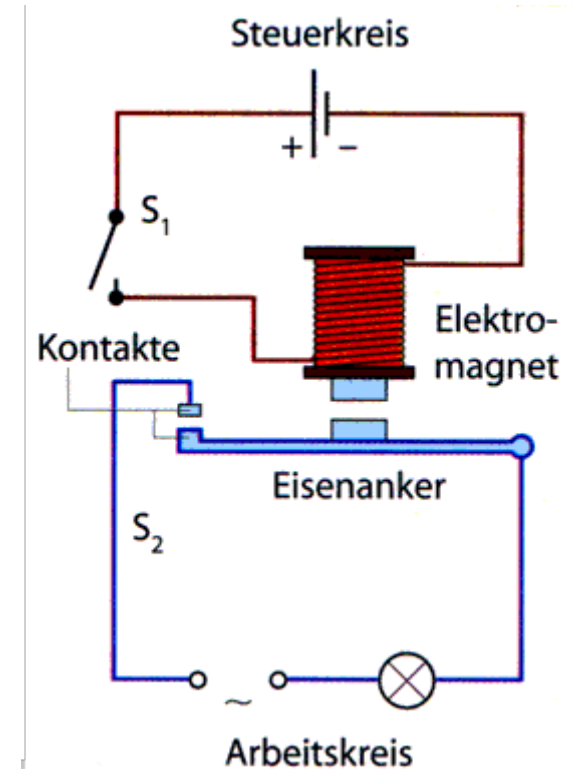


© United States Army
vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/ENIAC>

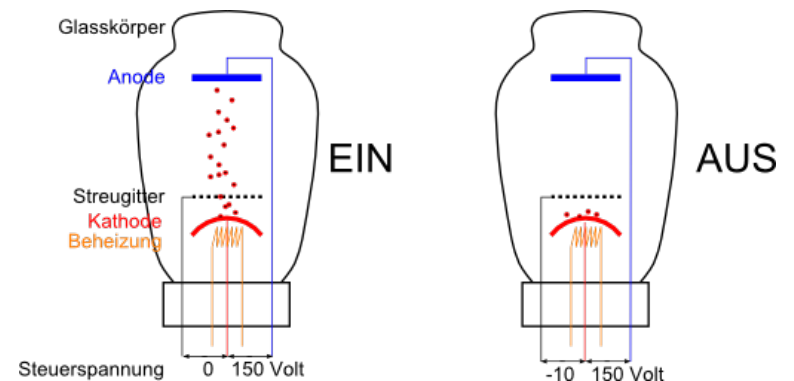
Schaltelemente

- Relais
 - Schalter gesteuert durch Elektromagnet
 - Steuerstromkreis
 - Arbeitsstromkreis (auch große Ströme bzw. Spannungen)

- Vakuumröhre
 - Elektronen werden von beheizter Kathode abgegeben
 - Stromfluss wenn Elektronen bei Anode ankommen (abh. von Spannung an Steuergitter)
 - Schnelle Schaltzeiten

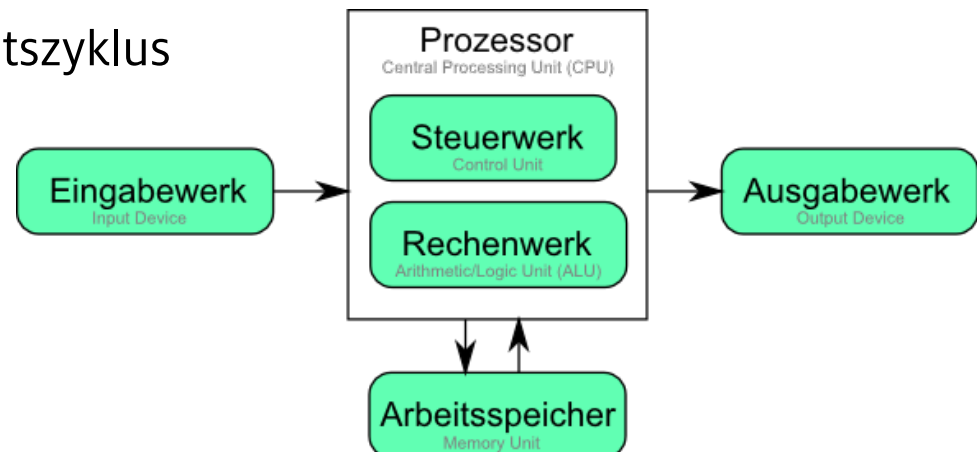


© www.laurentianum.de



Rechnerarchitektur

- Institute of Advanced Studies IAS (von-Neumann-Rechner)
 - Vakuumröhren im Binärsystem (im Ggs. zu ENIAC)
 - Klare Struktur (unabhängig vom zu bearbeitenden Programm)
- Von-Neumann Architektur
 - nach wie vor bei einfachen Prozessoren realisiert
 - Trennung von Datenpfad und Speicher
 - Gemeinsamer Speicher für Daten und Befehle
 - Fetch-Decode-Execute Arbeitszyklus



Von-Neumann Rechnerkonzept

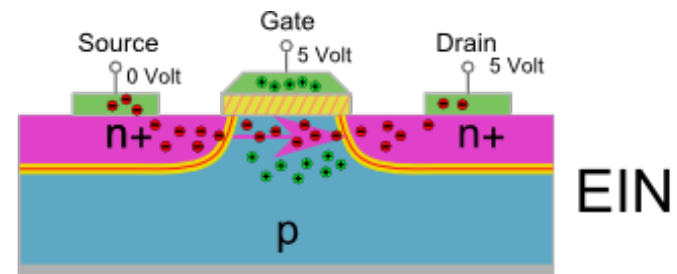
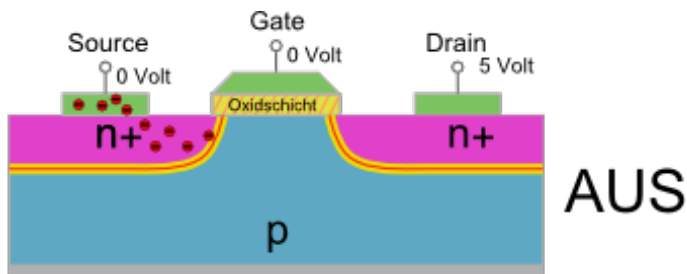
- Befehle und Daten **binär codiert**; gemeinsamer Speicher
- Speicher in **Zellen gleicher Größe** organisiert; über fortlaufenden Nummern adressierbar
- Befehle werden **sequentiell** (nacheinander) abgearbeitet
- **Sprungbefehle** ändern den Programmablauf
- Der Speicherinhalt (Daten und Befehle) kann durch Rechner modifiziert werden
- Von-Neumann Konzept nach wie vor **weit verbreitet**
 - Einfache Programmierung durch streng sequentiellen Ablauf (keine Parallelverarbeitung)

Transistor-basierte Computer

- Transistorprinzip (Feldeffekttransistor)

 [DH: S 46-48]

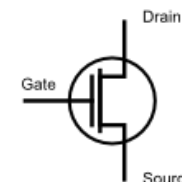
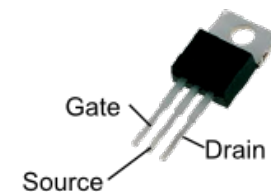
- Halbleiter (Silizium, Germanium etc.) als Basismaterial; gezielte Verunreinigungen (Dotierung) beeinflussen Leitfähigkeit



© T. Thormählen, Uni Marburg

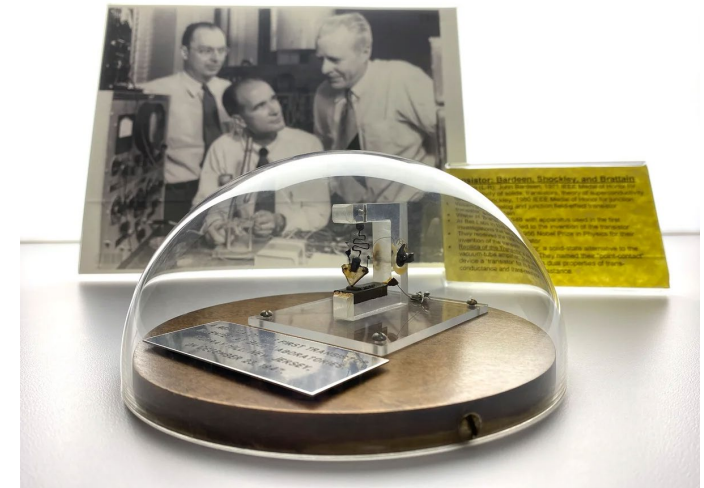
- 3 Anschlüsse: Source, Gate, Drain
- Strom zwischen Source und Drain abh. von Spannung zwischen Source und Gate
- 2 Zustände: AUS/EIN

Feldeffekttransistor

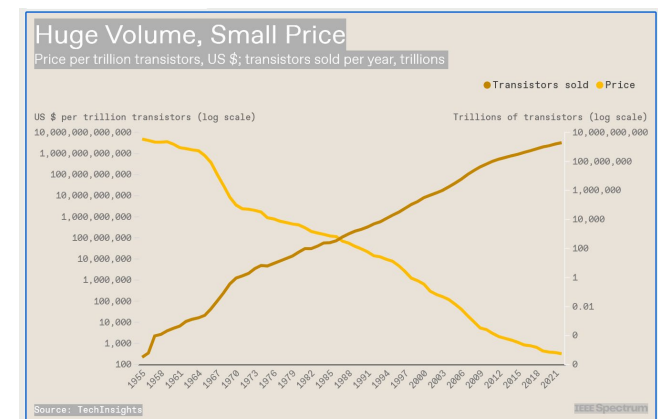


Transistoren verändern alles

- Erfunden von William Shockley, John Bardeen and Walter Brattain im **Dezember 1947**
- Nobelpreis in Physik im Jahr 1956
- Ersetzten Vakuumröhren als Schaltelemente
 - Schneller, kleiner, billiger, geringerer Leistungsbedarf, zuverlässiger, ...
- Erfindung **mit größter Auswirkung** des 20. Jahrhunderts
 - Grundbaustein für **integrierte Schaltungen** und damit digitaler Schaltungen
 - Ca. $2 * 10^{21}$ Transistoren wurden im Jahr 2021 produziert!



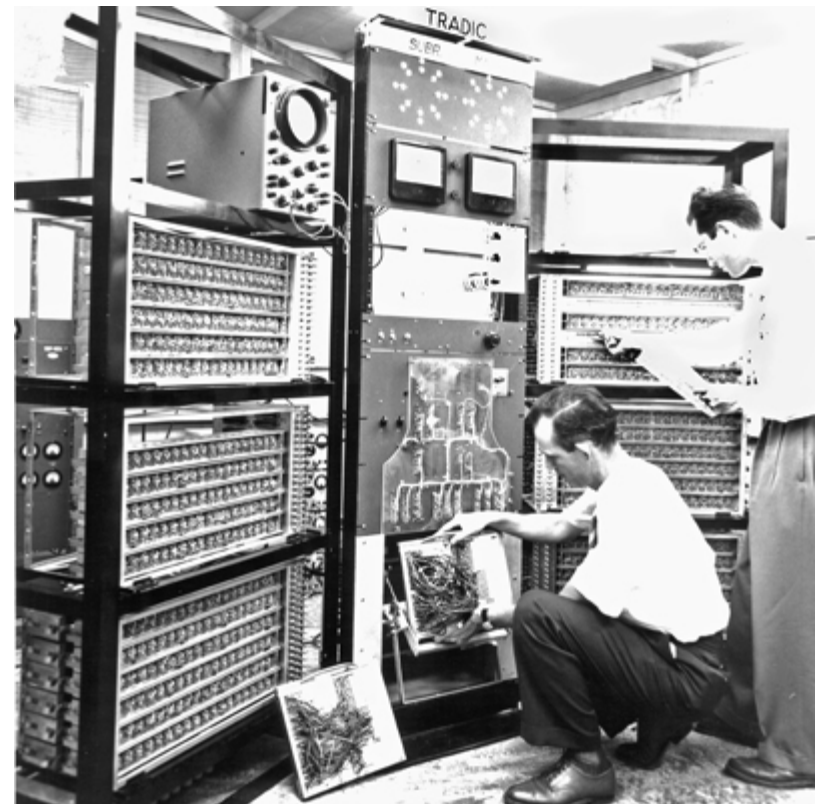
Nachbau des originalen "Spitzentransistors"
© IEEE Spectrum Dec 2022.



Entwicklung von Kosten und Anzahl
© IEEE Spectrum Dec 2022.

TRADIC

- Transistor Digital Computer (1955)
- Von AT&T Bell Labs für US Air Force entwickelt
- Aus ca. 700 Transistoren und 10.000 Dioden aufgebaut
- Leistungsaufnahme ca. 100 Watt
- Geschwindigkeit ca. 1 Million logische Operationen pro Sek. (1 MHz)



© www.cedmagic.com

Mailüfterl

- Erster transistor-basierter Computer in Kontinentaleuropa (Mai 1958)
- Entwickelt von Heinz Zemanek (1920-2014; IBM Fellow) später gekauft von IBM
- Bestand aus ca 2000 Transistoren und 5.000 Dioden
- Taktfrequenz 132 kHz
- BCD-Darstellung für Zahlen

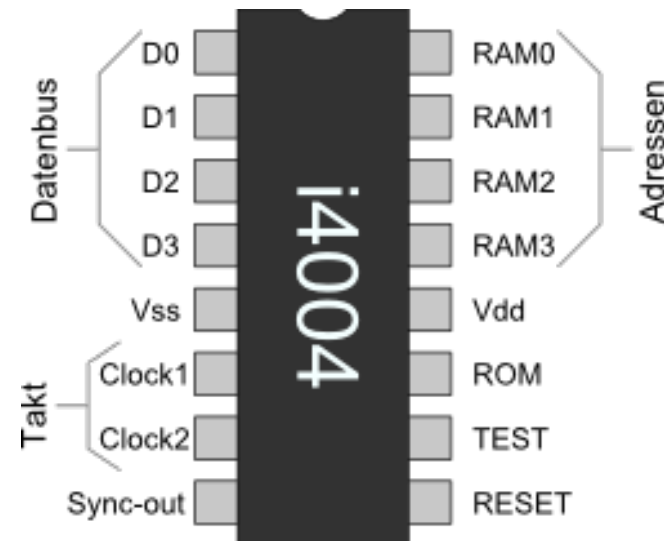


Technisches Museum Wien
©Wikipedia

Integrierte Schaltungen

 [DH: S 51-57]

- Integrierte Schaltungen bzw. **Integrated Circuits (IC)**
 - Anstatt einzelne Transistoren als diskretes Bauelement herzustellen, werden viele Transistoren auf **einem Stück Halbleitermaterial integriert**
 - 1958: Jack Kilby (Texas Instruments) erzeugte den ersten IC
 - Marktreife einige Jahre später. Das erste Computersystem, in dem sie kommerziell zum Einsatz kamen, waren die IBM /360 Rechner
- **Intel 4040**: erster Mikroprozessor (1971)
 - 2250 Transistoren (10 μm Strukturbreite)
 - Taktrate von 108 MHz
 - 4 bit Datenbus



Intel x86 CPU Familie

Name	Datum	Taktrate	Anzahl Transistoren	adressierbarer Speicher	Anmerkungen
8086	6/1978	5-10 MHz	29000	1 MiB	16-Bit-CPU
80286	2/1982	6-20 MHz	134000	16 MiB	
80386	10/1985	16-33 MHz	275000	4 GiB	32-Bit-CPU
80486	4/1989	25-50 MHz	1,2 M	4 GiB	8K-Cache
Pentium	1993	60-233 MHz	3,1 M	4 GiB	zwei Pipelines
Pentium Pro	3/1995	150-200 MHz	5,5 M	4 GiB	zwei Cache-Ebenen
Pentium II	5/1997	233-400 MHz	7,5 M	4 GiB	MMX (SIMD)
Pentium III 2	1999	450-600 MHz	9,5 M	4 GiB	SSE (SIMD)
Pentium 4	2/2000	1,3-2,0 GHz	42 M	4 GiB	drei Cache-Ebenen
Pentium 4 Prescott	2/2004	3,8 GHz	125 M	4 GiB	64-Bit-CPU
Core 2 Duo	7/2006	2*(1,8-3,2) GHz	bis zu 410 M	4 GiB	2-Kern Prozessor
Core 2 Quad	1/2007	4*(2,5-3,2) GHz	bis zu 820 M	64 GiB	4-Kern Prozessor
Core i7	9/2009	6* (2,8-3,9) GHz	ca. 1 G	16 TiB	6-Kern Prozessor

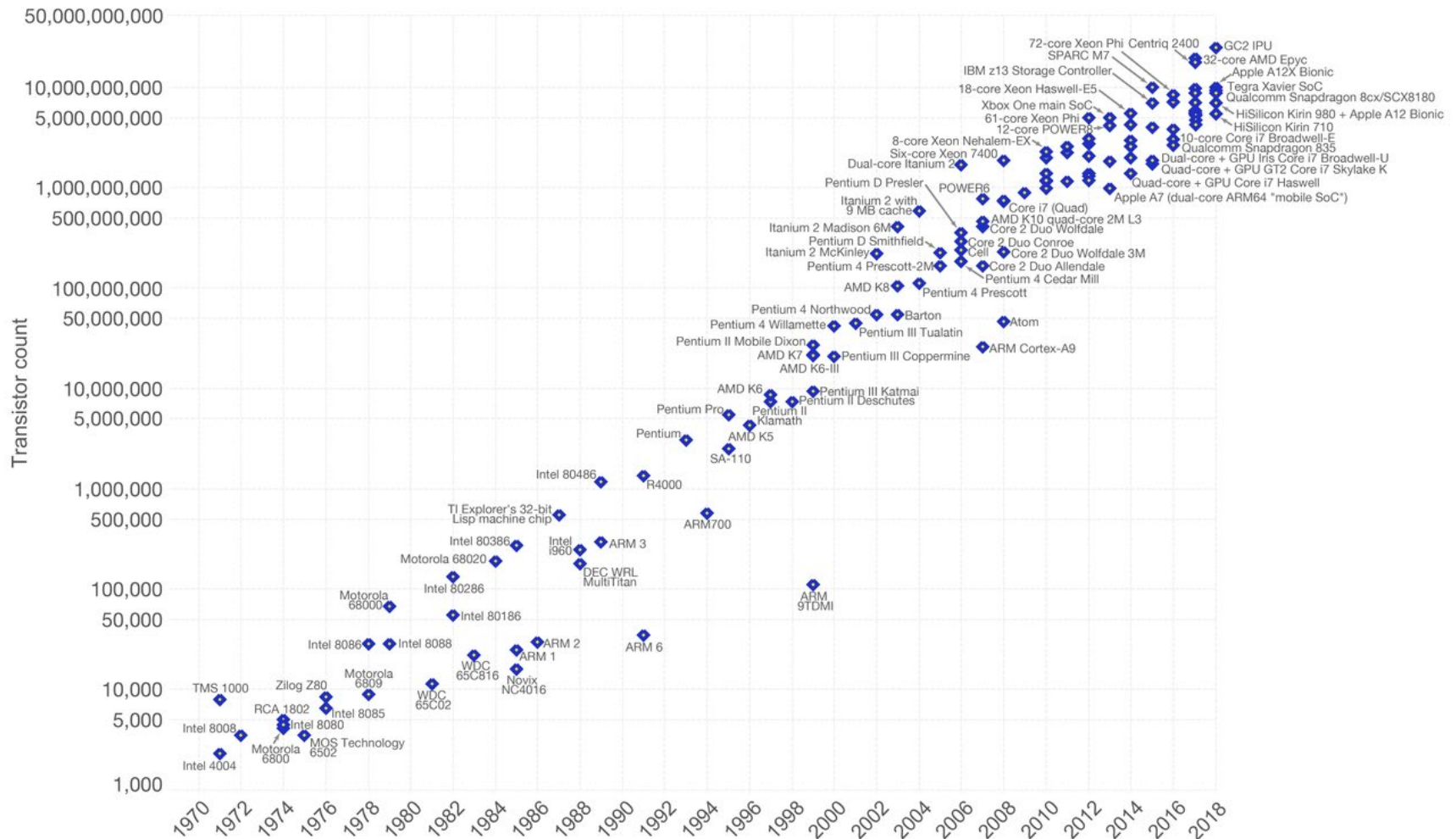
„Moore's Law“

- "The complexity for minimum component costs has increased at a **rate of roughly a factor of two per year**. Certainly over the short term this rate can be expected to continue, if not to increase. Over the longer term, the rate of increase is a bit more uncertain, although there is no reason to believe it will not remain nearly constant for at least ten years" – Gordon E. Moore, 1965
- 1975 korrigierte Moore seine Aussage Verdoppelung **alle zwei Jahre**
-> **exponentieller, zeitlicher Anstieg der Schaltungskomplexität**
- Anm: Gründung der Fa. Intel durch G. Moore & R. Noyce 1968

Transistoren pro Mikroprozessor (IC)

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

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



Der größte Prozessor (Stand 2021)

- Wafer Scale Engine 2 (WSE-2) von Cerebras Systems
- Spezialprozessor für AI-Anwendungen (insb. zum Trainieren großer neuronaler Netze)
- Technische Daten
 - Größe: 46225 mm^2 (300 mm Wafer)
 - Anzahl der Transistoren: 2600 Milliarden
 - Anzahl der Prozessorkerne: 850000
 - On-chip Speicher: 40 Gbytes
 - Leistungsbedarf: 20 kW (inkl. Host System)
 - Verfügbar ab Q3/2021
 - Preis: Mehrere Millionen US\$



Computing Trends der letzten 75 Jahre

Technology	Origin/brief history	Current and future situation and trends
Computers including minicomputers and personal computers	1944: Harvard Mark I and Colossus were launched 1960: The first minicomputer, PDP-1, was released by Digital Equipment corporation ¹⁵ 1971: the first personal computer Kenbak I was launched 1975: The term "personal computer" is coined ⁴⁶	2020: The world's fastest supercomputer Fugaku's performance level: 442,010 teraflops 2019: 47.1% of households worldwide had a computer
Internet	1969: The Arpanet was started August 1991: The World Wide Web became publicly available	31 December 2020: 4.95 billion people online IP traffic: more than 45,000 GBPS in 2017, 150,700 GBPS by 2022 ¹⁶
Cell phones and cellular mobile networks	1973: DynaTAC 8000x was launched by Motorola 1983: DynaTAC 8000x was marketed	5G users worldwide: fewer than 200 million in 2019, 1.02 billion in 2023 and 3.5 billion in 2026 ¹⁶
Cloud computing	1996: Executives of Compaq Computer first used the term 2006: Large companies started offering cloud computing	2025: 49% of stored data will be in public clouds (IDC's estimate) Barracuda Networks: 45% of IT infrastructure used by companies was in the public cloud in 2020 and is expected to increase to 76% by 2025
Big data	2001: The formal definition was proposed by Gartner	IDC: The size of the Global DataSphere 33 ZB, over 59 ZB in 2020 and expected to reach 175 ZB by 2025
Internet of Things	1990: The first IoT device—a toaster—was controlled with a computer 1999: The term "Internet of Things" was first coined	Number of IoT devices: 14.2 billion in 2019, 25 billion in 2021, 64 billion in 2025
Artificial intelligence	The term was first used in 1956 Machine learning was first defined in 1959	AI spending: US\$37.5 billion in 2019, expected to reach US\$58 billion by 2021 and US\$97.9 billion in 2023
Blockchain	2008: Satoshi Nakamoto published a white paper on a decentralized peer-to-peer electronic cash system (Bitcoin) 2009: The first Bitcoin block was mined ¹⁸	PwC: blockchain will boost the global GDP by US\$1.76 trillion by 2030 ¹⁷ Main areas likely to be impacted: provenance, US\$962 billion; payments and financial services, US\$433 billion; identity management, US\$224 billion; contracts and dispute resolution, US\$73 billion; customer engagement, US\$54 billion
DT	2002: NASA became the first organizations to formally use the concept of DTs	The global DT market size: US\$3.1 billion in 2020, predicted to reach US\$48.2 billion by 2026

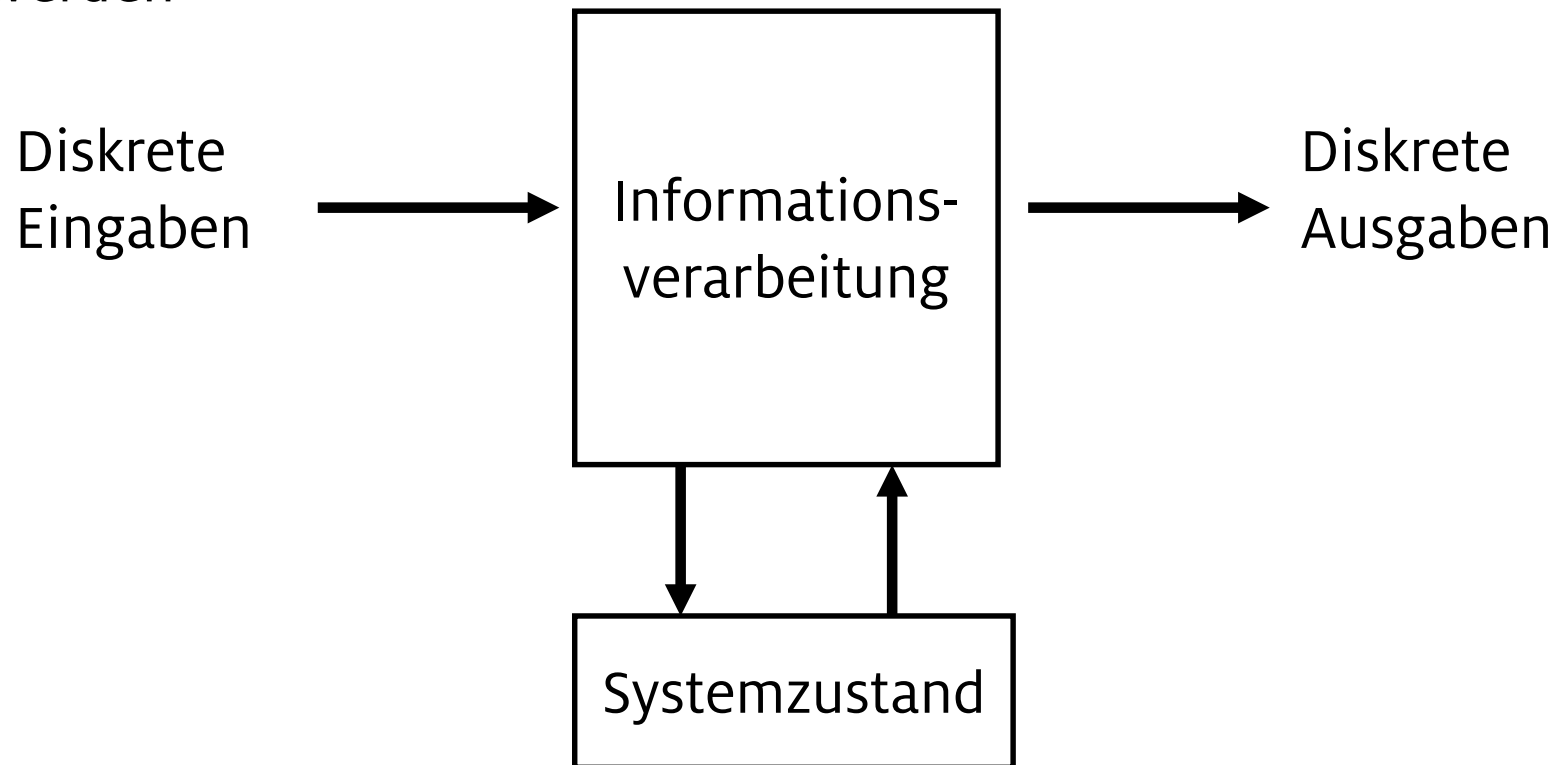
DT: Digital Twin

Quelle: Kshetri, Voas. [Major Computing Technologies of the Past 75 Years](#). Computer, 54(5):15-21, 2021

Digitale Schaltungen

Allgemeiner Aufbau

- Verarbeiten von diskreten Eingaben in diskrete Ausgaben
- Dabei kann ein interner Systemzustand beachtet/geändert werden

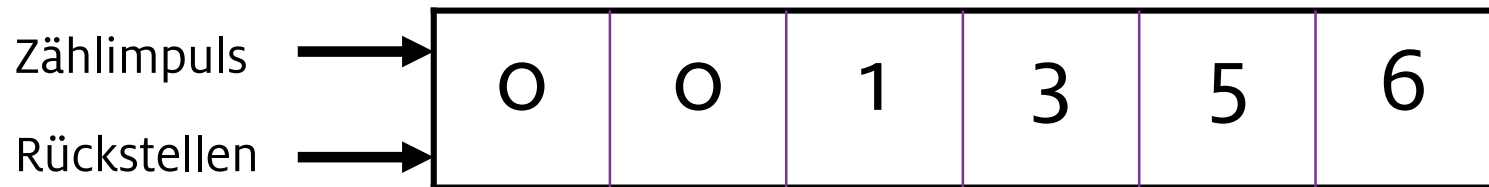


Klassen von digitalen Schaltungen

- Kein interner Systemzustand
 - Kombinatorische Schaltungen
 - $Ausgang = f(Eingang)$
- Mit internem Systemzustand
 - Sequentielle Schaltungen
 - $Zustand = g(Eingang, Zustand)$
 - $Ausgang = f(Eingang, Zustand)$
- Zu welchem Zeitpunkt erfolgt die Aktualisierung des Zustandes
 - Beliebig: asynchrone sequentielle Schaltungen
 - Zu definierten Zeitpunkten: synchrone sequentielle Schaltungen

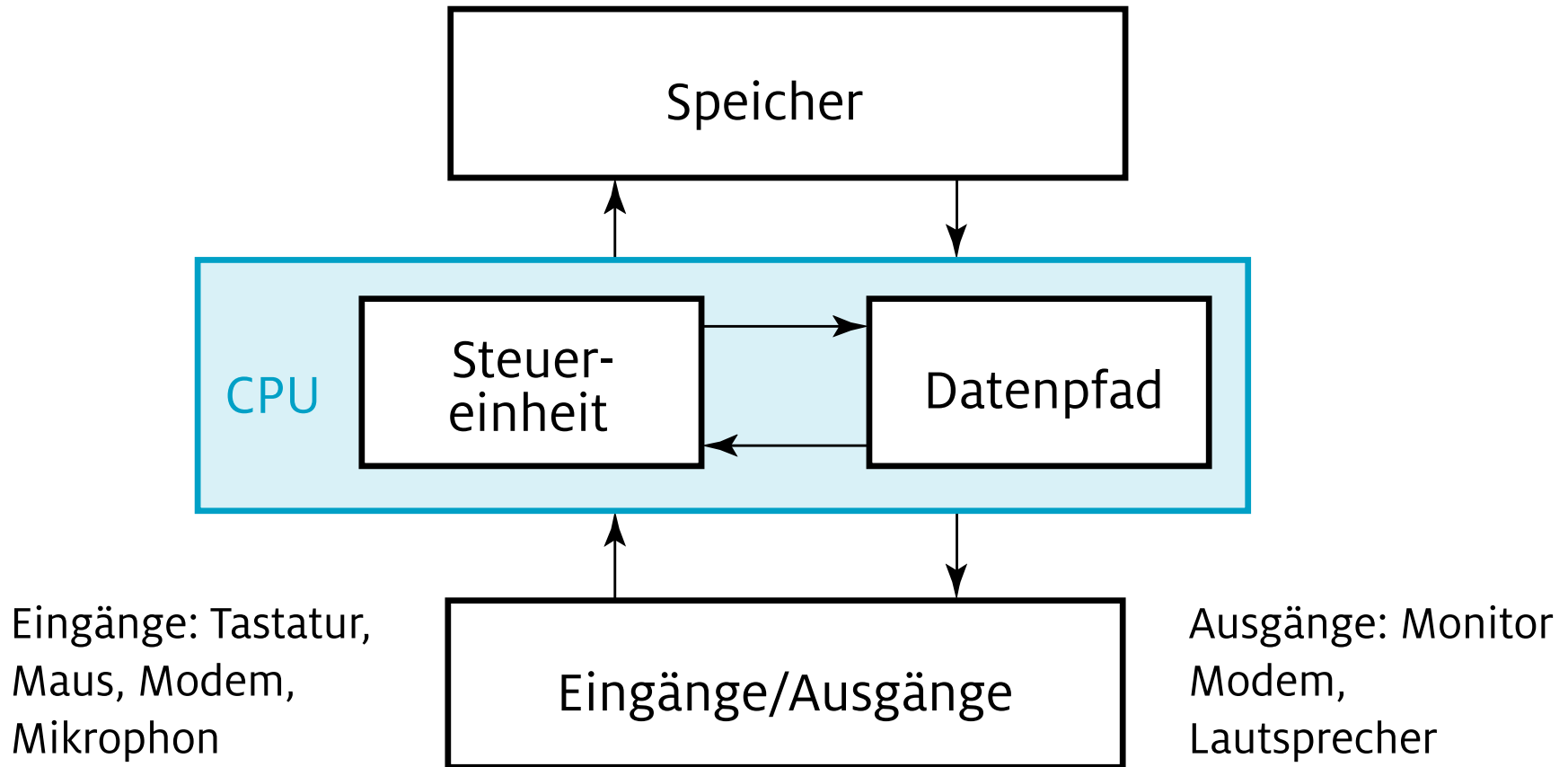
Beispiel: Tachometer

- Tachometer kann als digitaler Zähler dargestellt werden



- Eingänge
 - Zählimpuls
 - Rückstellen
- Ausgänge
 - Dargestellter Wert in der Anzeige
- Zustand
 - Aktueller Wert

Beispiel: Computer



Signale

- Eine Größe, die Informationen über ein (physikalische) Eigenschaft liefert
- In digitalen Systemen haben diese Größen diskrete Werte (Werte aus einer endlichen Menge)
- Am häufigsten werden **binäre Werte** verwendet, dh., die Wertemenge hat nur zwei Elemente
 - Zahlen 0 und 1
 - Begriffe „falsch“ und „richtig“
 - Zustände „aus“ und „ein“
 - Pegel „niedrig“ und „hoch“
 - ...

Signale über die Zeit

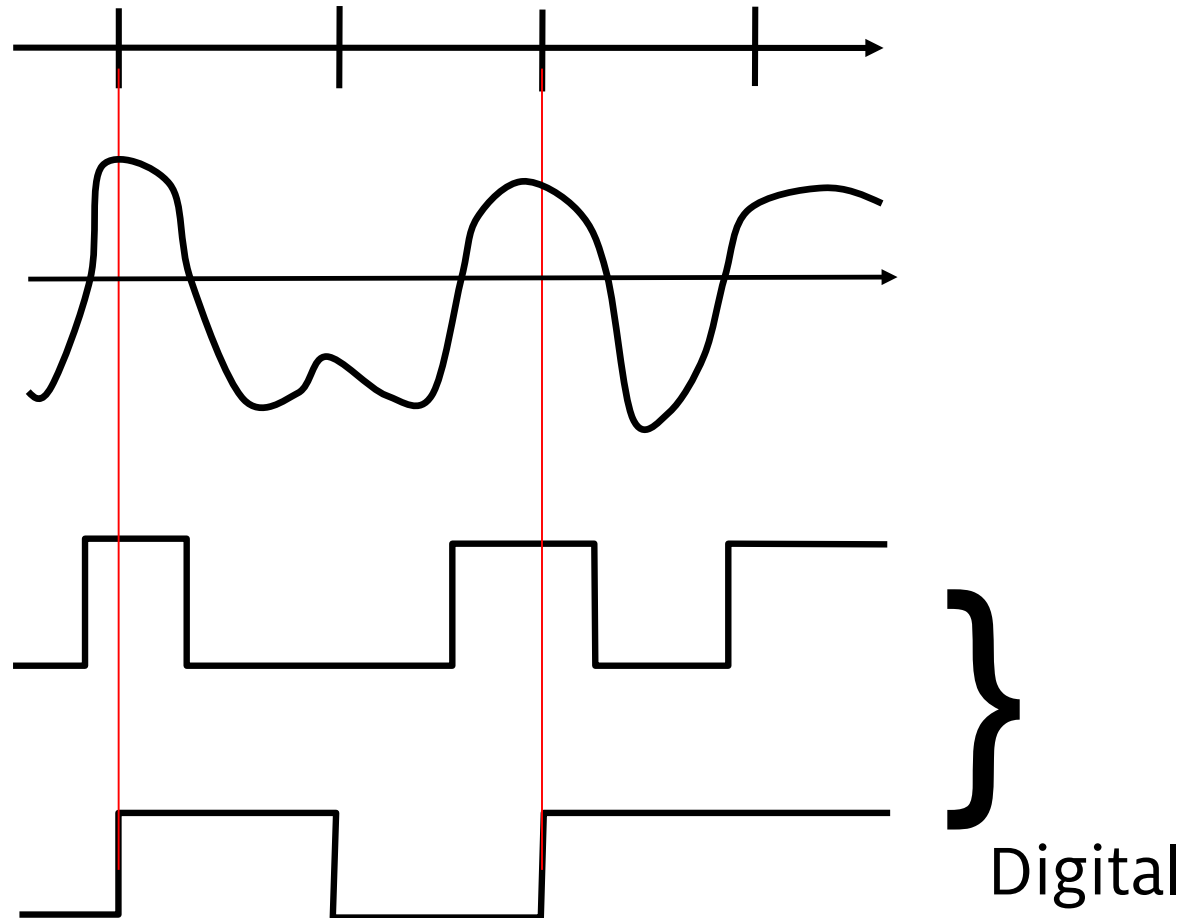
Zeitverlauf

Analoges Signal

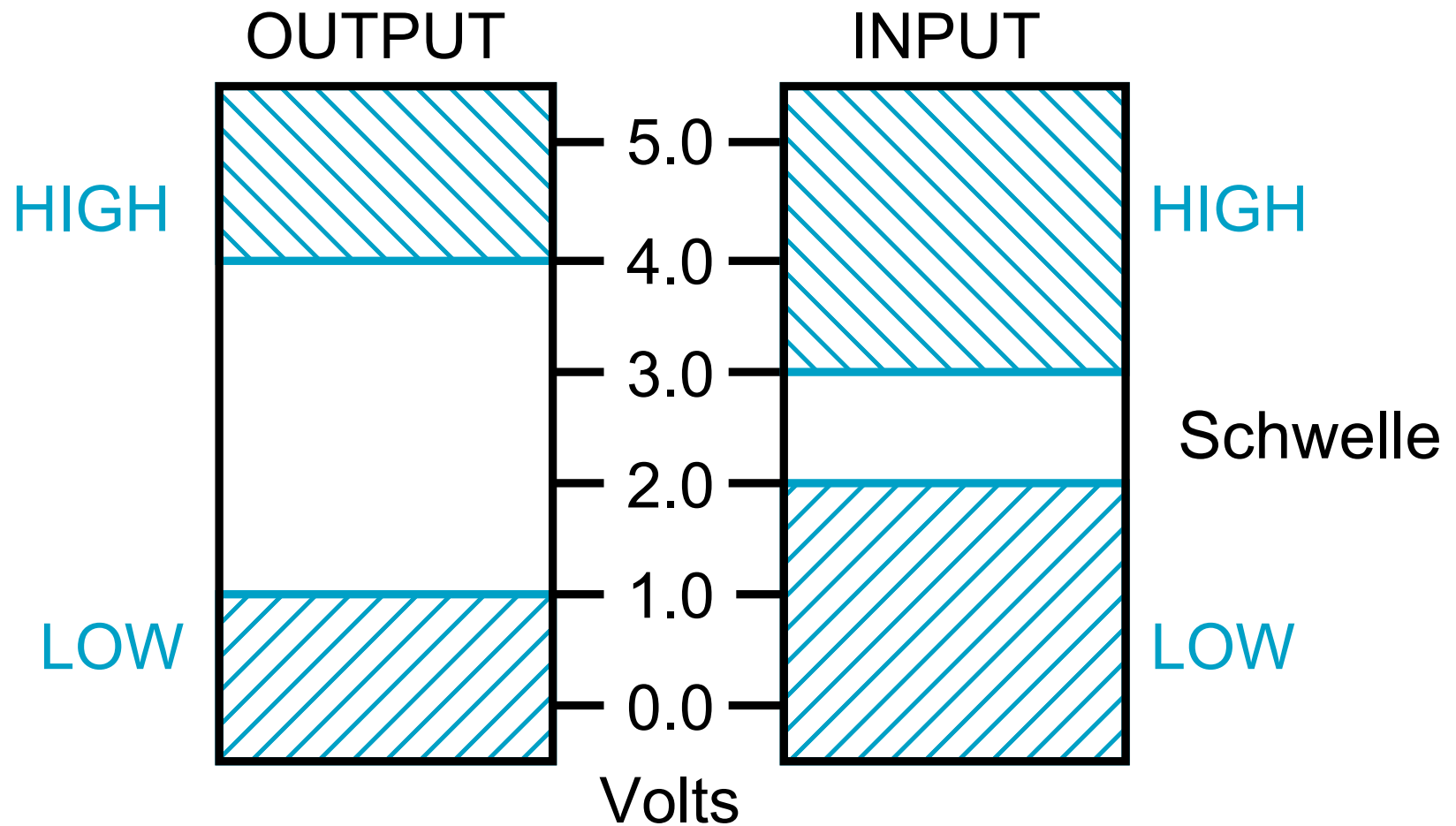
Diskretes Signal
(binäres Signal)

Asynchrone
Aktualisierung

Synchrone
Aktualisierung



Beispiel: Spannung als Signal

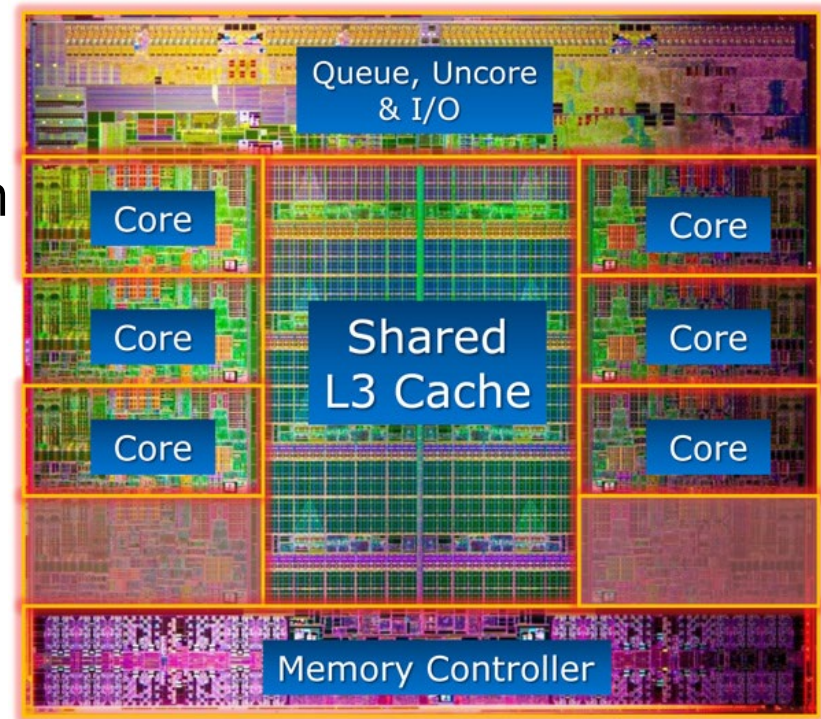


Physikalische Größen als binäre Signale

- Häufig verwendete Größen um zwei Zustände darzustellen
 - Integrierte Schaltungen Spannung
 - Festplatten Magnetfeld
 - CD Lichtreflexion
 - Speicher elektrische Ladung
 - ...

Herausforderungen

- Modellierung,
- Entwurf und
- Analyse von digitalen Schaltungen
- In dieser Vorlesung verfolgen wir einen **bottom-up Ansatz**
 - Lösen von einfachen Teilen
 - Realisierung von komplexen Teilen mit einfacheren Komponenten
- Unser Ziel ist den **Aufbau eines einfachen Prozessors** zu verstehen



Intel core-i7 Layout © www.Intel.com
 Größe: 20mm × 20mm
 Transistoren: $\sim 2,3 \cdot 10^9$
 Strukturgröße: 32 nm

Bernhard Rinner

E: bernhard.rinner@aau.at

W: <http://nes.aau.at>