

# Technische Informatik I: Rechnerstrukturen

Vorlesung von  
Prof. Dr. Rita Loogen  
an der  
Philipps-Universität Marburg  
im WS 2007/08



**Informationen** zur Vorlesung und zu den Übungen:  
<http://www.mathematik.uni-marburg.de/~loogen/Lehre/ws07/TechInf1/ti1.shtml>

Der vorliegende Foliensatz ist eine Weiterentwicklung von Foliensätzen meiner Kollegen Gumm, Sommer und Seeger, denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

# Inhaltsübersicht

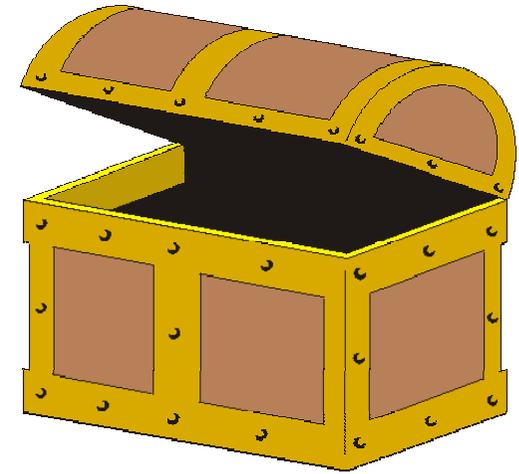
- 0 Einleitung
- 1 **Grundkonzepte** des Rechneraufbaus

## Teil I: Lokale Konzepte

- 2 **Schaltfunktionen** und ihre Darstellung
- 3 Schaltnetze und ihre **technische Realisierung**
- 4 **Schaltnetze** und ihre Optimierung
- 5 Schaltwerke und **Speicherelemente**
- 6 Datendarstellung im Rechner, **Rechnerarithmetik**

## Teil II: Globale Konzepte

- 7 Aufbau und Arbeitsweise einer mikroprogrammierten **CPU**
- 8 **Assemblerprogrammierung** für den MIPS Prozessor
- 9 **Fließbandverarbeitung**
- 10 **Speicherorganisation**



# Literatur



**W. Oberschelp, G. Vossen: Rechneraufbau und Rechnerstrukturen**  
*Oldenbourg Verlag, 10. Auflage, 2006.*

**W. Schiffmann, R. Schmitz: Technische Informatik 1 bzw. 2**  
*Springer Verlag, jeweils 4. Auflage, 2001 bzw. 2002.*

**A.S. Tanenbaum, J. Goodman: Computerarchitektur –  
Strukturen, Konzepte, Grundlagen**  
*Pearson Studium, 2001*

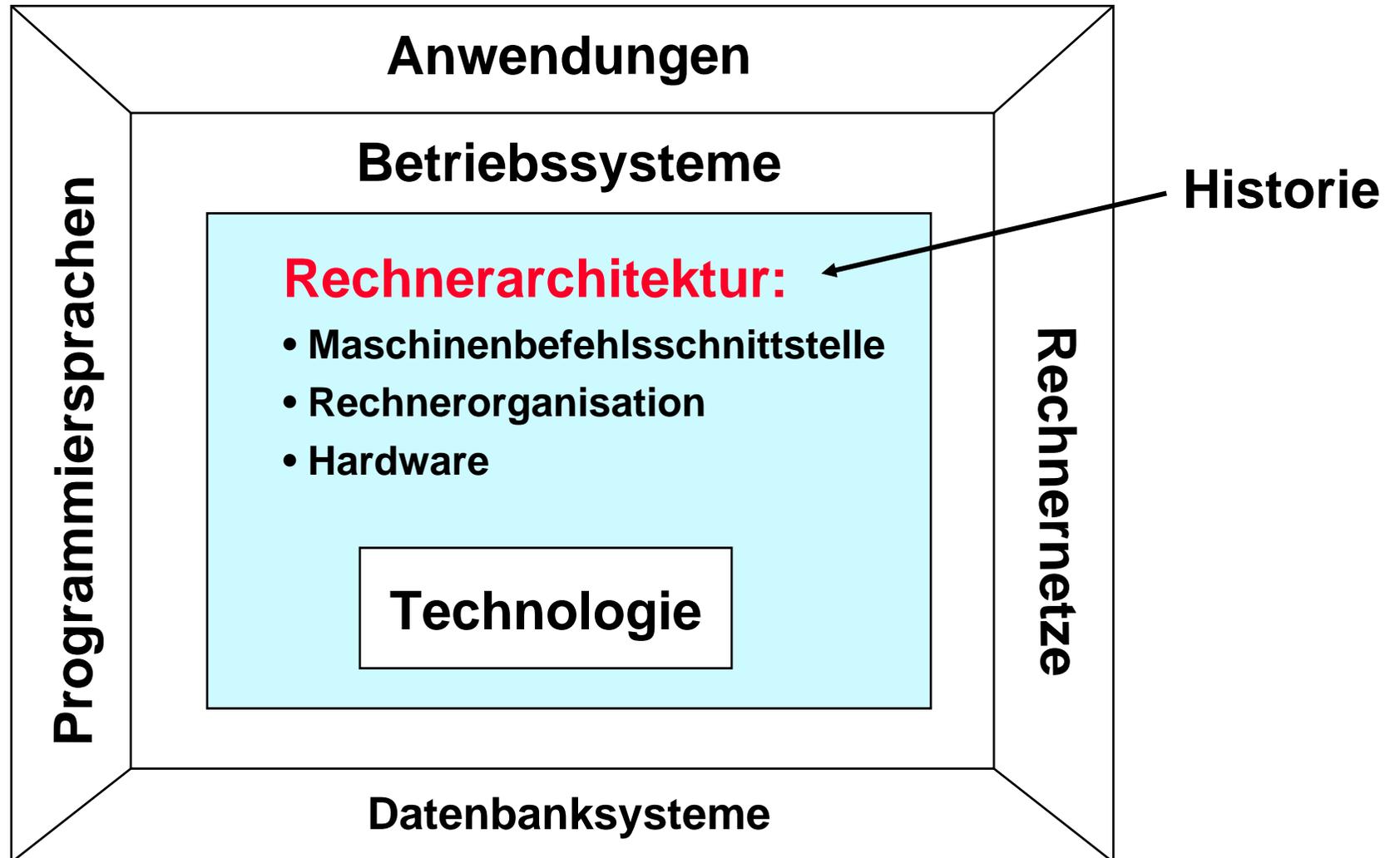
**D.A.Patterson, J.L.Hennessy: Rechnerorganisation und -entwurf,**  
**Spektrum Akademischer Verlag, 3. Auflage 2005.**

**Karl Stroetmann: Computer-Architektur, Oldenbourg Verlag 2007.**

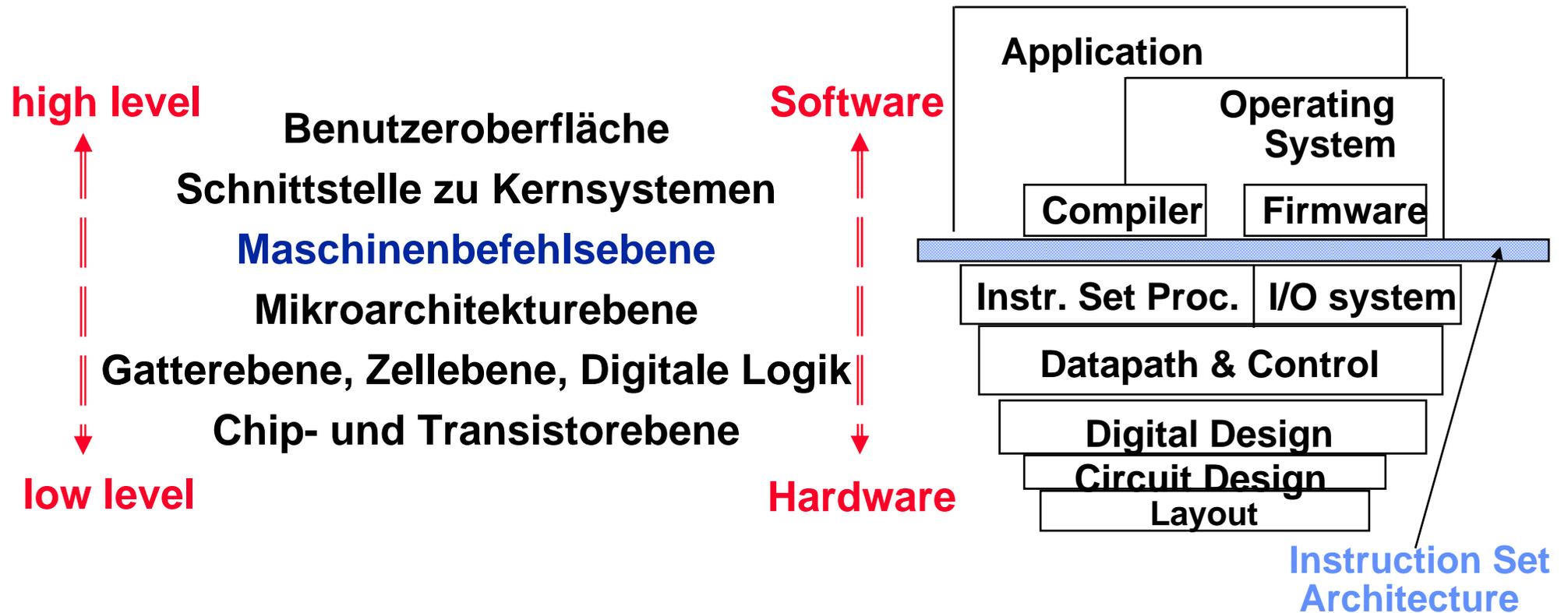
**W. Daniel Hillis: The Pattern on the Stone, Basic Books 1998.**

**H.P.Gumm, M.Sommer: Einführung in die Informatik**  
*Oldenbourg Verlag, 7. Auflage, 2007.*

# Gegenstand der Vorlesung



# Rechner als Hierarchie von Abstraktionsebenen



Jede Ebene wird charakterisiert durch die jeweils sichtbaren Konzepte:

- **struktureller Aufbau:** Bausteine und Verbindungsstruktur
  - » statische Aspekte
- **Funktionalität:** Abläufe
  - » dynamische Aspekte
- **Schnittstelle** zu tieferer Abstraktionsebene

Erleichterung des Entwurfs  
und der Analyse

## Chip- und Transistorebene:

IC's (integrated circuits) als Bausteine, Festlegung von Chip-Layouts, für korrekte Funktionsweise erforderliche Randbedingungen

Schaltbild aus Transistoren, Kondensatoren, Widerständen etc.

*primär für den Entwurfsprozeß von IC's von Bedeutung, CA*

## Gatterebene:

Schaltnetz aus Gattern (technische Realisierung logischer Grundfunktionen) und vordefinierten Schaltnetzen wie Flipflops, Zähler, Dekodierer, Multiplexer etc.

## Mikroarchitektur:

Funktionalität in Form von Mikrooperationen, die korrekte Ansteuerung von Chips garantieren,

Maschinenbefehle werden durch Mikroprogramme oder direkt in Hardware realisiert.

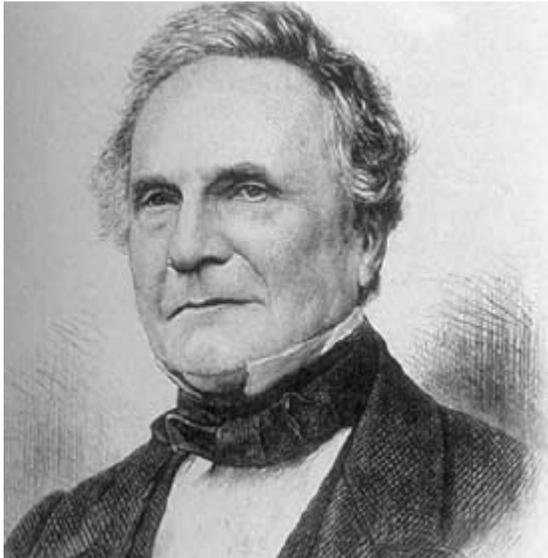
## Maschinenbefehlsebene:

Funktionalität des Rechners durch Maschinenbefehlssatz definiert,

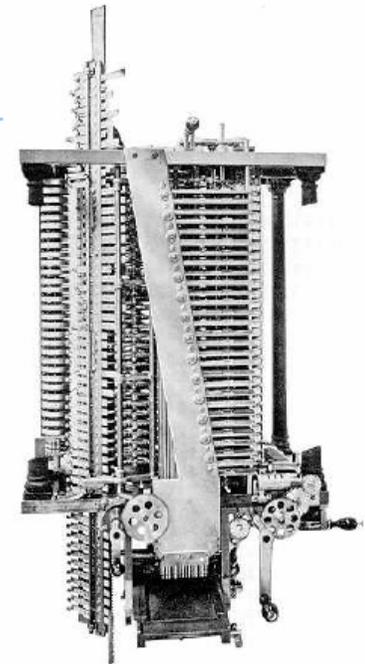
**klassische Sicht der Rechnerarchitektur** --> Familienkonzept

**Schnittstellen zu Kernsystemen:** Betriebssystem, Datenbanken, Netzw. ...

# Anfänge der Rechnerentwicklung

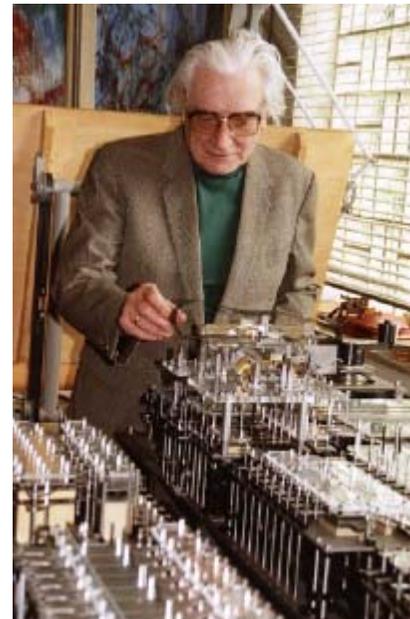


- **Charles Babbage (1792-1871)**
  - **Difference Engine**  
(1823-1842, Projektabbruch)
  - **Analytical Engine**  
(Entwurf 1834, Prototyp **1880**)



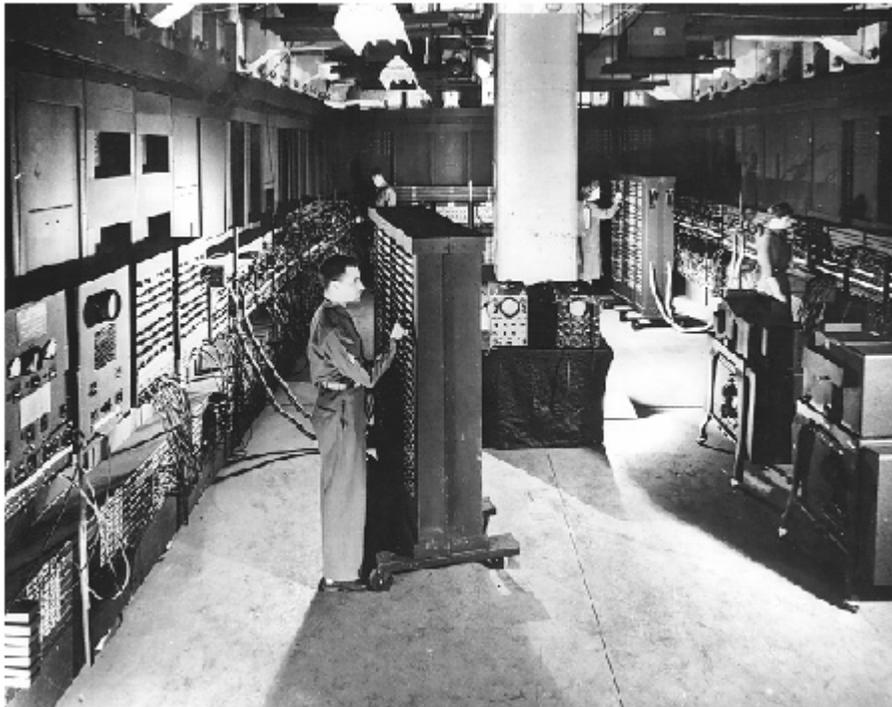
- **Konrad Zuse:**

- **Spezialrechner Z1, Z2 um 1936**
- **Universalrechner Z3, 1941:**  
Binäre Gleitkommaarithmetik,  
Speicher mit 64 Worten,  
Lochstreifenprogramme



# Anfänge der Rechnerentwicklung

- Aiken, Durfee, Hamilton, Lake (Harvard University, IBM (Konstruktionsabkommen)):
  - **Havard Mark 1 (1937-1944)**: dezimale Festkommaarithmetik, Speicher mit 72 Worten, Programme auf Lochpapierband, bedingte Sprünge



- J.P. Eckert, J.W. Mauchly (Moore School of Engineering, Univ. of Pennsylvania):
  - **ENIAC** = Electronic Numeric Integrator And Calculator (1943 - **1946**): erster funktionsfähiger voll **elektronischer Universalrechner**, exemplarisch für die erste Rechnergeneration

# Rechnergenerationen nach Technologien

	<i>Jahr</i>	<i>Prozessor-technologie</i>	<i>Speicher-technologie</i>	<i>Leistung</i>	<i>Programmiersprachen</i>
1.	bis 1960	Röhren	Magnettrommel	1 KIPS	Maschinsprache
2.	bis 1970	Transistoren	Magnetkernspeicher	10 KIPS	FORTRAN COBOL
3.	seit 1965	Halbleiter SSI -- MSI	Magnetkernspeicher	500 KIPS	PASCAL DB, BS
4.	seit 1970	Halbleiter LSI, VLSI, WSI	Halbleiter	> 10 MIPS	Progr.-umgeb. verteilte Anw.
5.	seit 198?	keine neue Technologie, veränderte architektonische Merkmale		GFLOPS	
		Mikroprozessor Pipelining, RISC Rechnernetze	Single Chip DRAM SRAM Cache Speicherhierarchie	- TFLOPS	objektorientierte, funktionale und symbolische Progr.

# Meilensteine der Rechnerarchitektur

- von Neumann-Konzept: **stored-program** computer
- Erfindung der **Betriebssysteme**
- **Familienkonzept**
- Einführung der **Mikroprogrammierung**
- **Mikroprozessoren**
- Beseitigung der Mikroprogrammierung / **RISC**
- **Netzwerke, Cluster Computing, Grid Computing**
- **Parallelverarbeitung, Multithreading**
- **Eingebettete Systeme, Ubiquitous Computing**

50er Jahre

60er

70er

80er

90er



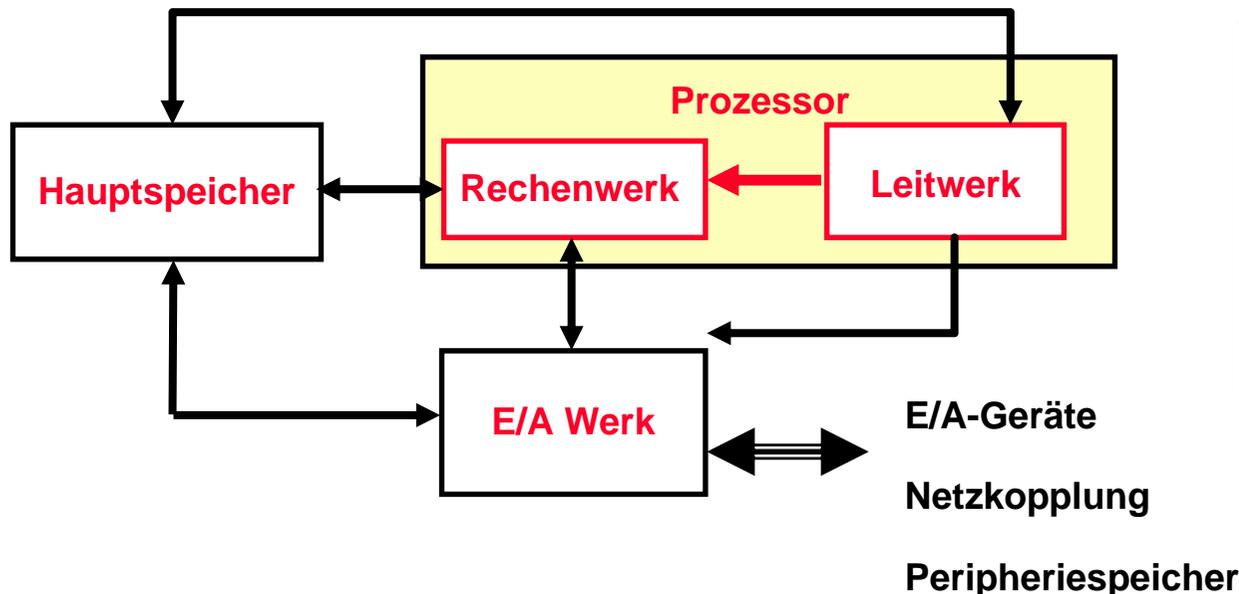
# Von Neumann-Konzept

A.W. Burks, H.H. Goldstine, **John von Neumann**  
(Princeton Univ.):  
Preliminary Discussion of the Logical Design of an  
Electronic Computing Instrument,  
U.S. Army Ordnance Department Report, **1946**



→ **Von Neumann-Konzept ( von Neumann-Computer, auch:  
stored program computer)**

**Festlegung von Grundprinzipien der Rechnerorganisation,  
die bis heute gültig sind (dazu mehr in Kapitel 1).**

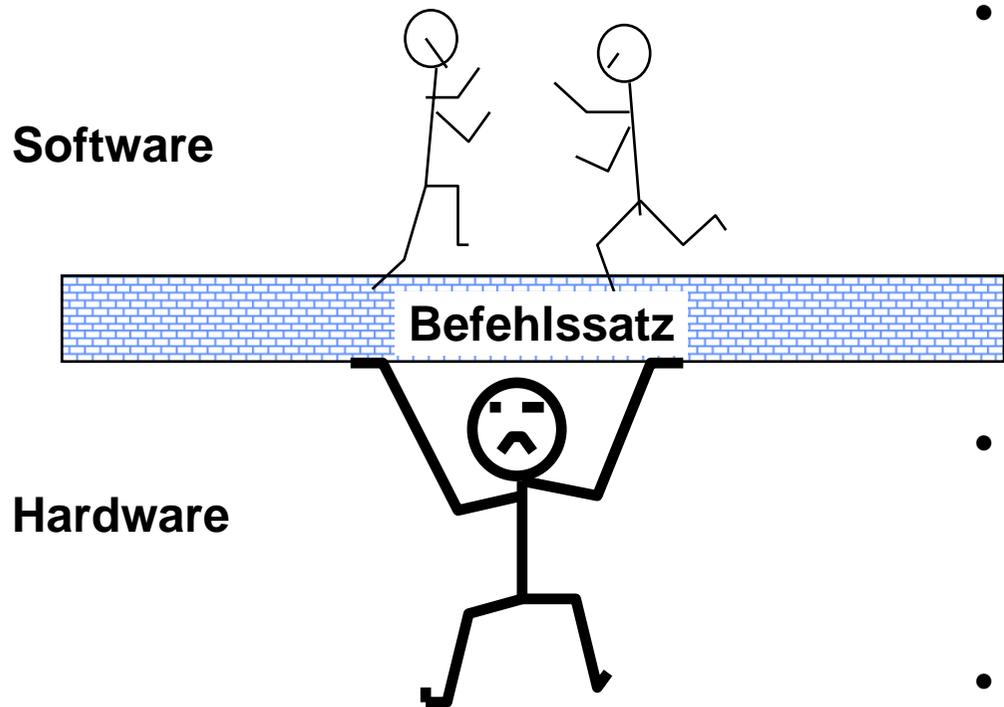


erster von-Neumann Rechner:  
M. Wilkes (Cambridge Univ.)  
**EDSAC**: Electronic Delay  
Storage Automatic Calculator,  
Akkumulator-basiert,  
Fertigstellung: **1949**

# Familienkonzept

G.M. Amdahl, G.A. Blaauw, F.P. Brooks:  
Architecture of the IBM System/360, IBM Journal of Research and  
Development, 8, No.2, 87-101, April 1964

→ Einführung des **Familienkonzepts** bei Entwicklung der  
IBM 360/370 Mainframe-Serie:



- Trennung von
  - Maschinenbefehlsschnittstelle
  - Implementierung: logische Struktur
  - Realisierung: physikalische Bausteine
- „Gleichbleibender“ Befehlssatz bei unterschiedlichen Organisationen und Realisierungen -> **Aufwärtskompatibilität** verschiedener Modelle einer Rechnerfamilie
- Trennung von Hardware- und Software-Entwicklung durch feste Schnittstelle

# Intel-CPU-Familie

Chip	Datum	MHz	Transistoren	Speicher	Anmerkungen
4004	4/1971	0,108	2300	640	
8008	4/1972	0,108	3500	16 KB	8-Bit-Mikroproz.
8080	4/1974	2	6000	64 KB	
8086	6/1978	5-10	29000	1 MB	16-Bit-CPU
8088	6/1979	5-8	29000	1 MB	im IBM PC
80286	2/1982	8-12	134000	16 MB	
80386	10/1985	16-33	275000	4 GB	32-Bit-CPU
80486	4/1989	25-100	1,2 M	4 GB	8K-Cache
Pentium	3/1993	60-233	3,1 M	4 GB	zwei Pipelines
Pentium Pro	3/1995	150-200	5,5 M	4 GB	zwei Cache-Ebenen
Pentium II	5/1997	233-400	7,5 M	4 GB	MMX
Pentium 4	2/2000	1,3-2,0 GHz	42 M	4 GB	drei Cache-Ebenen

# Mikroprogrammierung

Interne Abläufe zur Ausführung von Maschinenbefehlen werden durch Folgen von elementaren Operationen, sogenannten **Mikrooperationen**, realisiert.

- + relativ wenige Mikrobefehle genügen zur Implementierung umfangreicher Befehlssätze
- + **Kosten der Realisierung sind geringer** als feste Verdrahtung von Maschinenbefehlen
- + **größere Flexibilität** (vor allem bei mikroprogrammierbaren Rechnern)
- + **Vereinfachung der Entwicklung und Wartung von Rechnern**
- **Maschinenbefehle als Mikroprogramme zeitaufwendiger** als bei fester Verdrahtung
- **i.a. mehrere ROM-Zugriffe pro Maschinenbefehl**

# Von CISC zu RISC

- **Ursache: CISC Befehlssätze zu kompliziert:**

- Compiler nutzen diese kaum aus.  
Befehlsstatistiken:  
5-10% der Befehle in 60-80% der Ausführungszeit
- Korrektheitsprobleme mit interner Befehlsrealisierung  
(Mikroprogrammierung)

- **Startprojekte:**

- **RISC I & II**, David Patterson et al., Univ. of Berkeley (1980-1985)
- **MIPS**, John Hennessy et al., Univ. of Stanford (1981- 1985)
- > **Microprocessor without Interlocking Pipeline Stages**

- **RISC Merkmale:**

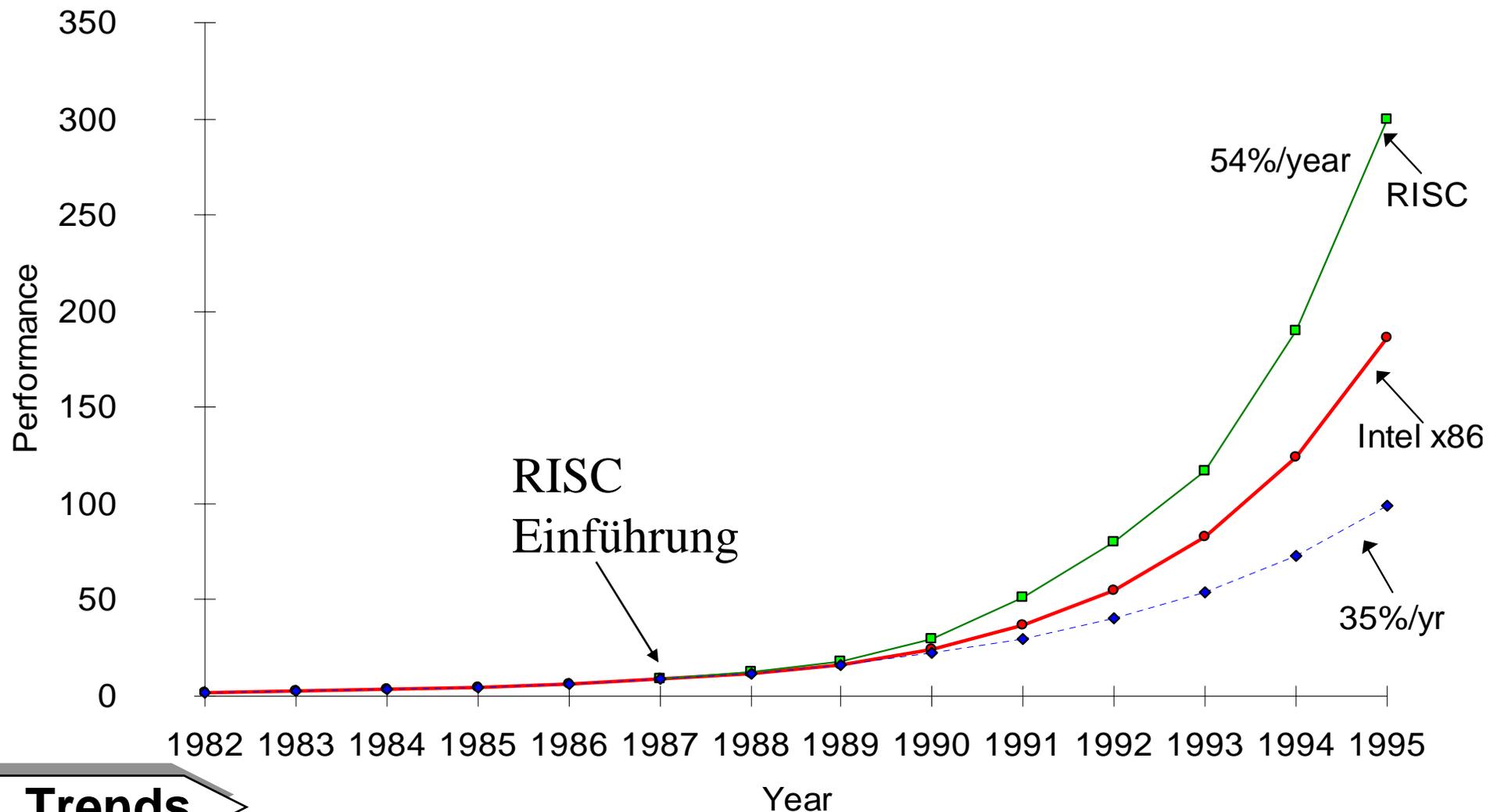
- reduzierter, einfacher Instruktionssatz
- **Fließbandverarbeitung von Befehlssequenzen (Pipelining)**
  - » Eintakt-Maschinenbefehle fester Länge, wenige Formate
  - » Hardwaredekodierung
  - » ``load/store``-Architektur mit großem Registersatz
  - » Cache-Speicher (schnelle Pufferspeicher für Prozessoren)

**RISC**  
steht für **R**educed  
**I**nstruction **S**et **C**omputer.

Im nachhinein - und  
um den Gegensatz  
hervorzuheben –  
taufte man die frühere  
CPU-Architektur

**CISC**  
(**C**omplex **I**nstruction  
**S**et **C**omputer).

# Prozessorleistungsentwicklung



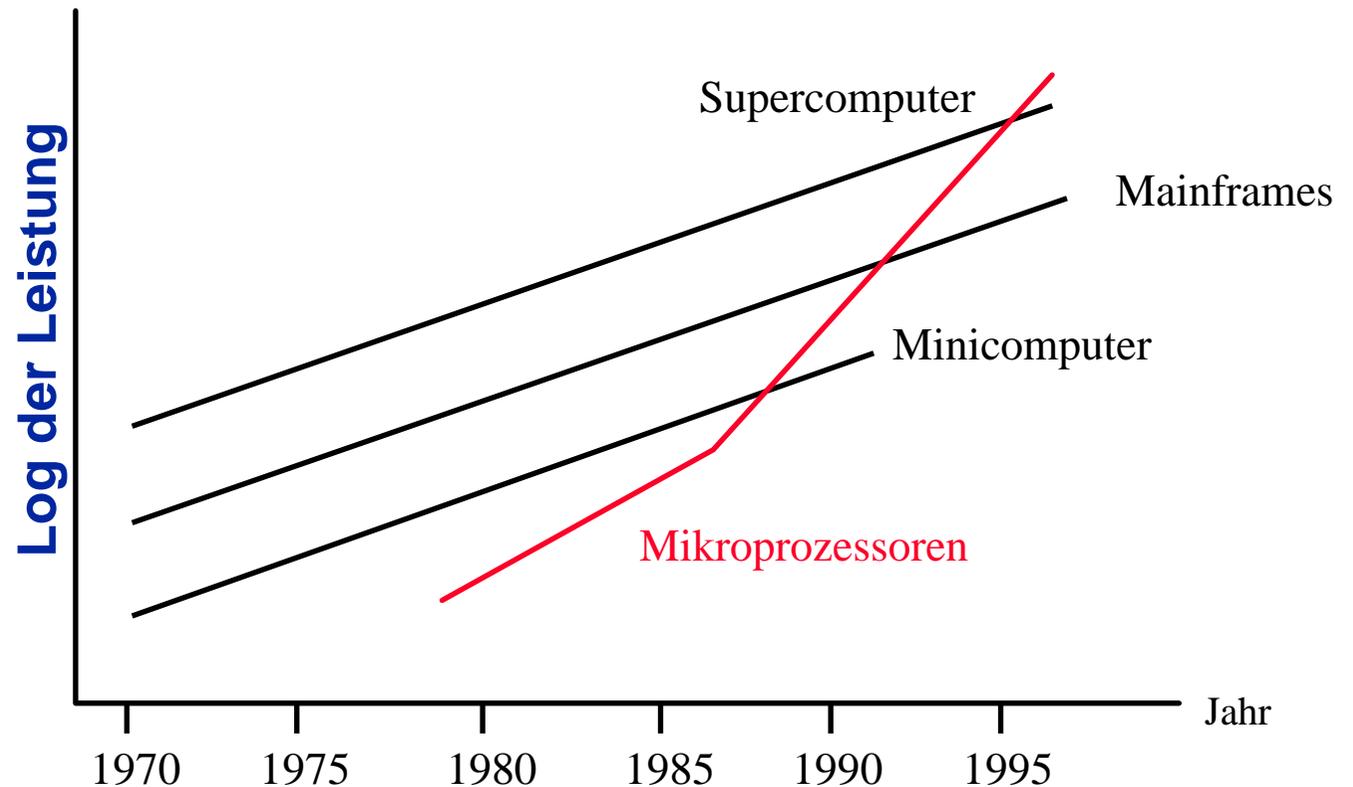
## Trends

- **Leistung:** ca. 50% Steigerung der Leistung (SPEC-Bewertung) pro Jahr (2x alle 18 Monate)
- **Kosten:** ca. 70 % Senkung pro Jahr

System Performance Evaluation Cooperative

# Leistungsentwicklung der Rechnerklassen

- **Höchstleistungsrechner**
  - Supercomputer (Vektorrechner)
  - Parallelrechner
- **Großrechner**
  - Mainframes
  - Server
- **Arbeitsplatzrechner**
  - Workstations
  - Personal Computers (PC's)

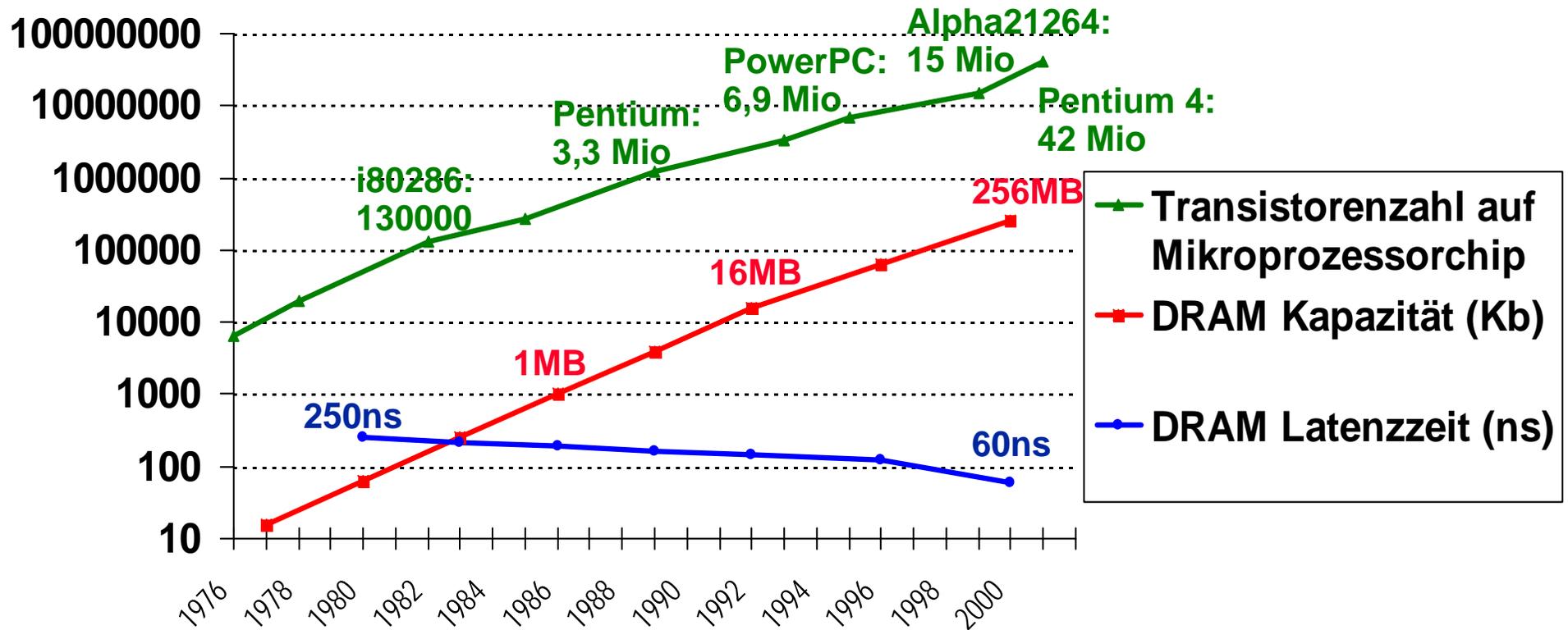


**Unterschiede nicht in der Rechnerorganisation,** sondern in der Größe, der Geschwindigkeit, dem Einsatzgebiet und vor allem in den Kosten

## Hauptursachen für Leistungszuwachs:

- **Technologieverbesserung:**  
CMOS VLSI statt TTL, ECL
- **Architektonische Verbesserungen:**  
RISC statt CISC

# Technologie-Entwicklung



## Trends

	Kapazität	Geschwindigkeit/Latenzzeit
Logik	2x in 3 Jahren	2x in 3 Jahren
DRAM	4x in 3 Jahren	2x in 10 Jahren
Disk	4x in 3 Jahren	2x in 10 Jahren

# Parallelrechner

## Rechnerklassifikation nach Flynn 1966:

		Single Instruction Stream	Multiple Instruction Stream
Single Data Stream		<b>SISD</b> klassischer von Neumann-Rechner	<b>MISD</b> ?? leer ??
		<b>SIMD</b> Vektorrechner Arrayrechner	<b>MIMD</b> Mehrprozessorrechner <ul style="list-style-type: none"> <li>• verteilter Speicher</li> <li>• zentraler Speicher</li> </ul>
Multiple			

Ein Kontrollwerk -  
Mehrere Rechenwerke

Mehrere Kontrollwerke  
Mehrere Rechenwerke

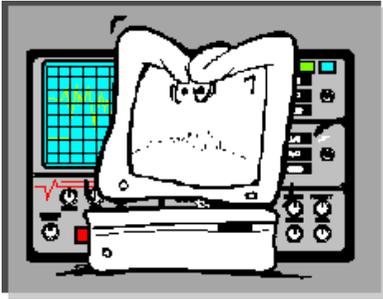
M.J. Flynn:  
Very High-Speed Computing Systems,  
Proc. IEEE, Vol.54, 1966, pp.1901-1909

- SIMD Rechner:

- **Erster: ILLIAC IV (1966-1972)**, Arrayrechner mit 64 64-Bit Proz.
- **Größter: Connection Machine (1985)** 65636 1-Bit Prozessoren, D. Hillis

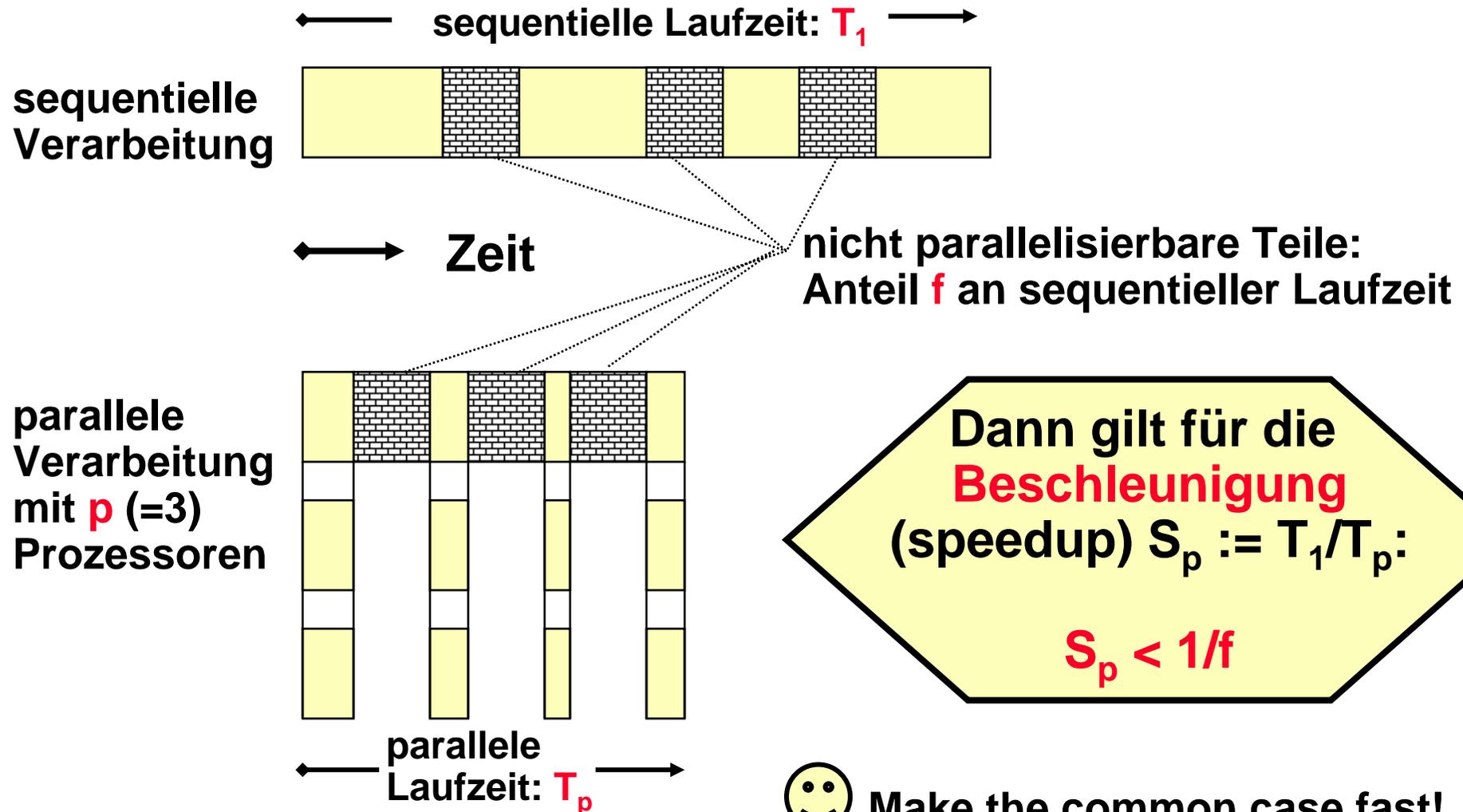
- MIMD Rechner:

- **Transputer**-basierte Parallelrechner ab ca. 1987
- Entwicklung von **MPP-Systemen** (Massively Parallel Processing)
  - TOP500-Liste der Supercomputer: [www.top500.org](http://www.top500.org)
  - TOP-Eintrag (Juni 2007): **BlueGene/L** System by IBM and DOE's National Nuclear Security Administration (NNSA) at **DOE's Lawrence Livermore National Laboratory**, Linpack Leistung 280,6 TFLOP/s, 65.536 dual-processor compute nodes



# Amdahls Gesetz

G. M. **Amdahl**: Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities, Proc. AFIPS 1967 Spring Joint Computer Conference 30, 483-485.



😊 Make the common case fast!