

Vom Chip zum Gehirn

Elektronische Systeme zur Informationsverarbeitung

Johannes Schemmel

Forschungsgruppe „Electronic Vision(s)“
Lehrstuhl Prof. K. Meier
Kirchhoff Institut für Physik
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Mitarbeiter: J. Fieres, A. Grübl, S. Hohmann, E. Mueller, S. Phillip, M. Reuss, T. Schmitz, F. Schürmann

- Mikrochips zur Informationsverarbeitung
- Das Nervensystem als Maßstab
- Analoge Schaltungen simulieren die Natur

Womit alles begann: der Transistor



23. Dezember 1947:

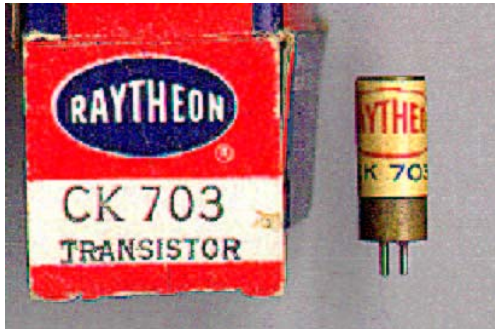
Das Team um John Bardeen verstärkt ein Audiosignal mit dem abgebildeten Transistor.

Transistor: Kunstwort für ein Bauelement mit der Eigenschaft der „**Transresistance**“

→ Steuerung des Ausgangswiderstandes durch die Eingangsspannung

Germanium-Scheibe mit zwei dicht nebeneinanderliegenden Goldkontakten: Spitzentransistor

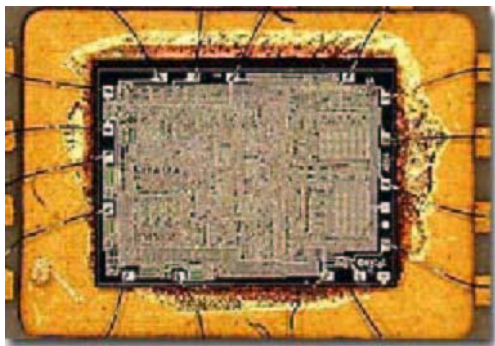
Meilensteine der Halbleitertechnik



1948:
Erster kommerzieller Transistor der Firma Raytheon



1958:
Erste integrierte Schaltung (integrated circuit, IC) der Firma Texas Instruments



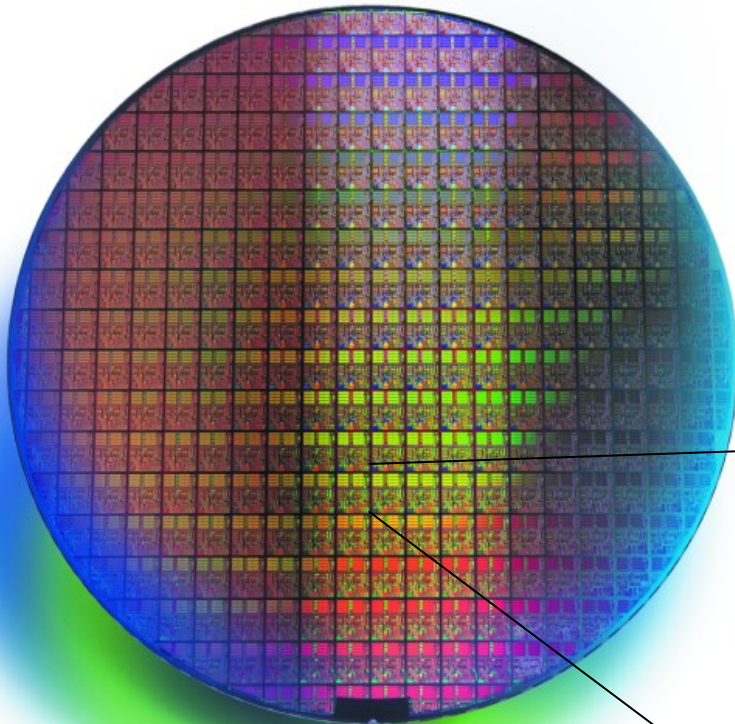
1971:
Erster Mikroprozessor der Firma Intel (Intel 4004)

Aktuelle Mikroprozessoren

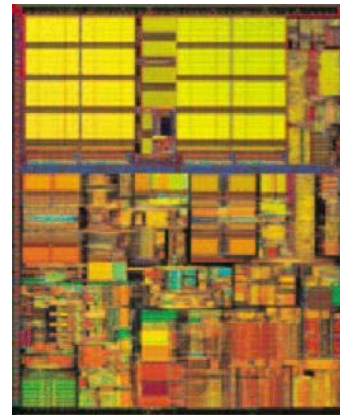
1999:

Pentium III Prozessor:
ca. 30 Mio. Transistoren

aktueller Pentium IV
(Modell Northwood):
ca. 55 Mio. Transistoren

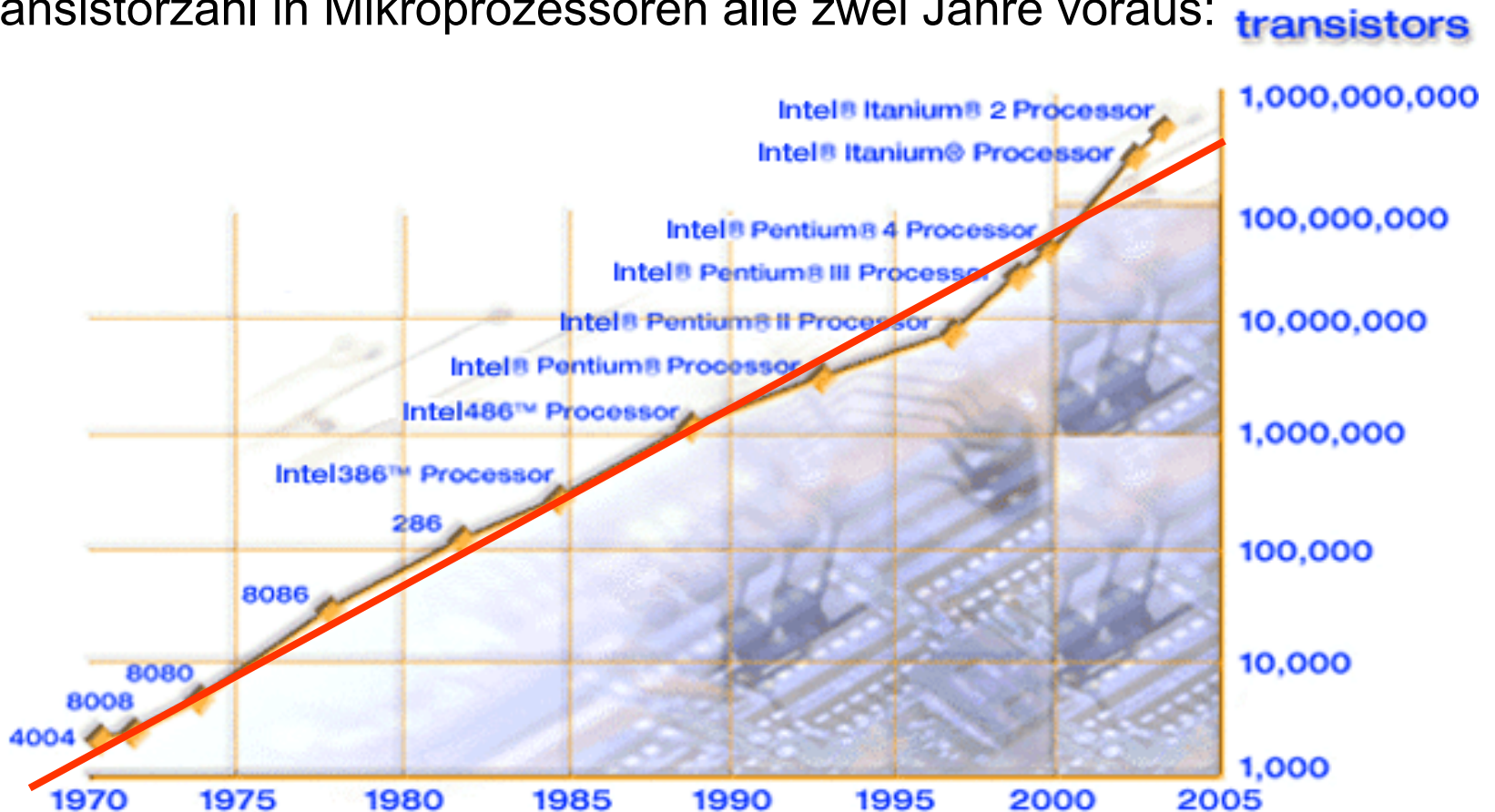


Silizium Wafer



Entwicklung der Mikroprozessoren

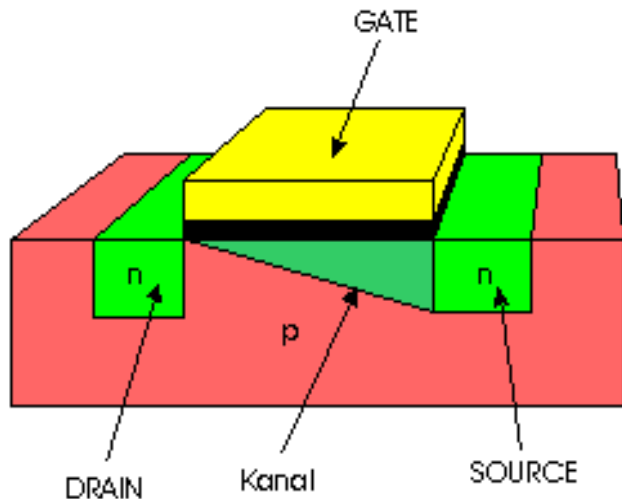
1965: Gordon Moore (Intel) sagt eine Verdoppelung der Transistorzahl in Mikroprozessoren alle zwei Jahre voraus:



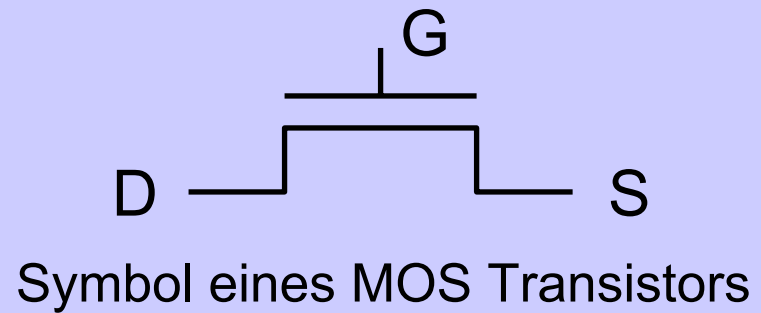
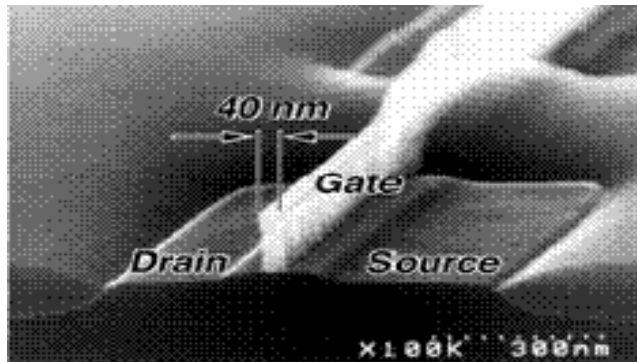
Aber auch die Leistungsaufnahme steigt: **100 Watt** beim Pentium 4

Aufbau eines MOS Transistor

Grundstruktur der modernen Mikroelektronik:
Metall-Oxid-Semiconductor (MOS) Transistor

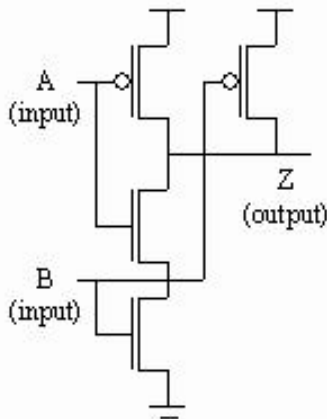
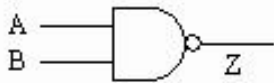


Die Länge des Kanals wird als Maß für die Prozesstechnologie angegeben:
z.B. Pentium IV:
0.00009 Millimeter (90 nm)



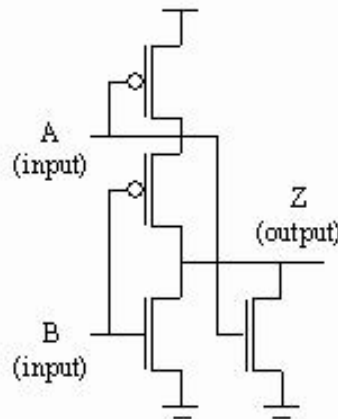
Die Grundlage der Digitaltechnik: logische Gatter

NAND



A	B	Z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOR



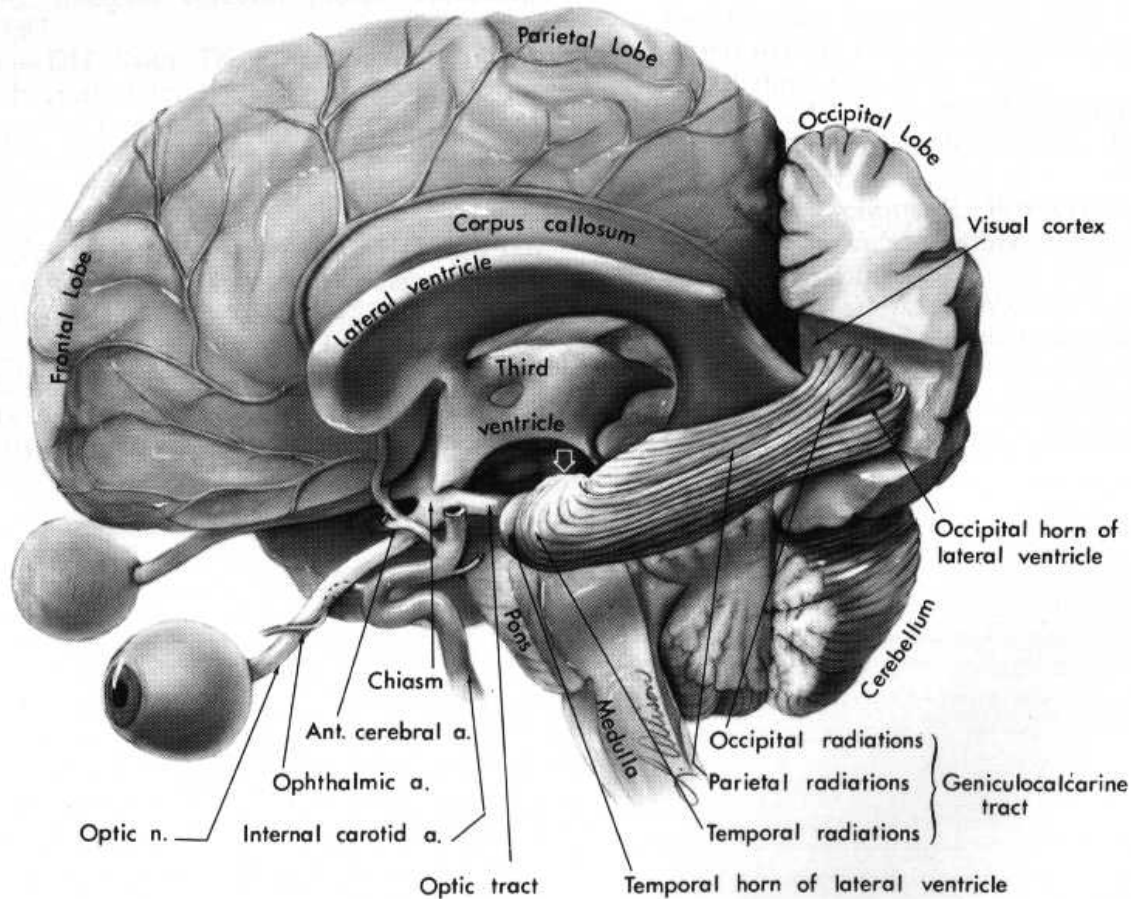
A	B	Z
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Elementare logische Gatter verknüpfen mehrere Eingänge

Durch Kombination lassen sich komplexe Operationen wie Addition und Multiplikation aus einfachen logischen Gattern aufbauen.

Nervensystem und Gehirn

- 100 Milliarden Nervenzellen
- 10000 Verbindung pro Nervenzelle (Synapsen)



Energieverbrauch?

durchschnittlicher
Erwachsener:

$$\begin{aligned} &2400 \text{ kcal/Tag} \\ &= 27.8 \text{ cal/s} \\ &= 116 \text{ J/s} = 116 \text{ W} \end{aligned}$$

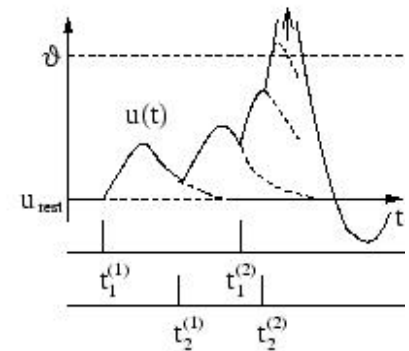
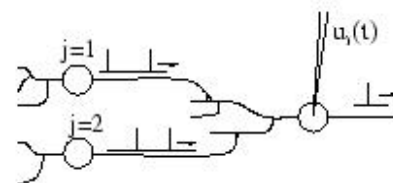
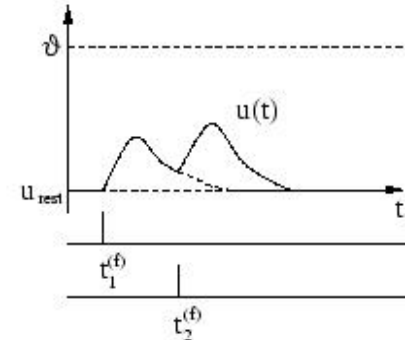
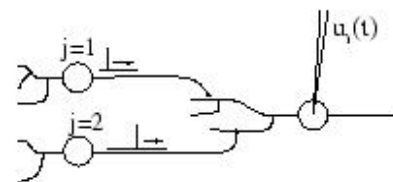
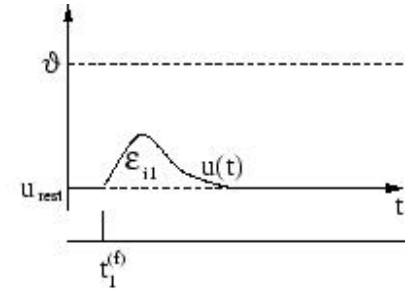
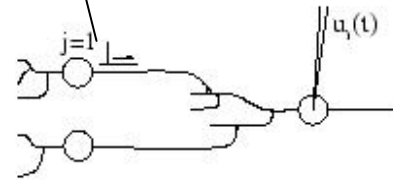
Anteil des Gehirns:
20%

Leistungsaufnahme
des Gehirns:
23 Watt

Funktionsweise eines Neurons



Aktionspotential



Vergleich: digitales und neuronales Rechnen

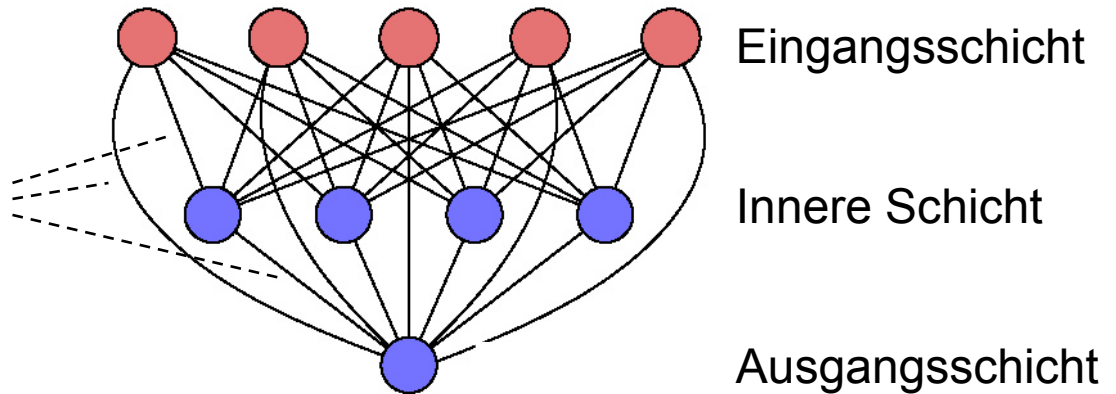
Digitales Rechnen	Neuronales Rechnen
Stand der Technik bei Mikroprozessoren	Menschliches Gehirn ist Maßstab für Intelligenz
jedes Problem muss als Folge elementarer Operationen beschrieben werden	selbstständig lernfähig
alle Daten müssen an eindeutig bestimmten Speicherstellen abgelegt werden	Daten werden verteilt gespeichert
eingeschränkte Parallelität	massiv parallel
geringe Fehlertoleranz: alle defekten Transistoren müssen erkannt werden, um einen Ausfall zu vermeiden (Pentium-Bug)	hohe Fehlertoleranz: eine große Anzahl an Nervenzellen kann ausfallen, ohne die Gesamtfunktion zu beeinträchtigen

Künstliche neuronale Netze

Kombination aus Techniken der Mikroelektronik und Prinzipien des biologischen Nervensystems:

- lernfähig
- fehlertolerant
- verteilte Speicherung von Informationen

Lernen durch Veränderung der synaptischen Verbindungen.



Anwendungen künstlicher neuronaler Netze

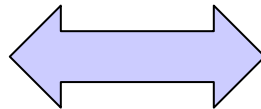
- Verarbeitung natürlicher Daten
 - Bildverarbeitung
 - Optical Character Recognition (OCR)
 - Erkennen von Gefahrensituationen im Verkehr
 - Spracherkennung
- Modellierung biologischer Systeme
 - Erforschung des Zusammenwirkens vieler Nervenzellen
 - Testen von Modellen
 - Vermeidung von Tierversuchen
 - Beschleunigung natürlicher Abläufe im Modell

Realisation künstlicher neuronaler Netze

Software (digitale Hardware)

- Simulation der Neuronen und Synapsen durch ein Computerprogramm
- mit herkömmlichen Computern machbar

- hoher Material und Energieverbrauch
- Parallelität und Fehlertoleranz nur simulierbar



Hardware (analog)

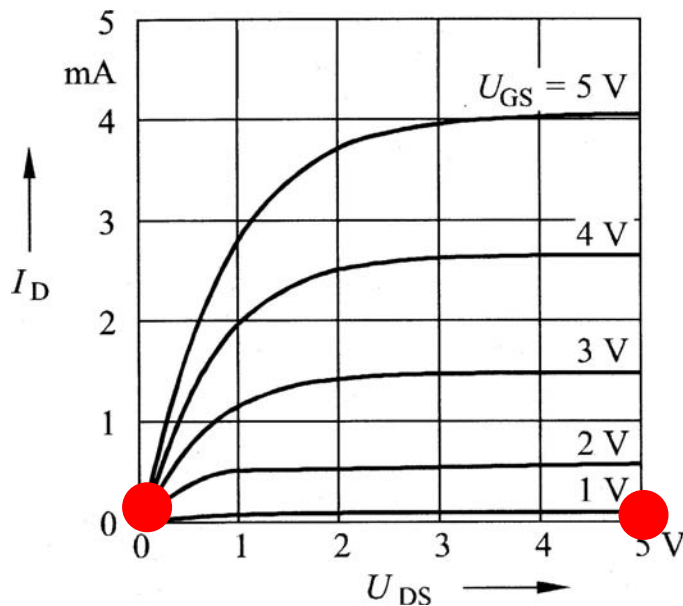
- Einsatz von Schaltungen, die die Eigenschaften von biologischen Neuronen und Synapsen imitieren
- Ausnutzung der analogen Eigenschaften der Transistoren

- Fehlertoleranz, hohe Parallelität und niedriger Energieverbrauch direkt realisierbar

Analoges Rechnen

Numerische Werte werden durch elektrische Größen wie Ströme und Spannungen dargestellt.

Arithmetische Operationen werden ausgeführt, indem man Schaltungen mit den entsprechenden Kennlinien entwirft.

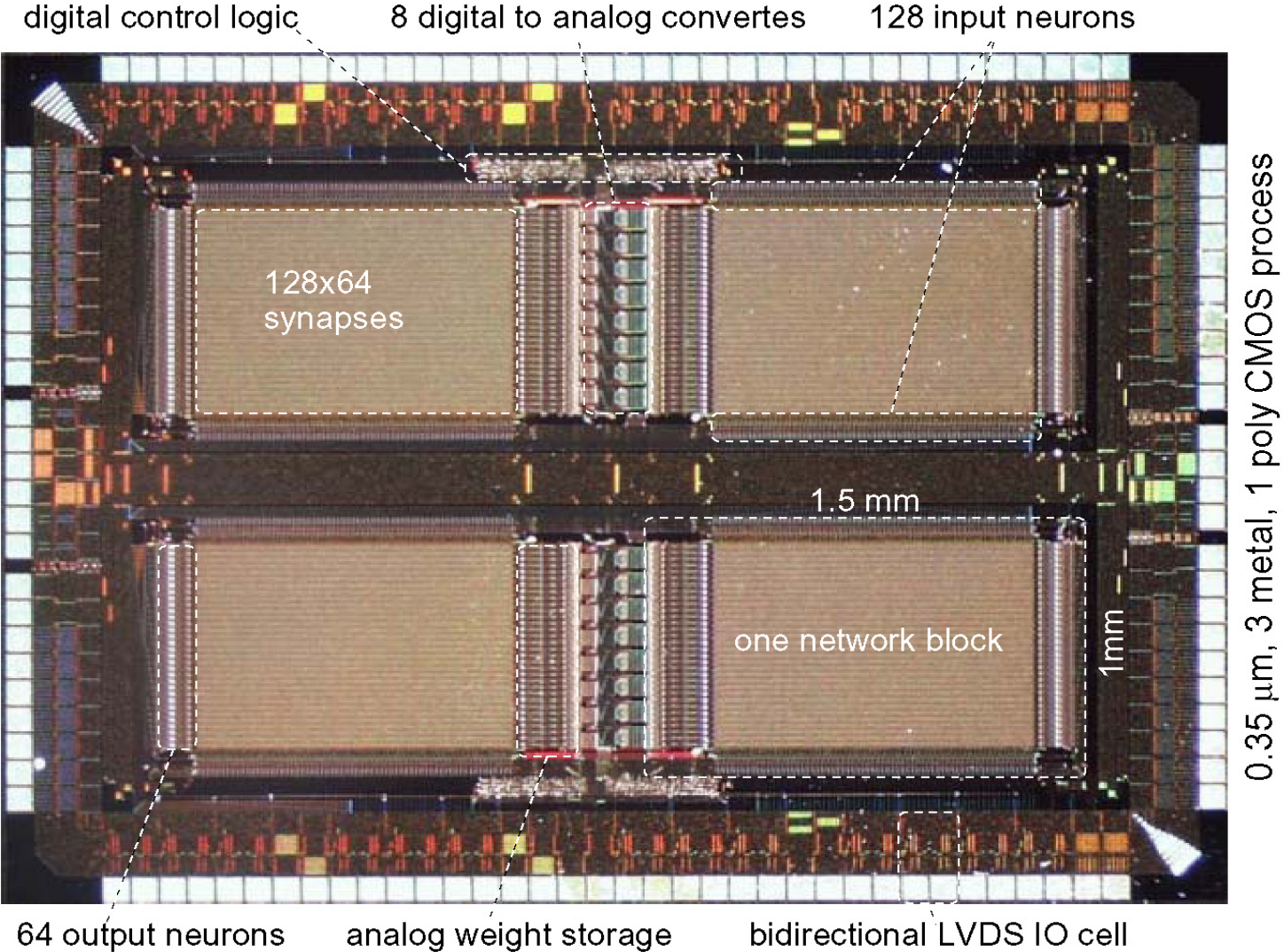


Kennlinien eines MOS Transistors für verschiedene Eingangsspannungen (Gate-Source-Spannung)

Im digitalen Betrieb werden nur die eingezeichneten Punkte verwendet

→ minimale Spannung: 0
maximale Spannung: 1

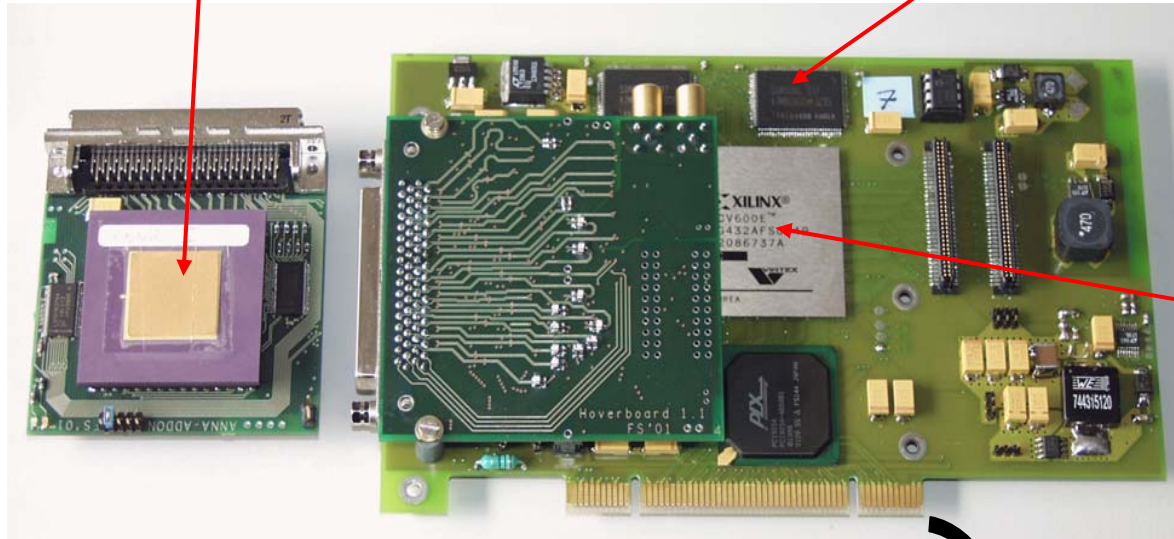
Fotographie eines analogen Netzwerkchips



Training und Test

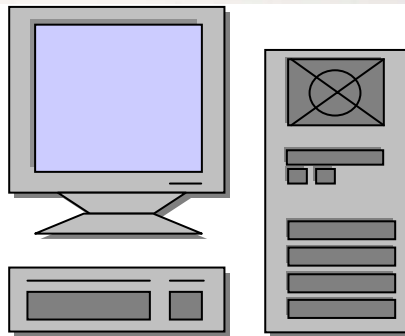
neuronaler
Netzwerkchip

Speicher für Test und
Trainingsdaten

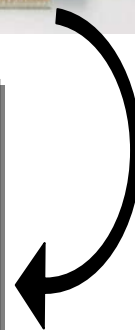


programmierbarer
Chip zur
Steuerung des
Netzwerks

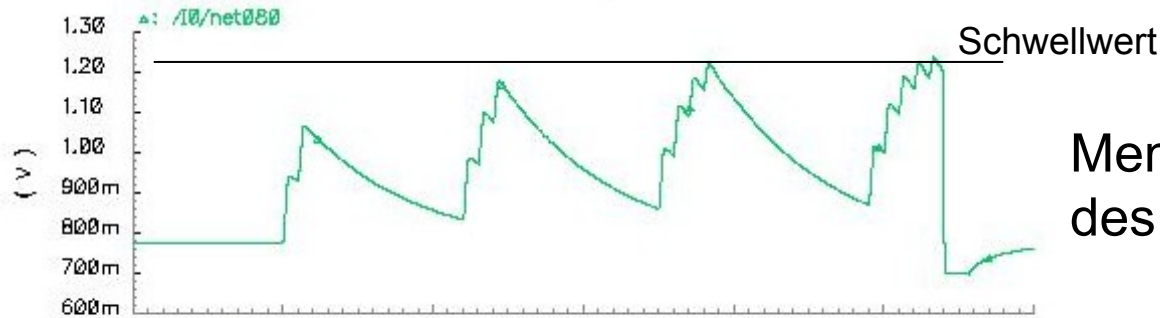
Benutzerschnittstelle
auf normalem PC



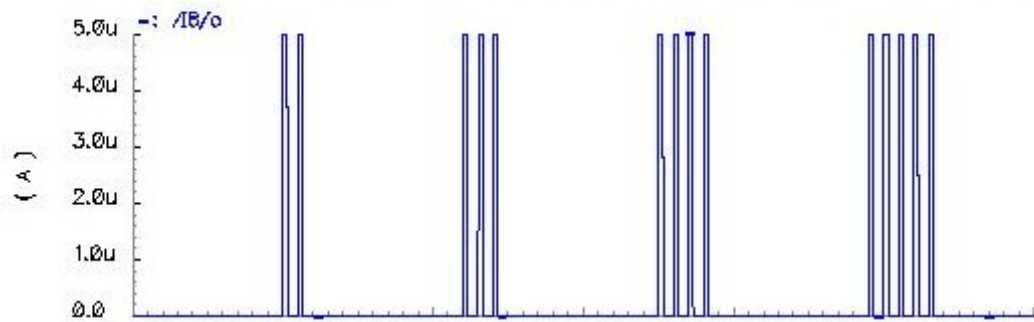
PCI Bus



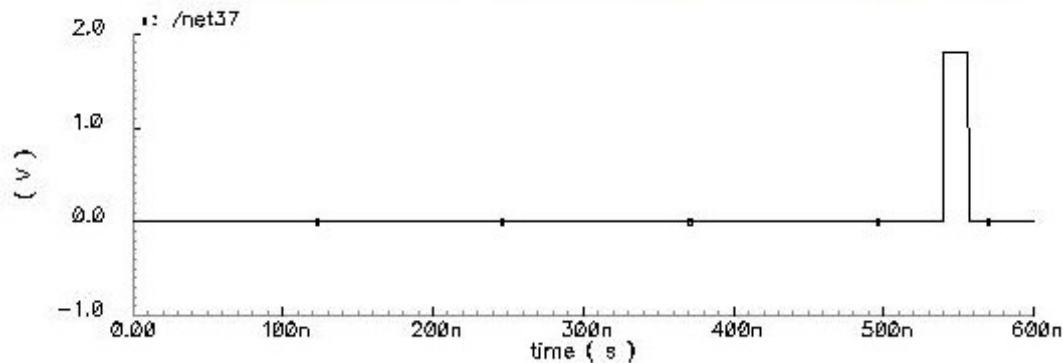
Signale eines elektronischen Neurons



Membranspannung
des Neurons

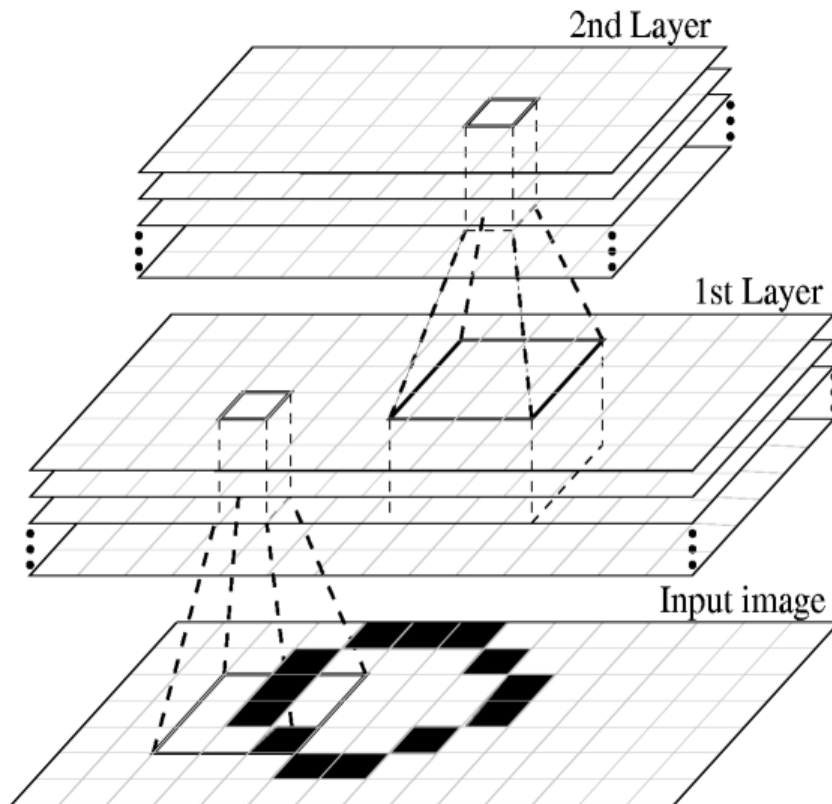


Eingangssignal



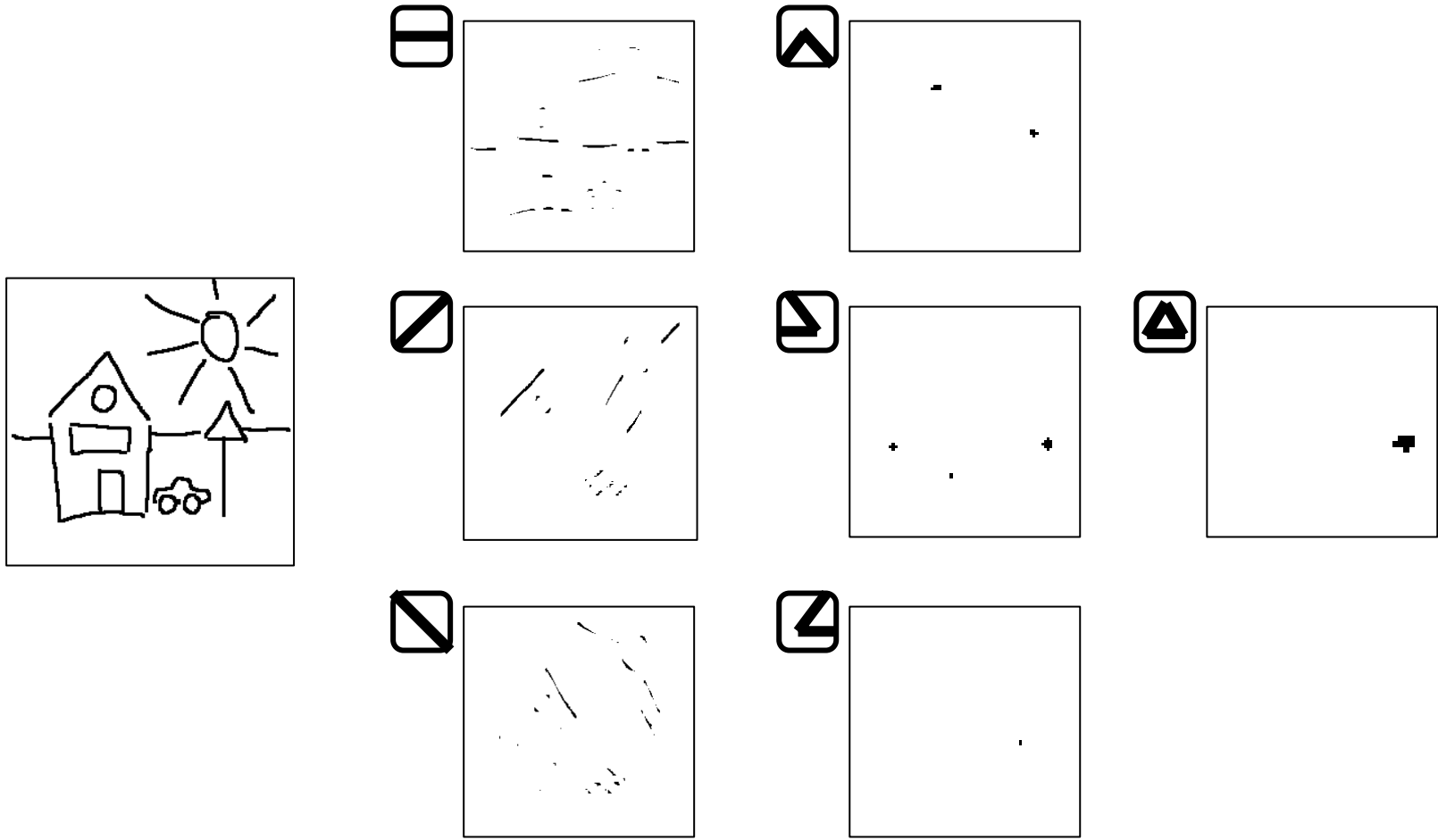
Ausgangssignal

Bilderkennung mit einem neuronalen Netzwerk



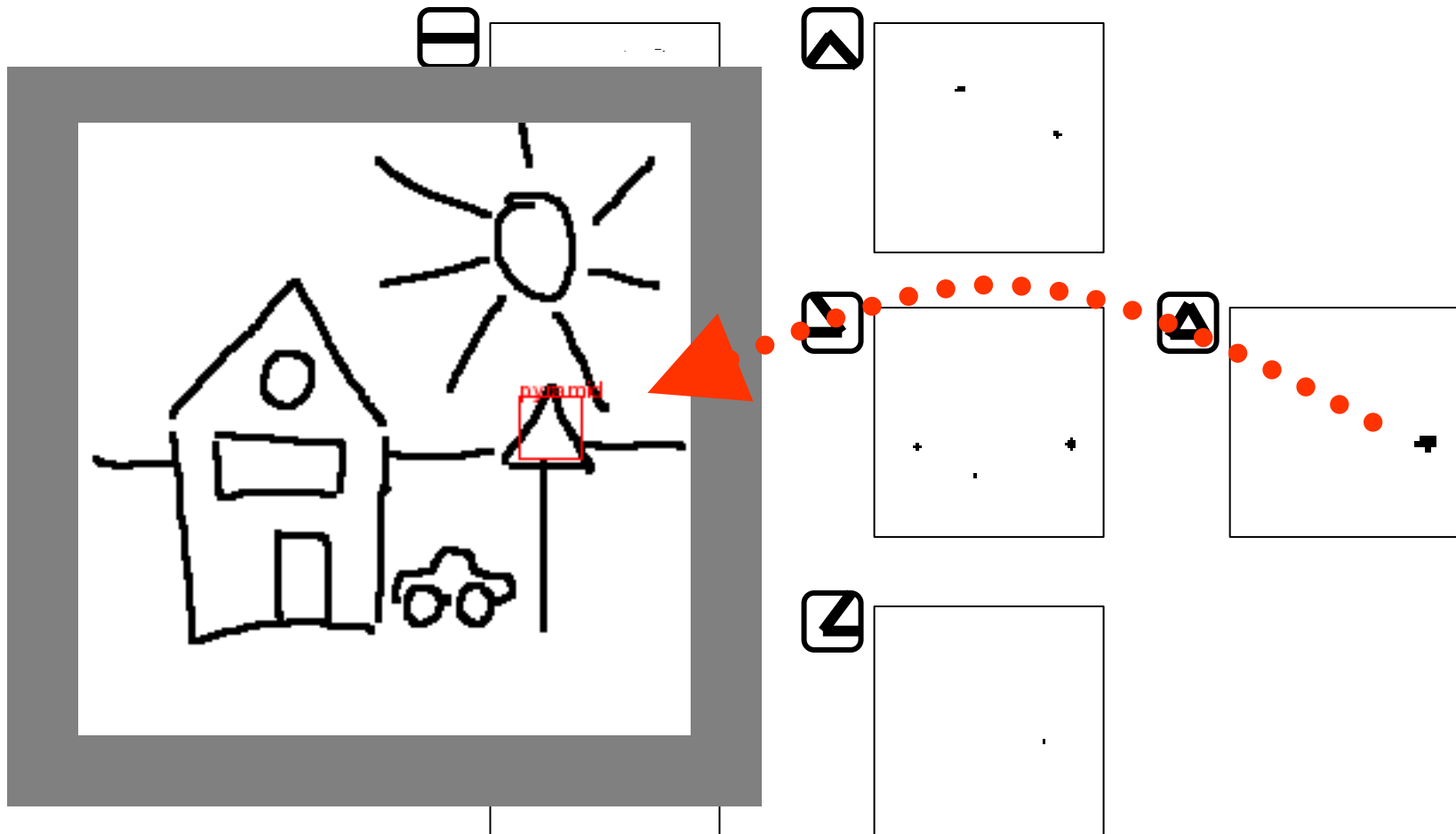
- am biologischen Vorbild orientiert
- hierarchische Struktur aus mehreren Schichten
- jede Schicht enthält einzelne Ebenen
- jede Ebene ist ein zweidimensionales Feld aus Neuronen
- jede Ebene extrahiert ein bestimmtes Merkmal
- die Merkmale werden von Schicht zu Schicht komplexer

Wie funktioniert die Merkmalerkennung?



Eingabeschicht → Schicht 1 → Schicht 2 → Schicht 3

Die Neuronen in der Ausgabeschicht erkennen das Verkehrsschild



Zusammenfassung

- es gibt zwei grundlegend verschiedene Methoden der Informationsverarbeitung:
 - natürlich: die neuronale (z.B. im menschlichen Gehirn)
 - künstlich: die digitale (in Computern)
- Computer basieren auf der Technik der Mikroelektronik
- mit der Mikroelektronik kann man aber auch neuronale Systeme bauen → Vereinigung der Vorteile beider Welten
 - Fehlertoleranz
 - niedriger Stromverbrauch
 - Fähigkeit zum Lernen