

# Historischer Überblick

Parameter	Kursinformationen
Veranstaltung:	Digitale Systeme / Eingebettete Systeme
Semester:	Wintersemester 2025/26
Hochschule:	Technische Universität Freiberg
Inhalte:	<u>Übersicht der historischen Entwicklung von Rechentechnik</u>
Link auf GitHub:	<a href="https://github.com/TUBAF-IfI-LiaScript/VL_EingebetteteSysteme/blob/master/01_HistorischerUeb erblick.md">https://github.com/TUBAF-IfI-LiaScript/VL_EingebetteteSysteme/blob/master/01_HistorischerUeb erblick.md</a>
Autoren:	Sebastian Zug, André Dietrich, Fabian Bär & GitHub Copilot Teaching-Agent



## Fragen an die Veranstaltung

- Worin lag der „große Wurf“ des Intel 4004?
- Was bedeutet die Angabe 8bit, 16bit usw. ?
- Erklären Sie die Schichten der Rechnerstruktur.
- Worin unterschieden sich ENIAC und die Z3?
- Welche technologischen Durchbrüche ermöglichen die Miniaturisierung von Computern?
- Warum war die Harvard-Architektur für frühe Computer wichtig?
- Welche Rolle spielte die Erfindung des Transistors für die Computerentwicklung?
- Wie entwickelten sich Speichertechnologien im Laufe der Computergeschichte?

## Weiterführende Literaturhinweise

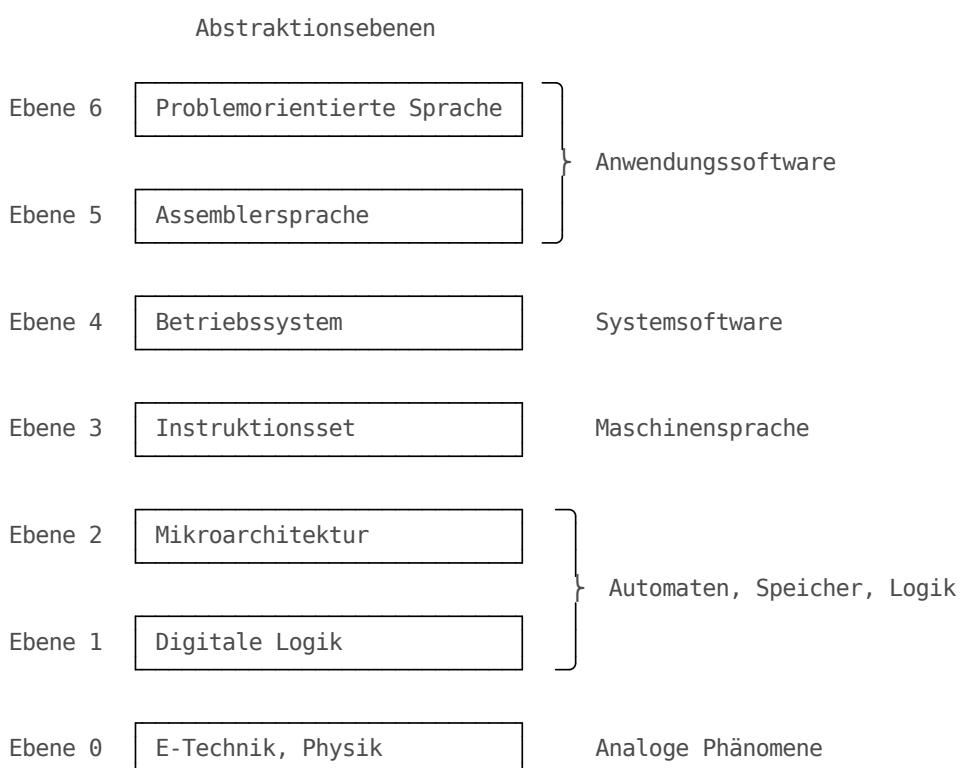
- Dirk W. Hoffmann, Grundlagen der Technischen Informatik, Hanser-Verlag, 2007
- Raul Rojas, Sechzig Jahre Computergeschichte - Die Architektur der Rechenmaschinen Z1 und Z3 [Link](#)
- Webseiten zur Rechnergeschichte
  - <http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/z1.html>
  - <http://www.computerhistory.org/babbage/adalovelace>

## Von Rechenmaschinen zum Arduino: 200 Jahre Rechentechnik

Erinnern Sie sich an den Arduino-Code aus der letzten Vorlesung? `pinMode()`, `digitalWrite()`, `delay()` - diese einfachen Befehle sind das Ergebnis einer 200-jährigen Evolution. Heute reisen wir durch die Zeit und entdecken, wie aus mechanischen Zahnrädern die Mikrocontroller in Ihrem Arduino wurden.

Hier ist das Faszinierende: Die Grundprinzipien, die Charles Babbage 1837 in seiner Analytical Engine erdachte, stecken heute noch in Ihrem ATmega328P. Nur sind sie millionenfach kleiner und milliardenfach schneller geworden.

**Mission dieser Vorlesung:** Verstehen Sie, warum Ihr Arduino so funktioniert, wie er funktioniert - durch die Brille der Geschichte!



## Begrifflichkeiten

Bevor wir in die Geschichte eintauchen, klären wir die Grundbegriffe. Ihr Arduino ist übrigens ein perfektes Beispiel für alle diese Definitionen: Er löst Probleme (LED-Steuerung), verarbeitet Daten (Sensormessungen) und besteht aus zusammenarbeitenden Baueinheiten (CPU, RAM, Flash-Speicher).

*Ein Computer oder Digitalrechner ist eine Maschine, die Probleme für den Menschen lösen kann, indem sie die ihr gegebenen Befehle ausführt.* (Tannenbaum, Computerarchitektur)

*Ein Computer oder Rechner ist ein Gerät, das mittels programmierbarer Rechenvorschriften Daten verarbeitet.* (Wikipedia)

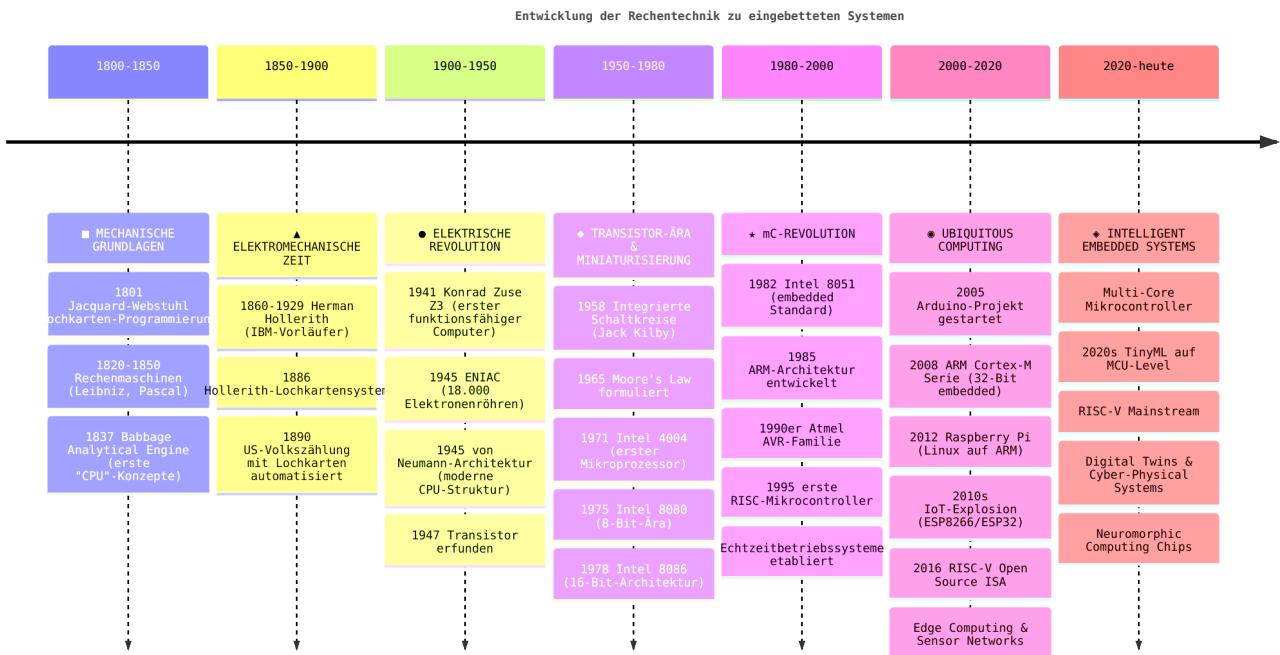
*Rechenanlage (Computer) ... Die Gesamtheit der Baueinheiten, aus denen ein Datenverarbeitungssystem aufgebaut ist.* (DIN 44300)

Interessant: Diese Definitionen von 1945, 2020 und 1970 beschreiben alle das Gleiche - nur die Implementierung hat sich dramatisch verändert. Von raumfüllenden Röhrencomputern zu daumennagelgroßen Mikrocontrollern.

Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede sehen Sie in diesen Definitionen?

## Zeitstrahl: Von Zahnrädern zu Mikrocontrollern

Bevor wir in die Details eintauchen, verschaffen wir uns einen Überblick über die wichtigsten Meilensteine. Dieser Zeitstrahl zeigt Ihnen die Evolution von mechanischen Rechenmaschinen bis zu Ihrem Arduino - eine faszinierende 200-Jahres-Reise!



Faszinierend: Diese Timeline zeigt die kontinuierliche Evolution der technischen Informatik! Von Babbages mechanischen Konzepten 1837 über die Transistor-Revolution bis zu Ihrem Arduino heute - jede Epoche brachte entscheidende Durchbrüche. Besonders bemerkenswert: Moore's Law, ARM-Architektur und RISC-V haben direkt zu den Mikrocontrollern geführt, die Sie heute in embedded Systems verwenden. Ihr Arduino ist das Ergebnis von 200 Jahren Ingenieurskunst!

## Rechenmaschinen

Ausgangspunkt für die Vereinfachung des Rechnens ist das Konzept des Stellenwertsystems. In einer positionsunabhängigen Darstellung bedarf es immer neuer Symbole um größere Zahlen auszudrücken. Im römischen Zahlensystem sind dies die bekannten Formate **MDCCCLXV**. Können Sie den Zahlenwert rekonstruieren - es ist das Gründungsjahr der Bergakademie.

Die Idee, den Wert einer Ziffer von ihrer Position innerhalb der ganzen Zahl abhängig zu machen, geht auf den indischen Kulturkreis zurück. Die sogenannten "arabischen" Zahlen integrieren dafür einen zentralen Voraussetzung, die "0". Ohne die Null ist es nicht möglich, den Wert einer einzelnen Ziffer zu vervielfachen.

Der Abakus greift diesen Ansatz auf und strukturiert den Rechenprozess. Dabei unterscheidet man verschiedene Systeme. Es existieren Vorgehensmuster für die Umsetzung der Grundrechenarten und des Wurzelziehens.



Abakus im Stadtzentrum von Lübeck [Abakus]

Eine weitreichendere Unterstützung beim eigentlichen Rechenprozess bieten die Napierischen Rechenstäbe (John Napier 1550 - 1617), die insbesondere die Multiplikation einer Ziffer mit einer beliebig großen Zahl unterstützen.

The screenshot shows a digital multiplication table for Napier's bones. The columns are labeled with numbers 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, and 10. The rows are labeled with numbers 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, and 20. The first few rows of the table are:

	3	4	5	6	7	8	9	10
6	18	24	30	36	42	48	54	60
9	27	36	45	54	63	72	81	90
12	36	48	60	72	84	96	108	120
15	45	60	75	90	105	120	135	150
18	54	72	90	108	126	144	162	180
21	63	84	105	126	147	168	189	210
24	72	96	120	144	168	192	216	240
27	81	108	135	162	189	216	243	270
30	90	120	150	180	210	240	270	300

A red play button icon is overlaid on the table. The top left corner features a logo of a blue circle with a yellow spiral pattern. The title "Taschenrechner mal anders - Die Napierischen Rechenstäbch..." is visible above the table. A "Link kopier..." button is located in the top right corner. At the bottom left, there is a "Ansehen auf YouTube" button with a YouTube icon.

Die notwendige manuelle Addition bei größeren Faktoren löste die Rechenmaschine von Wilhelm Schickard. Die Automatisierung der Addition ist mechanisch gelöst und zum Beispiel unter [Link](#) beschrieben.



Nachbau der Rechenmaschine von Wilhelm Schickard [\[Schickard\]](#)

A screenshot of a video player showing a wooden calculating machine. The machine has a grid of beads and a digital display showing the multiplication 2435 \* 27 = 17045. A play button is overlaid on the machine. In the top left corner is a circular profile picture of a man, and next to it is the text "Wilhelm Schickards Rechenmaschine". In the top right corner is a link icon and the text "Link kopier...". At the bottom left is a button with the text "Ansehen auf YouTube".

Blair Pascal, Gottfried Wilhelm Leibniz und andere Entwickler trieben die Entwicklung weiter, erweiterten die Stellsensysteme, integrierten weitere Rechenarten hatten aber insgesamt mit den mechanischen Herausforderungen und fehlender Fertigungsgenauigkeit zu kämpfen.

*Es ist unwürdig, die Zeit von hervorragenden Leuten mit knechtischen Rechenarbeiten zu verschwenden, weil bei Einsatz einer Maschine auch der Einfältigste die Ergebnisse sicher hinschreiben kann. (Gottfried Wilhelm Leibniz)*

---

[Abakus] Dietmar Rabich, Abakus des Wissenschaftspfads, Lübeck, Schleswig-Holstein, Deutschland,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:L%C3%BCbeck,\\_Wissenschaftspfad,\\_Abakus\\_-\\_2017--0373.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:L%C3%BCbeck,_Wissenschaftspfad,_Abakus_-_2017--0373.jpg)

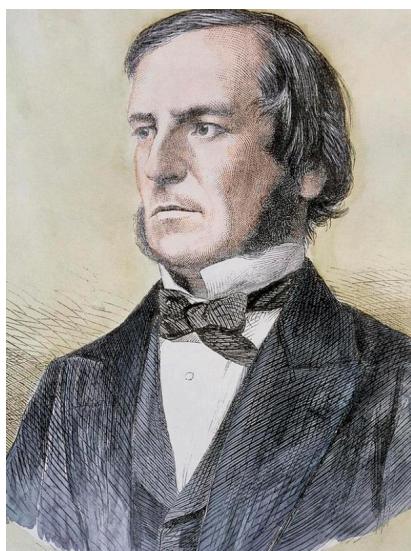
[Schickard] Herbert Klaeren, Nachbau der Rechenmaschine von Wilhelm Schickard,  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schickardmaschine.jpg>

## Abstraktere Konzepte

Bisher stand die Berechnung von einzelnen Ergebnissen auf der Basis einer Sequenz von Eingaben im Vordergrund. Ende des 18. Jahrhunderts entwarfen Visionäre neue Konzepte, die allgemeingültige Lösungen integrierten.

Diesen Aspekt kann man auf technischer und theoretischer Ebene betrachten.

Die Grundlagen moderner Rechner legten die Arbeiten von Georg Boole (1815 - 1864), der eine boolesche Algebra (oder einen booleschen Verband) definierte, die die Eigenschaften der logischen Operatoren UND, ODER, NICHT sowie die Eigenschaften der mengentheoretischen Verknüpfungen Durchschnitt, Vereinigung, Komplement verallgemeinert. Gleichwertig zu booleschen Algebren sind boolesche Ringe, die von UND und ENTWEDER-ODER (exklusiv-ODER) beziehungsweise Durchschnitt und symmetrischer Differenz ausgehen.



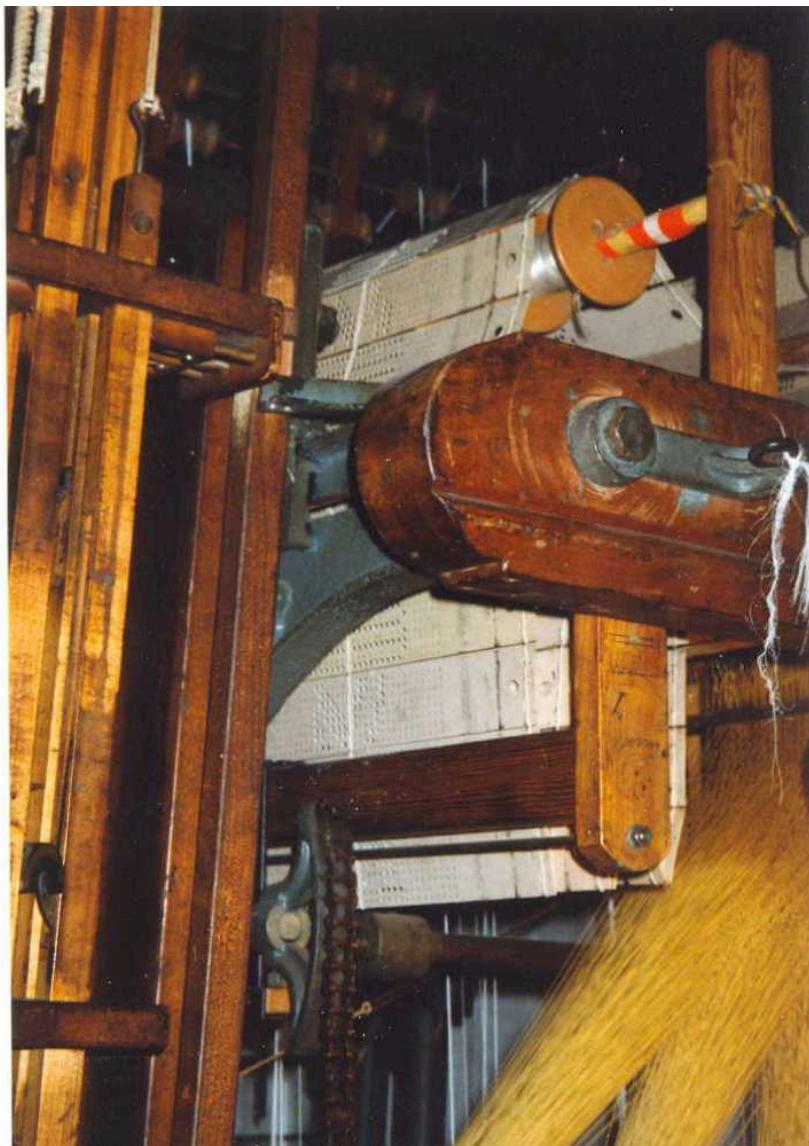
Georg Boole [Boole]

---

[Boole] Autor unbekannt, George Boole, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:George\\_Boole\\_color.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:George_Boole_color.jpg)

## Joseph-Marie Jacquard (1752 - 1834) - Automatischer Webstuhl

Jacquards "Musterwebstuhl" realisierte die Ansteuerung der Webmechanik durch eine Lochkartensteuerung. Im Jahr 1805 wurde das Verfahren erstmals vorgestellt. Dadurch konnten endlose Muster von beliebiger Komplexität mechanisch hergestellt werden.



Die Lochkartensteuerung einer Jacquard-Maschine im Historischen Zentrum Wuppertal [Jacquard]

Auf den Karte waren Informationen über das in einem Schritt zu webende Muster enthalten. Ein Loch bedeutete Fadenhebung, kein Loch eine Fadensenkung. Dabei konnten die Lochkarten in einer Endlosschleife gekoppelt werden, um wiederkehrende Strukturen umzusetzen.

---

[Jacquard] Markus Schweiß, Die Lochkartensteuerung einer Jacquard-Maschine im Historischen Zentrum Wuppertal, [https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph-Marie\\_Jacquard#/media/Datei:Jacquard01.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph-Marie_Jacquard#/media/Datei:Jacquard01.jpg)

## Charles Babbage (1791 - 1871) - Analytical Engine

Ausgangspunkt war die Konstruktion einer Rechenmaschine für die Lösung polynomialer Funktionen. Dabei entstand die Vision einer universellen Rechenapparatur, die auf der Basis eines programmierbaren Systems Berechnungen löst. Die erste Beschreibung wurde 1837 veröffentlicht.

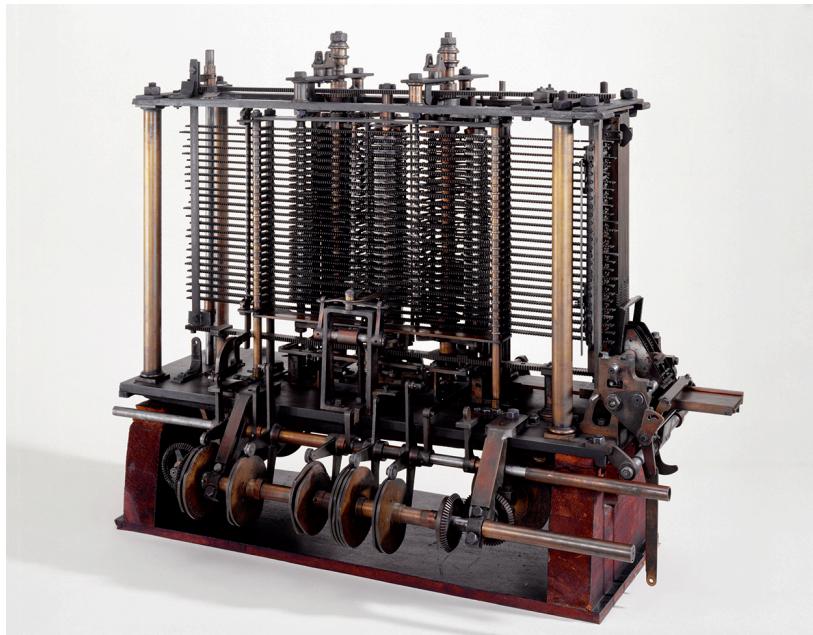
- Energiebereitstellung über eine Dampfmaschine
- 8000 mechanische Komponenten
- Eingabe der Daten und Befehle über Lochkarten
- Nutzerinterface: Drucker, ein Kurvenplotter und eine Glocke
- Zahlendarstellung: dezimale Festkommazahlen, pro Stelle ein Zahnrad
- Arbeitsspeicher zwischen 1,6 und 20 kB (umstritten)

Moment mal - 20 kB Arbeitsspeicher? Ihr Arduino Uno hat 2 kB SRAM! Babbage plante 1837 bereits zehnmal mehr RAM als Ihr moderner Mikrocontroller tatsächlich hat. Das zeigt: Speicher war schon damals der Flaschenhals.

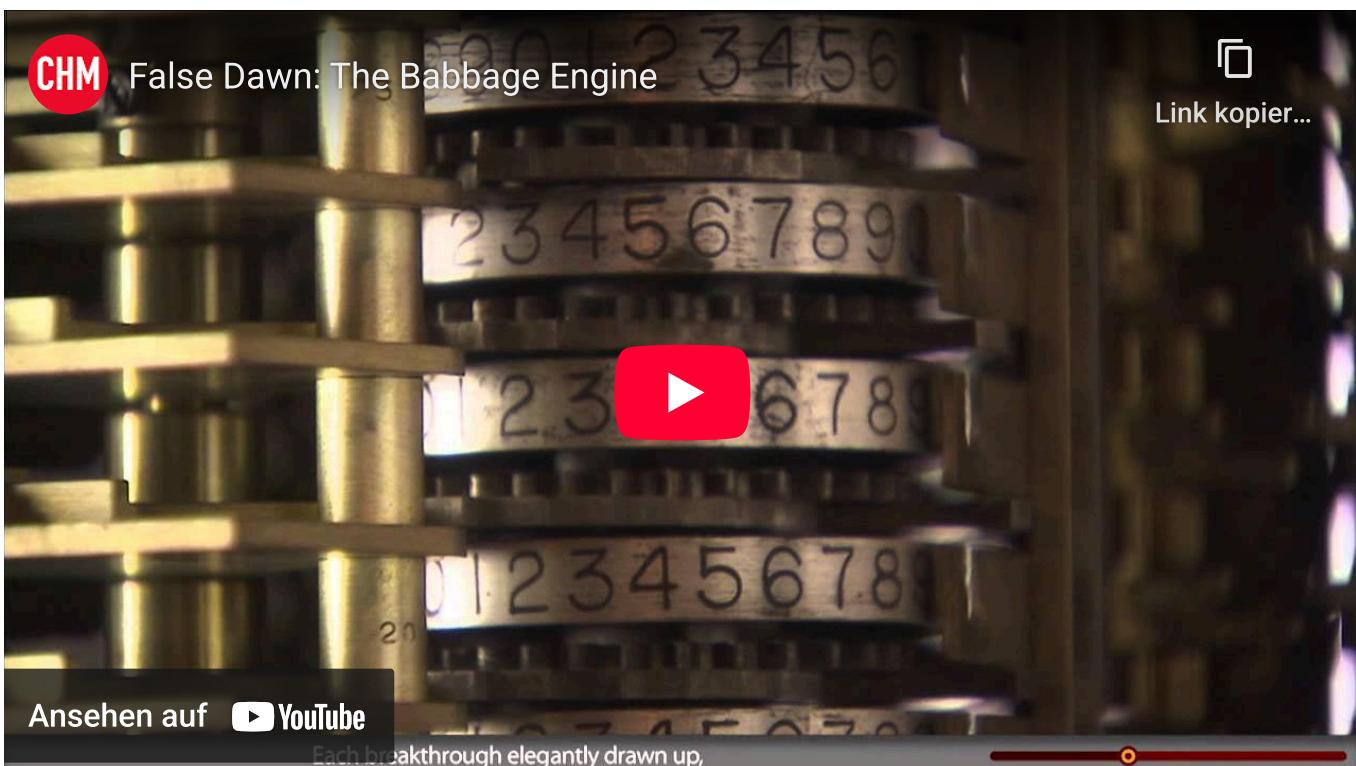
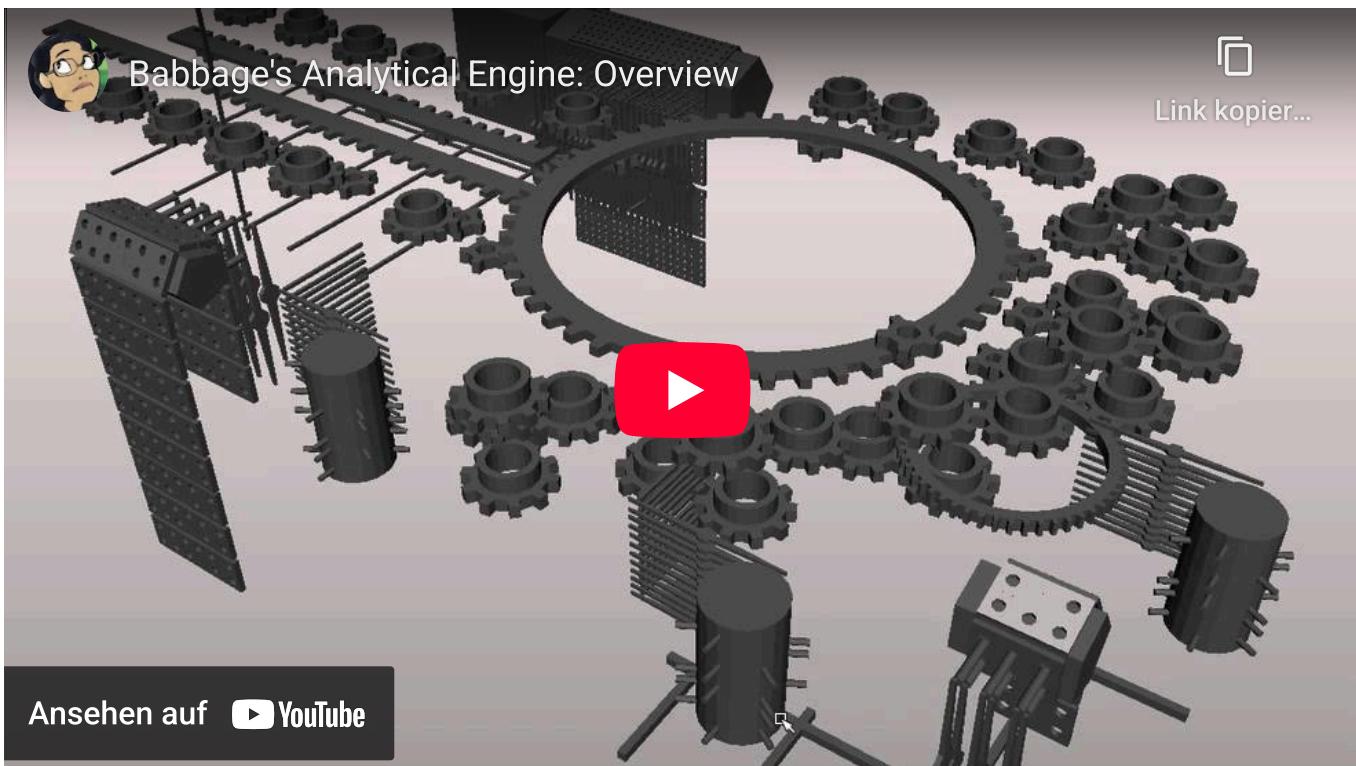
*The result of my reflections has been that numbers containing more than thirty places of figures will not be required for a long time to come.*

Eine weitere Parallele zu heute: Babbage dachte, 30 Dezimalstellen würden "für lange Zeit" ausreichen. Heute rechnen wir mit 32-Bit-Zahlen - das sind etwa 10 Dezimalstellen. Manchmal liegen die Visionäre richtig, aber aus den falschen Gründen!

Die Maschine wurde zu Lebzeiten von Babbage nicht realisiert und nur in Teilen durch seinen Sohn implementiert. Aktuell existieren in verschiedenen Museen unterschiedliche Neubauten.



Rekonstruktionsversuch der Analytical Engine im Science Museum London [AnalyticalEngine]



Eine der zentralen Persönlichkeiten, die die Möglichkeiten der Analytical Engine erkannte, war Ada Lovelace.

*„[Die Analytical Engine] könnte auf andere Dinge als Zahlen angewandt werden, wenn man Objekte finden könnte, deren Wechselwirkungen durch die abstrakte Wissenschaft der Operationen dargestellt werden können und die sich für die Bearbeitung durch die Anweisungen und Mechanismen des Gerätes eignen.“*

Ada Lovelace legte in den Notes zu einem Vortrag von Babbage einen schriftlichen Plan zur Berechnung der Bernoulli-Zahlen in Diagrammform vor, welcher als das erste veröffentlichte formale Computerprogramm gelten kann.

---

[AnalyticalEngine] Science Museum London / Science and Society Picture Library ,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Babbages\\_Analytical\\_Engine,\\_1834-1871..\\_\(9660574685\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Babbages_Analytical_Engine,_1834-1871.._(9660574685).jpg)

## **Es werde Licht ... elektrische Systeme**

Der Verfügbarkeit des elektrischen Stromes als Energiequelle löste einige der technischen Hürden bei den mechanischen Rechenmaschinen, eröffnete aber auch neue Möglichkeiten bei der Eingabe von Daten.

Herman Hollerith (1860 - 1929) interpretierte die Lochkarten als Medium neu. Sein Konzept für die Lösung/Auswertung von organisatorischen Problemstellungen sah diese als Basis für die Datenerfassung.

Das System für die Erfassung von Daten auf Lochkarten bestand aus der Tabelliermaschine, dem Lochkartensortierer, dem Lochkartenlocher und dem Lochkartenleser. Damit konnte die Volkszählung in den USA 1890 innerhalb von 2 Jahren ausgewertet werden.

1924 wurde die von ihm gegründete Firma schließlich in International Business Machines Corporation (IBM) umbenannt.



Nachbau einer Hollerith Maschine [\[Hollerith\]](#)

Hollerith Electric Tabulating System (HETS)

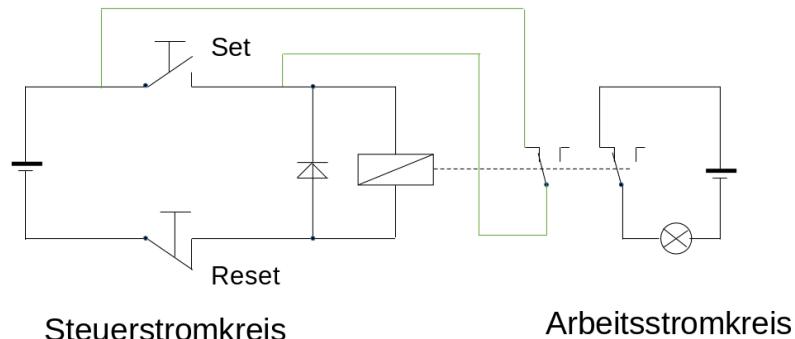
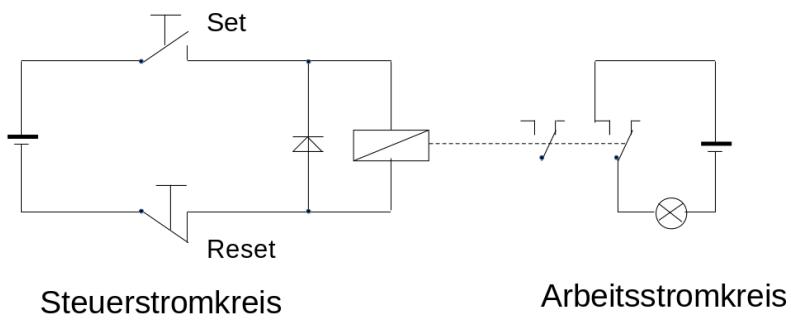
Link kopier...

Hollerith  
Electric Tabulating  
System 1890

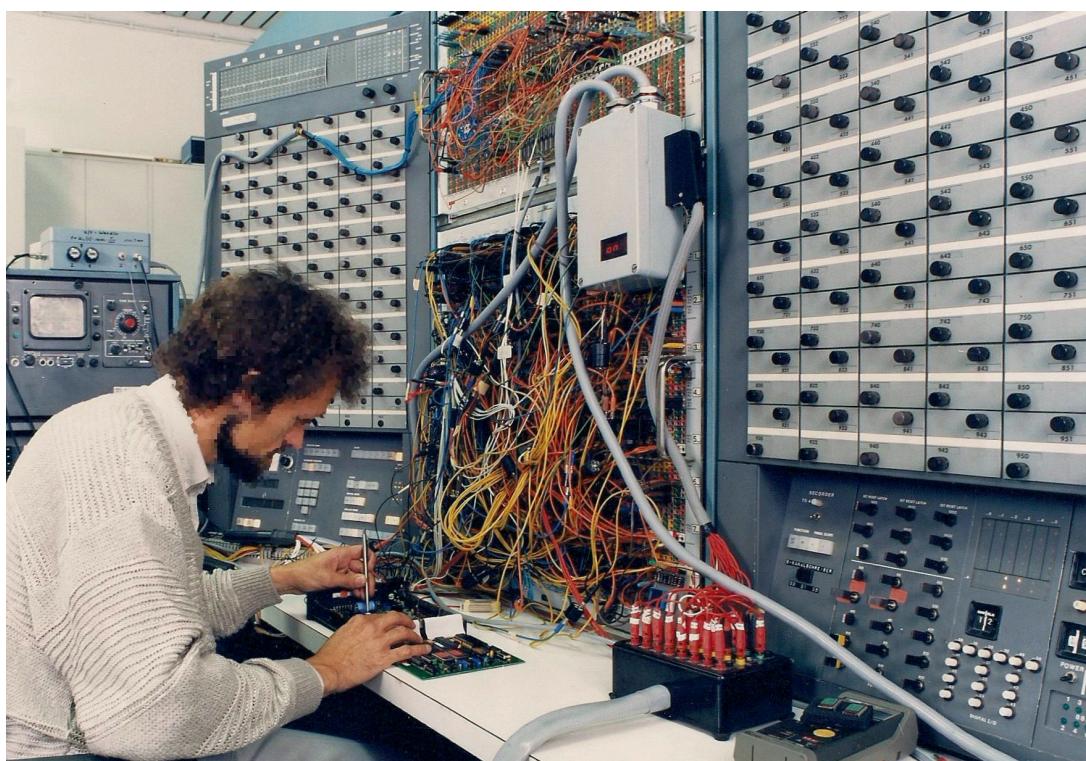
Ansehen auf YouTube

A composite image featuring a portrait of Herman Hollerith on the right and a photograph of the Hollerith Electric Tabulating System (HETS) on the left. The HETS is a large, dark wood machine with a keyboard and a paper feed mechanism. A red YouTube play button icon is overlaid on the machine. In the top right corner, there is a small circular profile picture of a person, a copy link icon, and the text "Link kopier...". Below the portrait, the text "Hollerith Electric Tabulating System 1890" is displayed. At the bottom left, there is a black bar with the text "Ansehen auf YouTube".

Nicht nur auf der Ebene der Datenerfassung, sondern auch für die Datenspeicherung eröffnete sich auf der Basis des elektrischen Stromes eine Revolution. Relais konnten Zustände nun speichern und logische Operationen abbilden. Damit manifestierte sich aber auch die Festlegung auf eine binäre Informationsdarstellung - An, Aus (1 und 0).



Bis in die 80er Jahre bildeten Analogrechner einen alternativen Ansatz. Anders als bei den diskret arbeitenden Digitalrechnern wurde hier im Werte- und Zeitverlauf kontinuierlich gearbeitet. Dabei wurde das Systemverhalten von komplexen Systemen mit elektrischen Schaltungen nachgebildet.



Analogrechneranwendung für die Simulation der Regelstrecke für einen Regelkreis [AnalogRechner]

---

[AnalogRechner] SchmiAlf, Analogrechneranwendung für die Simulation der Regelstrecke für einen Regelkreis mit einem externen Steuengerät (Mikrocontroller) angeschlossen als Hardware-in-the-Loop, mit Analogrechner EAI-8800, ca. 1985,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Analogrechner\\_HW-in-Loop\\_Ausschnitt.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Analogrechner_HW-in-Loop_Ausschnitt.jpg)

[Hollerith] Adam Schuster, Replica of early Hollerith punched card tabulator and sorting box (right) at Computer History Museum,  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HollerithMachine.CHM.jpg>

## Zuse Z3

Die Z3 war der erste funktionsfähige Digitalrechner weltweit und wurde 1941 von Konrad Zuse in Zusammenarbeit mit Helmut Schreyer in Berlin gebaut. Die Z3 wurde in elektromagnetischer Relaistechnik mit 600 Relais für das Rechenwerk und 1400 Relais für das Speicherwerk ausgeführt.

- 10 Hertz Taktfrequenz
- basierend auf 2200 Relais
- 22-stellige Binärzahlen (im Gleitkomma-Format !)
- dezimale Ein-/Ausgabe
- Speicher mit 64 Worten
- Steuereinheit mit Sequenzer
- Addition in 3 Takten, Multiplikation in 16 Takten
- keine Sprungoperationen!



Bereits Vorwegname der Kernelemente moderner Architekturen:

- Gleitkommaformat
- Mikroprogrammierung
- Pipeline-Konzept
- Carry-Look-Ahead Addierer

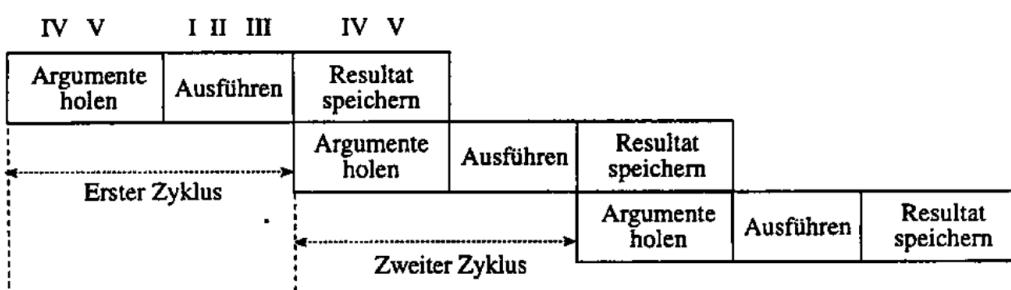


Abbildung 5: Die Ausführungspipeline der Z3

Sechzig Jahre Computergeschichte [Rojas]

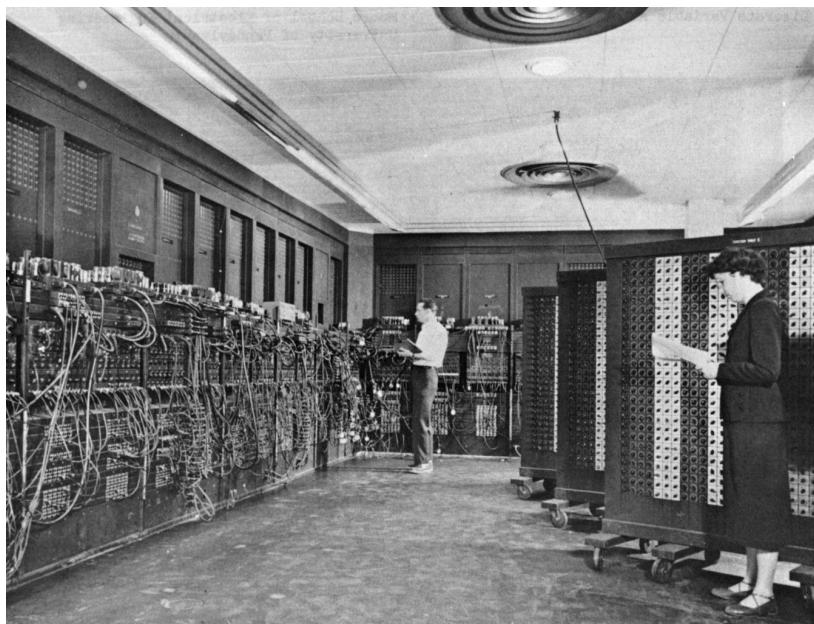
[Rojas] Raul Rojas, Sechzig Jahre Computergeschichte - Die Architektur der Rechenmaschinen Z1 und Z3

[Link](#)

## Eniac

Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC)

- 18000 Röhren, 1500 Relais
- $130 m^2$ , 30 Tonnen, 140 kW
- dezimale Kodierung
- ca. 5000 Additionen je Sek.
- 20 Akkumulatoren, 1 Multiplizierer, 3 Funktionstabellen
- programmiert durch Kabel-Verbindungen
- E/A mittels Lochkarten
- gebaut für ballistische Berechnungen



ENIAC Betriebsraum [ENIAC]

Ein großes Problem bei der Entwicklung des ENIAC war die Fehleranfälligkeit der Elektronenröhren. Wenn nur eine der 17.468 Röhren ausfiel, rechnete die gesamte Maschine fehlerhaft.

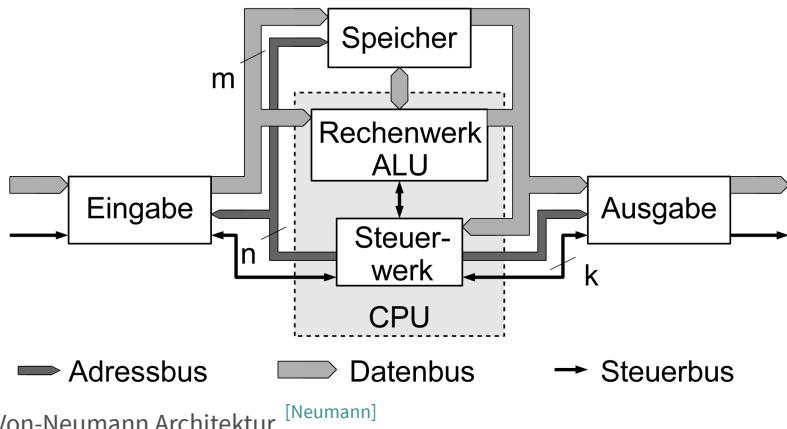
---

[ENIAC] Autor unbekannt, ENIAC in Philadelphia, Pennsylvania. Glen Beck (background) and Betty Snyder (foreground) program the ENIAC in building 328 at the Ballistic Research Laboratory ,  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eniac.jpg>

## Konzeptionelle Entwürfe

In seinem Papier *First Draft on the Report of EDVAC* beschreibt John von Neumann 1945 die Basiskomponenten eines Rechners:

- ALU (Arithmetic Logic Unit) – Rechenwerk für die Durchführung mathematischer/logischer Operationen
- Control Unit – Steuerwerk für die Interpretation der Anweisungen eines Programmes
- BUS – Bus System, dient zur Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten (Steuerbus, Adressbus, Datenbus)
- Memory – Speicherwerk sowohl für Programme als auch für Daten
- Ein-/Ausgabe – Nutzerinterface




---

[Neumann] Medvedev, Schaltbild einer Von-Neumann-Architektur auf deutsch.:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22von\\_Neumann%22\\_Architektur\\_de.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22von_Neumann%22_Architektur_de.svg)

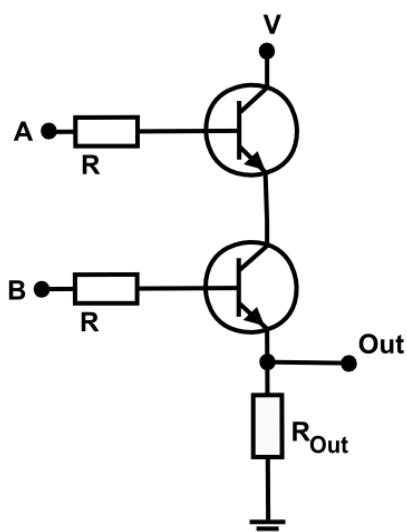
## Die Transistor-Ära

1948 stellen Shockley, Bardeen und Brattain den ersten Transistor an den Bell Labs her. Dafür erhalten sie 1956 den Nobelpreis für Physik. Der Transistor verdrängt langsam die Röhre als Verstärker und Schalter. Die neue Technik ermöglicht die Erstellung integrierter Schaltungen.



Und wie wird daraus nun ein Rechner? Die intelligente Verschaltung mehrerer Transistoren ermöglicht die Umsetzung von logischen Schaltungen wie AND, OR usw.

#### Transistor AND Gate



Transistorverschaltung für AND-Logik [ANDTransistor]

Diese wiederum fassen wir nun in entsprechenden ICs zusammen. Wir haben die elektrische Ebene verlassen und sind endgültig auf der logischen Ebene angekommen.

## DM7408

### Quad 2-Input AND Gates

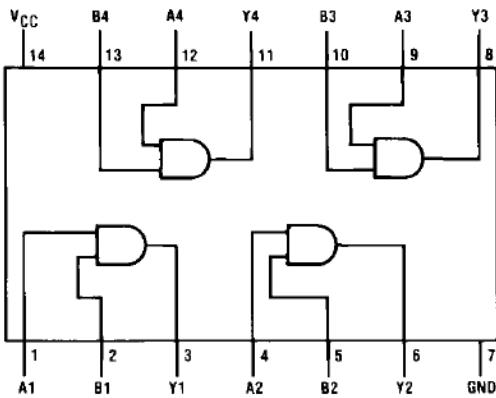
#### General Description

This device contains four independent gates each of which performs the logic AND function.

#### Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
DM7408N	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

#### Connection Diagram



#### Function Table

Inputs		Output
A	B	Y
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

H = HIGH Logic Level  
 L = LOW Logic Level

Datenblatt der Firma Fairchild [Fairchild]

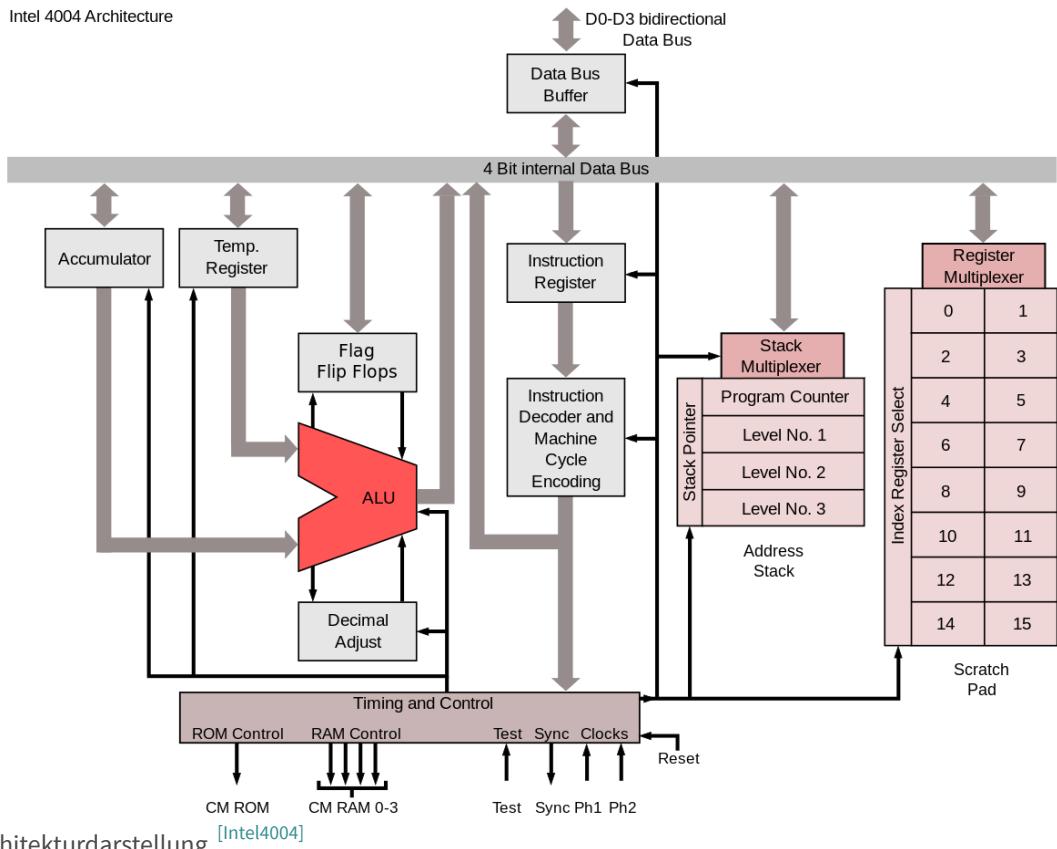
---

[ANDTransistor] EBattleP, diagram of a transistor AND gate. Reference: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/and.html#c1>, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TransistorANDgate.png>

[Fairchild] Datenblatt der Firma Fairchild, DM7408, August 1986

## Intel 4004

Beispiel: Intel 4004-Architektur (1971)



Intel 4004 Architekturdarstellung [\[Intel4004\]](#)

- Anzahl Transistoren: 2300
- Taktfrequenz: 500 bis 740 kHz
- Zyklen pro Instruktion: 8
- Daten-Adressraum: 5120 Bit (Harvard-Architektur)
- Anzahl Befehle: 46
- Bauform: 16 Pin (DIP)

Jetzt wird's spannend: Vergleichen wir das mit Ihrem Arduino! Der ATmega328P hat etwa 100.000 Transistoren (40x mehr), läuft mit 16 MHz (20x schneller) und hat 131 Befehle. In 50 Jahren ist die Rechenleistung um etwa das 1000-fache gestiegen - und das Ganze passt auf einen Fingernagel!

**Intel 4004 (1971) vs. ATmega328P (2008):**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Intel 4004</b>	<b>ATmega328P</b>	<b>Faktor</b>
Transistoren	2.300	~100.000	43x
Taktfrequenz	740 kHz	16 MHz	22x
Befehle	46	131	3x
Wortbreite	4 Bit	8 Bit	2x
RAM	80 Byte	2048 Byte	26x

Das Faszinierende: Beide verwenden die Harvard-Architektur! Der 4004 war seiner Zeit voraus und verwendete getrennte Speicher für Programm und Daten - genau wie Ihr Arduino heute.

Halten Sie nach der GoldCap-Variante Ausschau!

Unterstützung für die Interpretation aus dem Nutzerhandbuch, dass das Instruction set beschreibt:

# 4004 Instruction Set

## BASIC INSTRUCTIONS (\* = 2 Word Instructions)

Hex Code	MNEMONIC	OPR				OPA				DESCRIPTION OF OPERATION
		D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	
00	NOP	0	0	0	0	0	0	0	0	No operation.
1 -	*JCN	0	0	0	1	C, C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub>	A <sub>2</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub>		Jump to ROM address A <sub>2</sub> A <sub>2</sub> A <sub>2</sub> A <sub>2</sub> , A, A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>1</sub> (within the same ROM that contains this JCN instruction) if condition C, C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> is true, otherwise go to the next instruction in sequence.
2 -	*FIM	0	0	1	0	R R R 0	D <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>1</sub>		Fetch immediate (direct) from ROM Data D <sub>2</sub> D <sub>2</sub> D <sub>2</sub> D <sub>2</sub> , D, D <sub>1</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>1</sub> to index register pair location RRR.

■ ■ ■

8 -	ADD	1	0	0	0	R R R R		Add contents of register RRRR to accumulator with carry.
9 -	SUB	1	0	0	1	R R R R		Subtract contents of register RRRR to accumulator with borrow.
A -	LD	1	0	1	0	R R R R		Load contents of register RRRR to accumulator.
B -	XCH	1	0	1	1	R R R R		Exchange contents of index register RRRR and accumulator.
C -	BBL	1	1	0	0	D D D D		Branch back (down 1 level in stack) and load data DDDD to accumulator.
D -	LDM	1	1	0	1	D D D D		Load data DDDD to accumulator.
F0	CLB	1	1	1	1	0	0	Clear both. (Accumulator and carry)
F1	CLC	1	1	1	1	0	0	Clear carry.
F2	IAC	1	1	1	1	0	0	Increment accumulator.

Intel 4004 Instruction Set [\[Instruction\]](#)

[Instruction] Intel 4004 Assembler, <http://e4004.szyc.org/asm.html>

[Intel4004] Autor Appaloosa, Intel 4004,  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/87/4004\\_arch.svg/1190px-4004\\_arch.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/87/4004_arch.svg/1190px-4004_arch.svg.png)

## Weitere Entwicklung

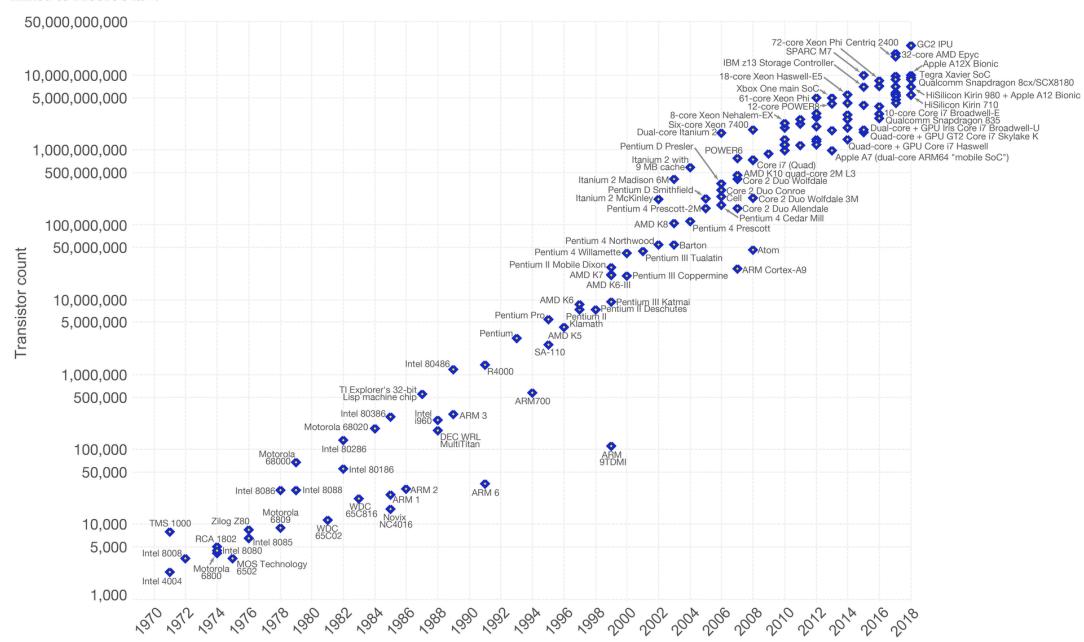
Jahr	Entwicklung	Beschreibung
1971	Intel 4004	Erste kommerzielle CPU auf einem einzigen Chip (4-Bit).
1978	Intel 8086	16-Bit-Architektur und Grundlage für die x86-Architektur.
1979	Motorola 68000 mit 32-Bit interner Architektur	
1985	RISC-Architektur	Einführung der RISC (Reduced Instruction Set Computer)-Architektur für effizientere CPU-Designs.
1989	Intel i860 und erste GPUs	Erste Grafikprozessoren (GPUs) für 3D-Beschleunigung und spezielle Berechnungen.
1993	Intel Pentium	Einführung von Super-Skalaren und schnellerer Rechenleistung bei x86-Prozessoren.
1999	Nvidia GeForce 256	Erste „GPU“ zur Hardware-Beschleunigung von 3D-Grafikberechnungen.
2000	AMD Athlon 64	Erste 64-Bit-Desktop-CPU.
2006	Mehrkernprozessoren (Intel Core, AMD Athlon X2)	Einführung von Mehrkernprozessoren für verbesserte Leistung und parallele Verarbeitung.
2010	Nvidia Fermi-Architektur	CUDA-Architektur für Parallelverarbeitung und GPGPU (General Purpose GPU Computing).
2011	Intel Sandy Bridge	Einführung der integrierten Grafik mit CPU und GPU auf demselben Chip für höhere Effizienz.

2015	AMD HBM (High Bandwidth Memory)	Einführung von HBM für schnelle und effiziente Speichernutzung bei GPUs.
2016	Nvidia Pascal-Architektur und Deep Learning	GPUs mit optimierter Leistung für KI und Deep Learning (Tesla P100).
2020	Apple M1 SoC	Erster ARM-basierter Desktop-Prozessor von Apple
2022	Nvidia Ada Lovelace-Architektur	Fortschrittliche Architektur für Raytracing und KI-Beschleunigung mit DLSS 3-Technologie.

### 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.

OurWorld  
inData



- Die historische Entwicklung zeigt Muster auf, die sich wiederholen - auch bei den Fehlprognosen:

*I think there is a world market for about five computers.* (Thomas J. Watson Jr., chairman of IBM, 1943)

*Where a calculator as the ENIAC is equipped with 18000 vacuum tubes and weighs 30 tons, computers in the future may have only 1000 vaccum tubes and weigh 1 1/2 tons.* (Popular Mechanics, 1949)

*There is no reason anyone would want a computer in their home.* (Ken Olsen, founder of Digital Equipment Corporation, 1977)

*Apple is already dead.* (Nathan Myhrvold, Microsoft CTO, 1997)

*The Internet will catastrophically collapse in 1996.* (Robert Metcalfe, Ethernet inventor, 1995)

*Two years from now, spam will be solved.* (Bill Gates, Microsoft, 2004)

*The iPhone has no chance of getting any significant market share.* (Steve Ballmer, Microsoft CEO, 2007)

*No one will ever need more than 637 kB of memory for a personal computer.* (Bill Gates, 1981 - angeblich)

*Smartphones will never replace cameras.* (Kodak executives, 2000s)

--{{1}}--

\*\*\*\*\*

Diese Fehleinschätzungen folgen einem Muster: Die Experten unterschätzten IMMER drei Dinge - Miniaturisierung, Vernetzung und Benutzerfreundlichkeit. Ken Olsen konnte sich 1977 nicht vorstellen, warum jemand einen Computer zu Hause haben wollte. Steve Ballmer lachte 2007 über das iPhone. Kodak dachte, Smartphones würden niemals Kameras ersetzen. Das Muster? Etablierte Experten denken in den Grenzen ihrer aktuellen Technologie, statt radikal neu zu denken.

- Ihre Arduino-Projekte sind Teil dieser Geschichte - Sie programmieren die gleichen Grundkonzepte, die von Babbage erdacht und von den Intel-Ingenieuren perfektioniert wurden.
- Patterns wiederholen sich: Von-Neumann-Architektur (1945) → Intel 4004 (1971) → ATmega328P (2008) → Ihre nächsten Projekte (2025+)

\*\*\*\*\*

Das Coolste: Sie sind Teil dieser Entwicklung! Jedes Arduino-Projekt, das Sie bauen, steht in direkter Linie zu den Visionären von gestern. Die Geschichte geht weiter - mit Ihnen als Autor der nächsten Kapitel.

## Hausaufgabe

- Setzen Sie sich mit den Unterschieden zwischen der Z1 und der Z3 auseinander.
- Woher stammt der Begriff "Bug" in Bezug auf die Programmierung?