

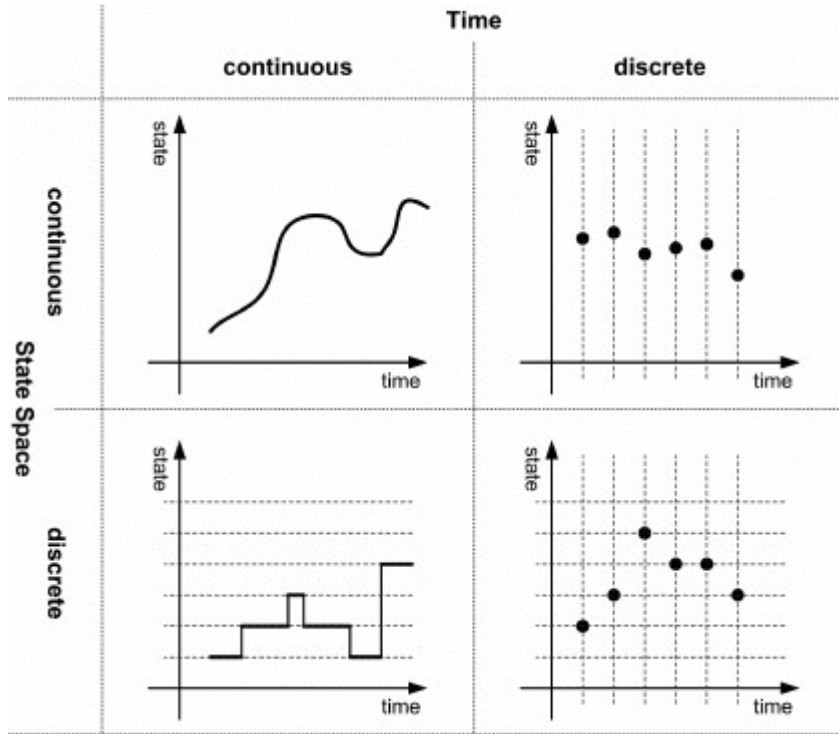
Die Zukunft ist Analog – Neue Rechnergenerationen „Beyond Moore“

Dr. Sven Köppel
koeppel@anabrid.com

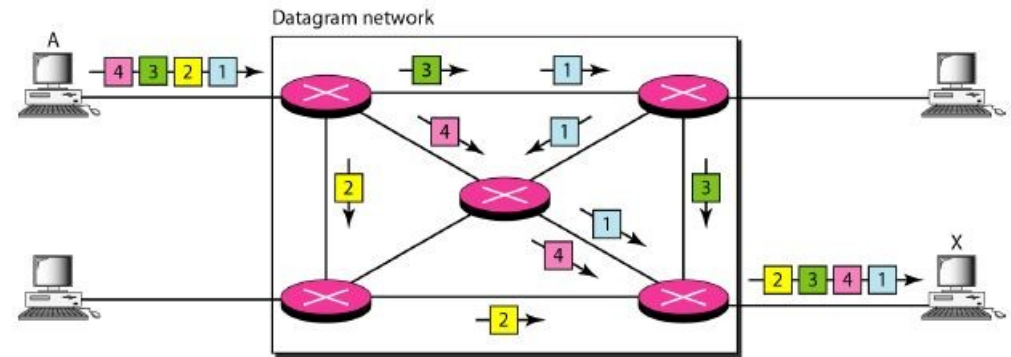
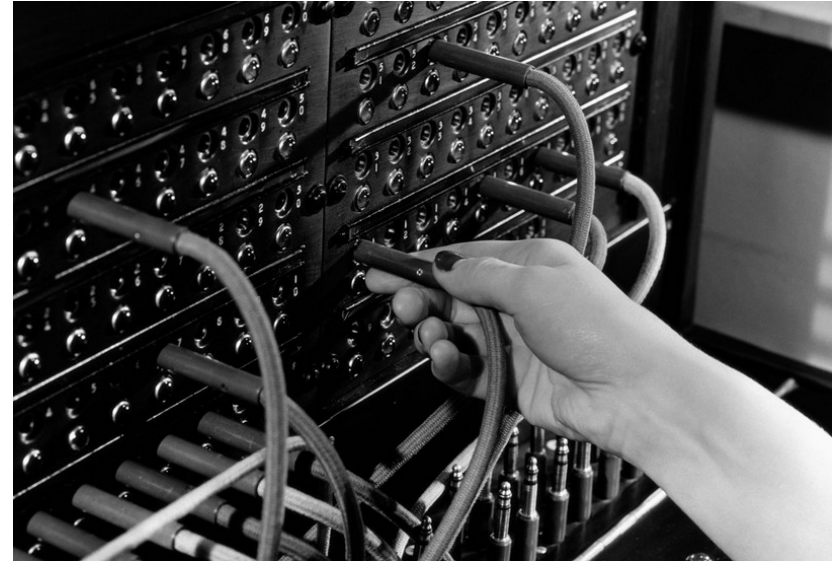
13.10.2021
Kolloquium am Fachbereich Elektrotechnik
und Informatik,
FH Münster, Campus Steinfurt



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

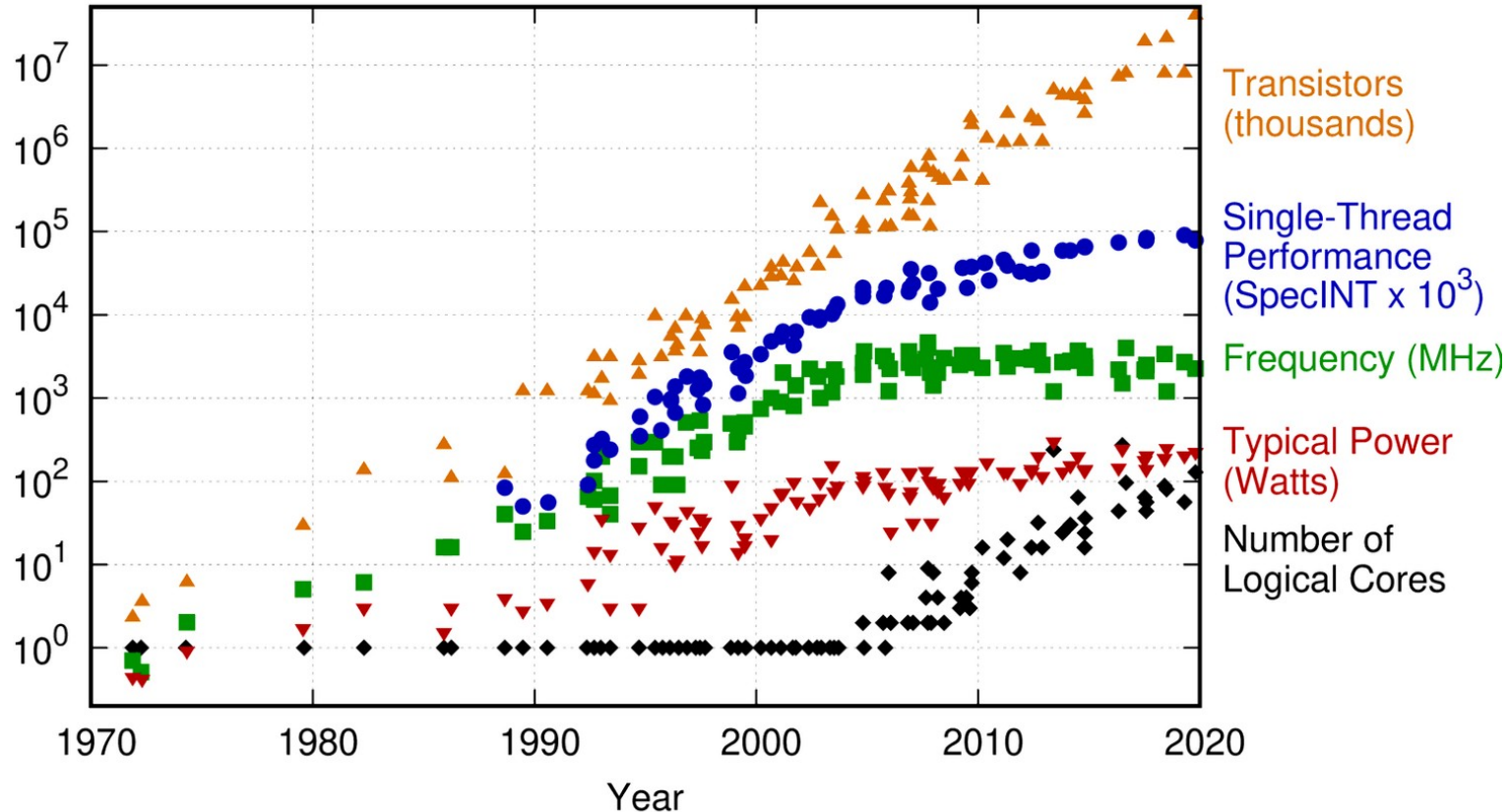


[10.14279/tuj.eceasst.27.385]



Moore's Law: Fortschritte nur noch bei Parallelisierung, nicht mehr Takt.

48 Years of Microprocessor Trend Data



Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

Parallelisierung: Mehr Rechner! Gauss Centre for Supercomputing



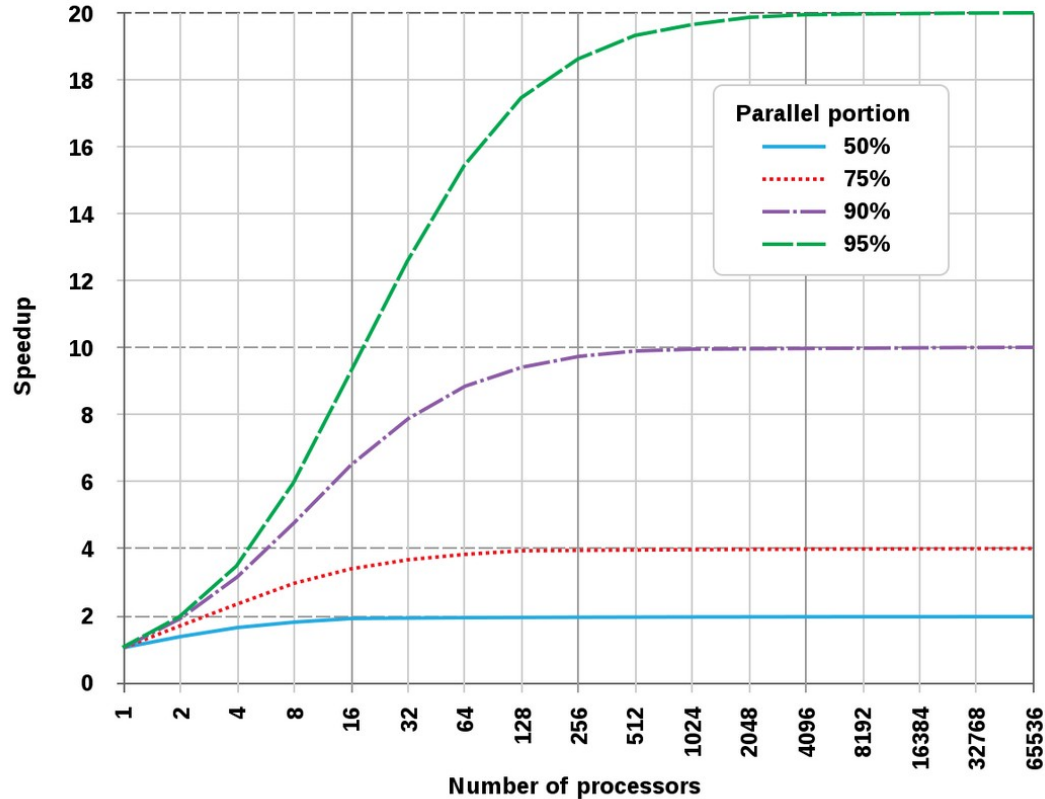
zB. der SuperMUC am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München (TUM/LMU)

Cluster aus 3000 Einzelcomputern („Node“)
Wassergekühlte Schränke
Petabyte Arbeitsspeicher ...



Grenzen der Parallelisierbarkeit: Amdahl's Gesetz

Amdahl's Law



Manycore-Architekturen und High Performance Cluster lassen Fortschritt zu.

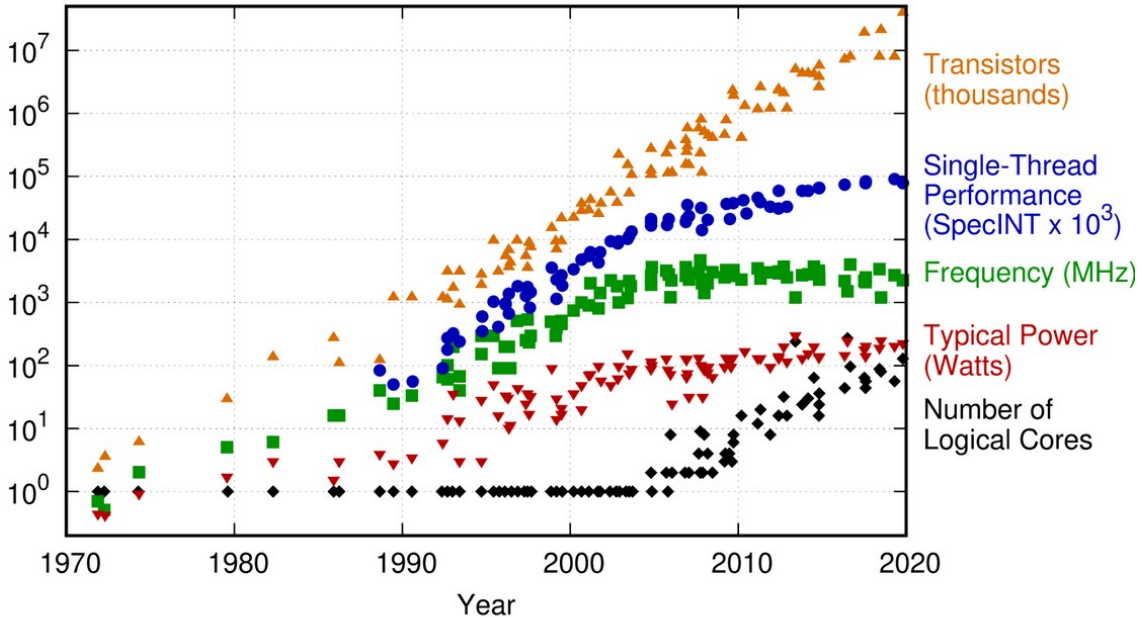
Doch der energetische Preis dafür ist sehr hoch!

Bei 95% Parallel portion:

3000 x Computer (Leistung)
aber nur 20 x Speedup

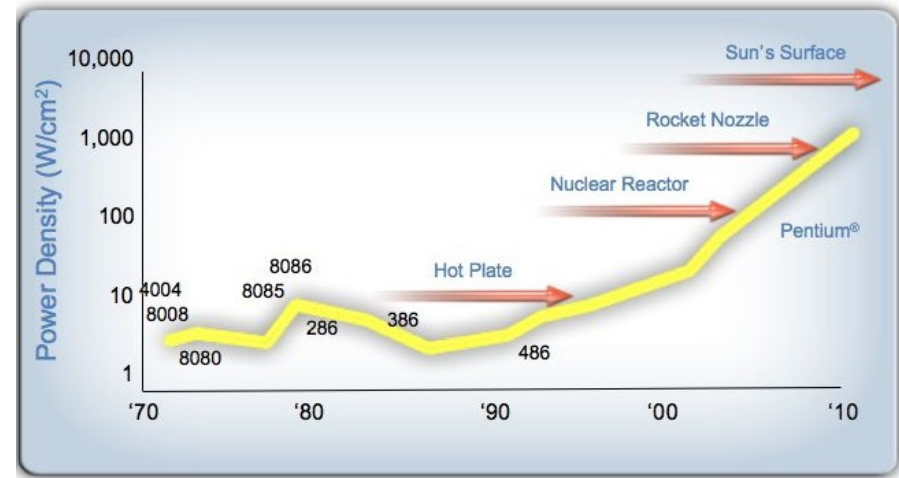
Moore's Law: Fortschritte nur noch bei Parallelisierung, nicht mehr Takt.

48 Years of Microprocessor Trend Data



Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

„Energy barrier“



Warum werden Computer heiss?

Landauer-Prinzip! [R. Landauer 1961]

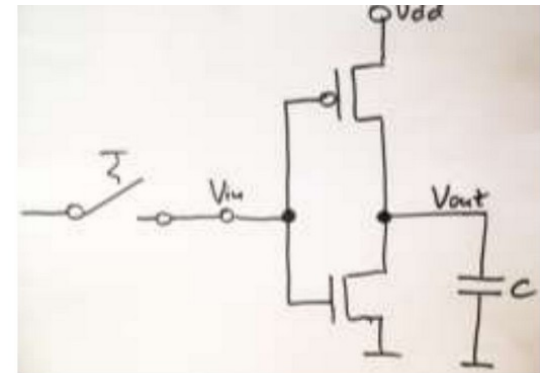
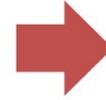
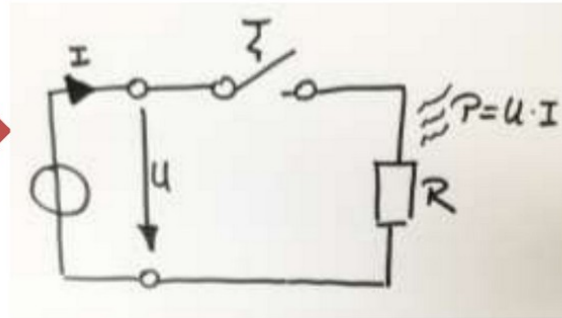
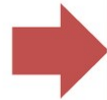
$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Signalverarbeitung}} + E_{\text{Wärme}}$$

Landauer-Limit (bei Raumtemperatur):

$$W \sim 3 \times 10^{-21} \text{ Joule/bit}$$

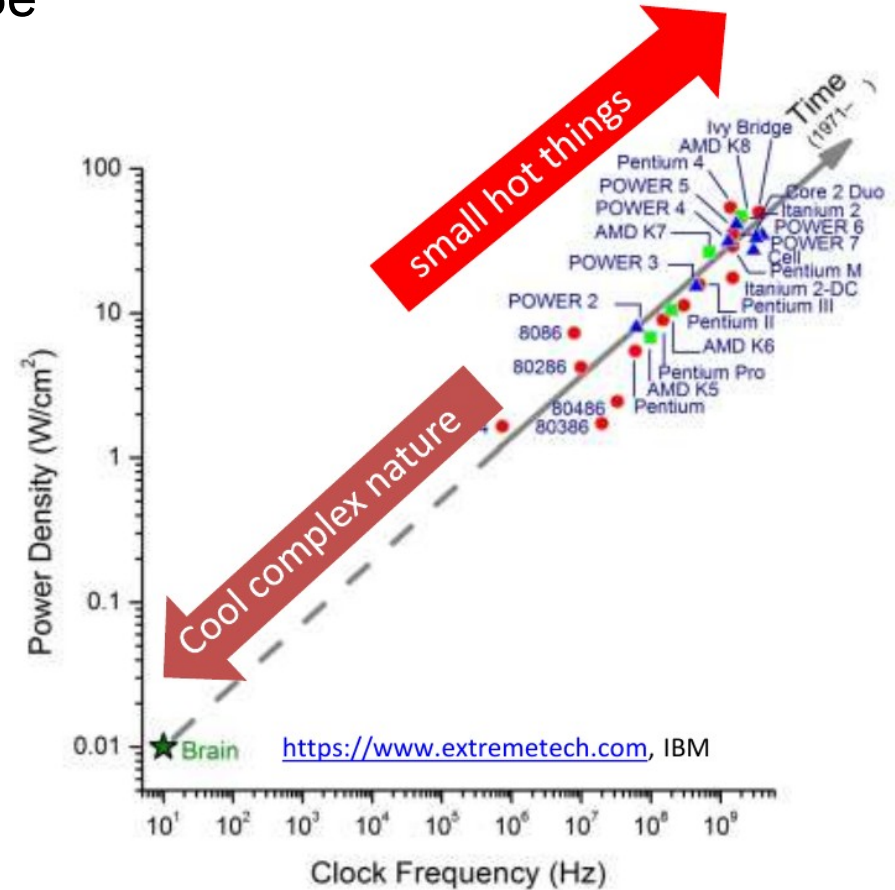
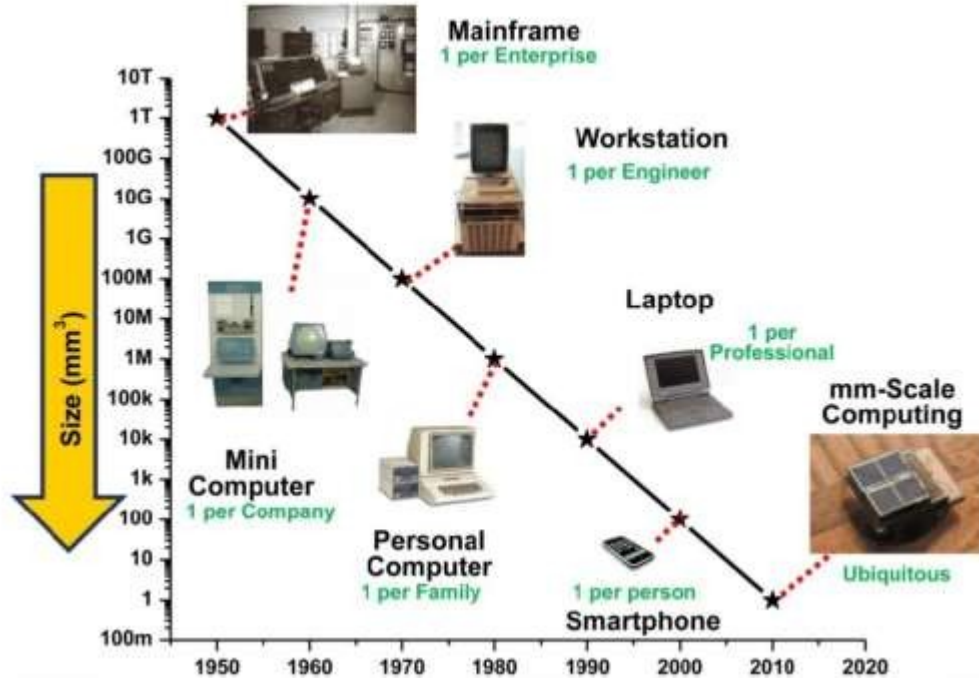


<https://www.lecker.de/wie-macht-man-das-perfekte-spiegelei-71193.html>



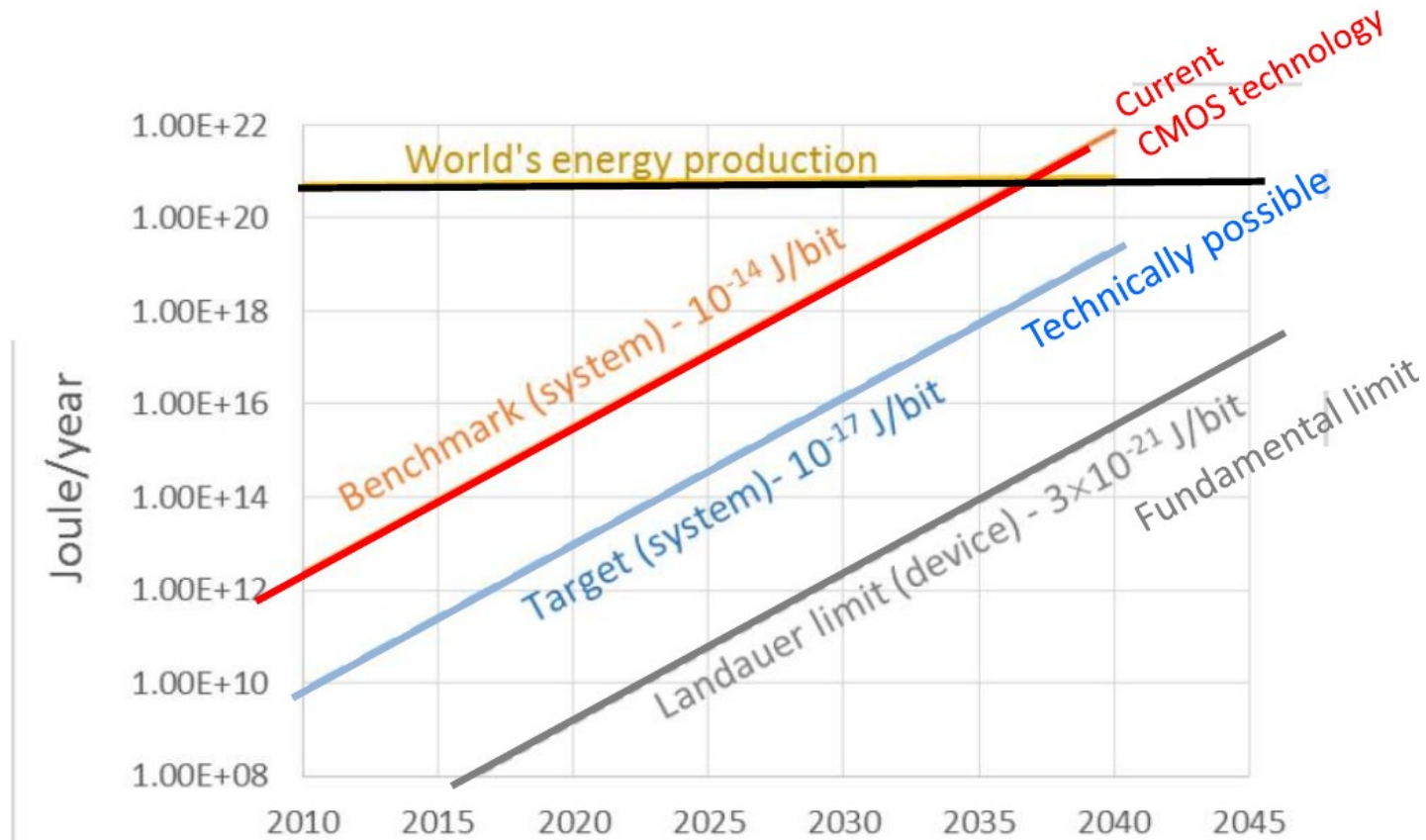
Verlustwärme in CMOS-Schaltungen nimmt stark zu mit der Integration der Bauelemente.

Wärmeentwicklung: Energie und Baugröße



Moderne Halbleiterfertigungsprozesse lassen Fortschritt zu.
Der energetische Preis dafür ist aber sehr hoch.

Schalten erzeugt Wärme: Und zwar global relevant viel!



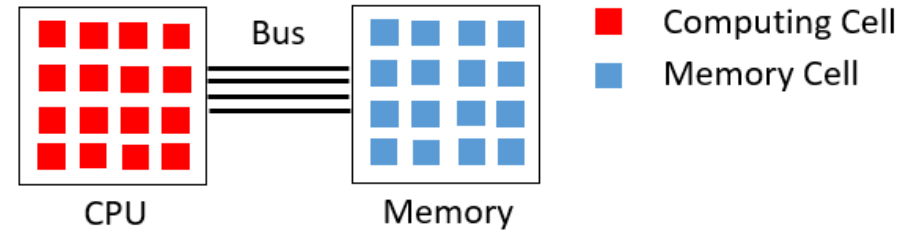
„Informations-
katastrophe“

Schon heute **7% der globalen Energie** für Informationssektor.

Klimawandel?

Digitale Architekturen: Zusammenfassung

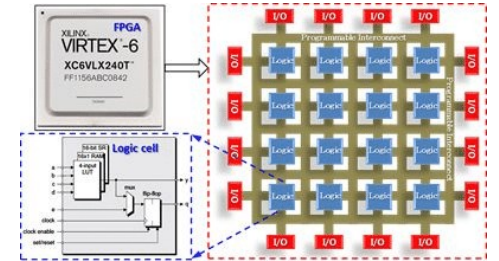
- **Energiebarriere:** Takt kann nicht schneller werden.
- **Amdahls Gesetz:** Parallelisierbarkeit hat Grenzen.
- **Von Neumann-Flaschenhals:** Konventionelle Computerarchitektur begrenzt Leistung.



Digitale Alternativen, zB.



GPGPUs



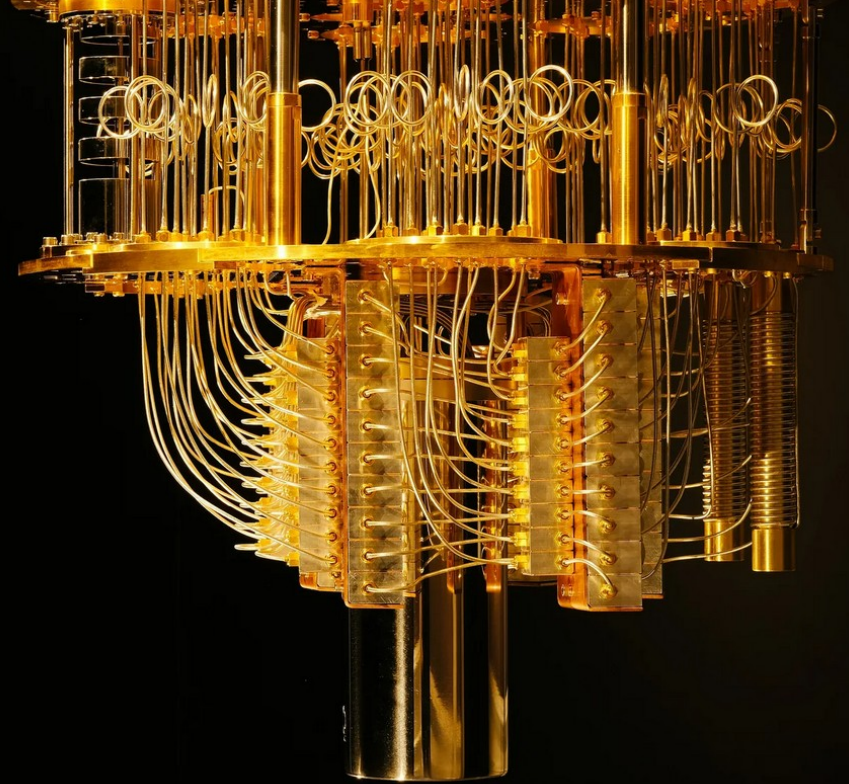
FPGAs

Exotic Computing: Grundlagenforschung

- Spintronik, Photonisches Rechnen
- Quantencomputing
- AI & Neuromorphic Computing
- Memristoren, Computational Memory & Von Neumann Bottleneck
- Analogrechnen

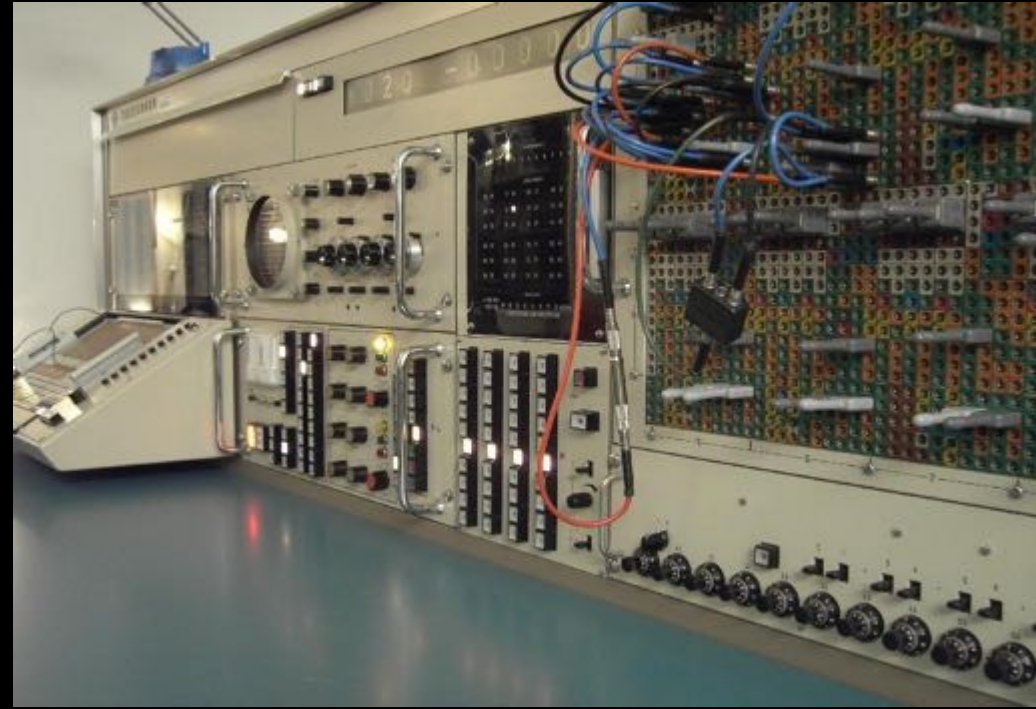
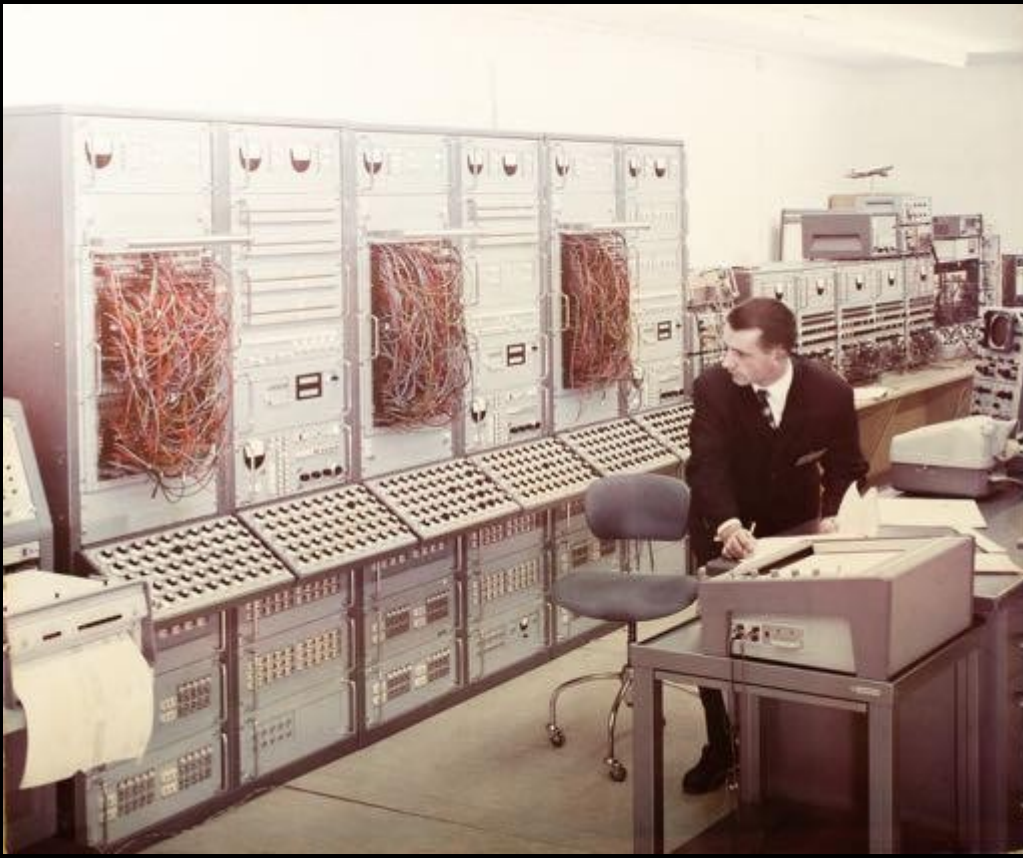
Viel Materialforschung

Viele interdisziplinäre Verbindungen

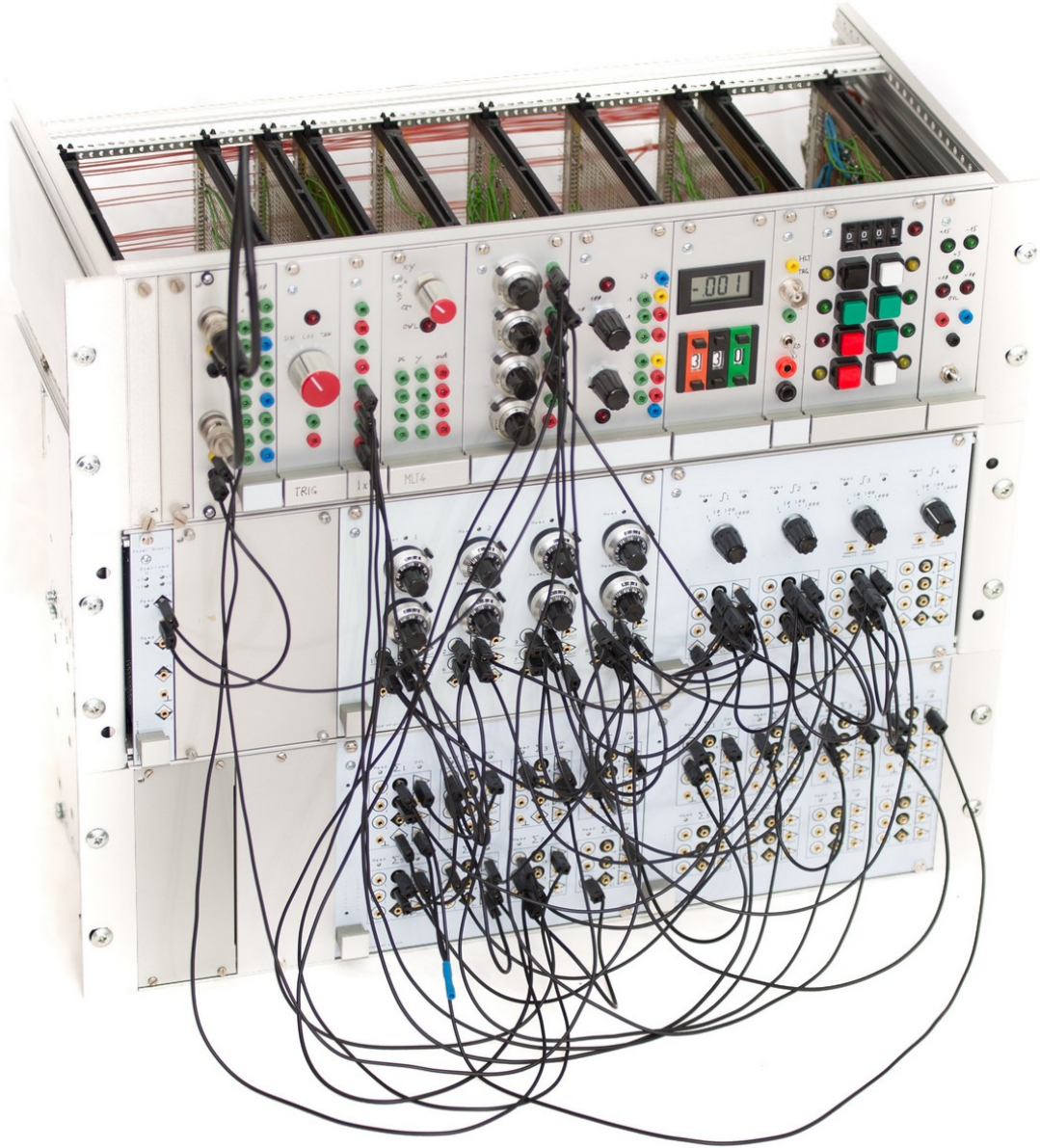


IBM Q System One

Historische Analogrechner



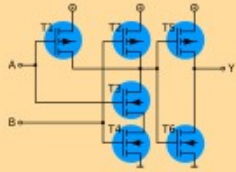
Telefunken-Analogrechner aus den 1960ern → www.analogcomputermuseum.org



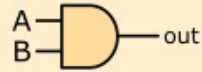
Die Rückkehr des Analogrechners

- Namensgebend ist die Analogiebildung mit **elektrischen Schaltkreisen**.
- **Intrinsisch parallele Datenflussverarbeitung** statt sequentieller Algorithmen.
- Extrem **energieeffizient**: „Jedes Elektron zählt“.
- Kontinuierliche Werte und **kontinuierliche Zeit**: Kein Takt.

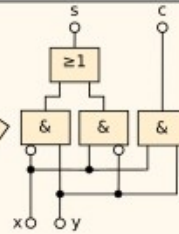
Elektrische Analog- und Digitalrechner nutzen Transistoren grundsätzlich anders



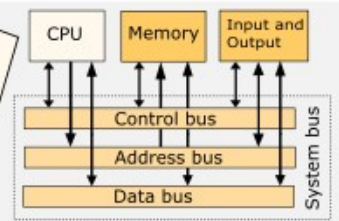
Ein logisches Gatter arbeitet mit Spannung/Strom an/aus. Eine Leitung trägt 1 Bit Information.



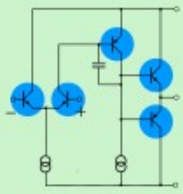
Gatter implementieren die Bool'sche Algebra und sind die Grundbausteine des Digitalrechners.



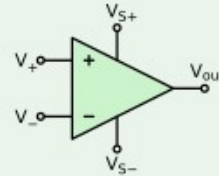
Aus Gattern kann man beliebig große arithmetische Rechenelemente bauen, die z.B. Ziffer für Ziffer addieren.



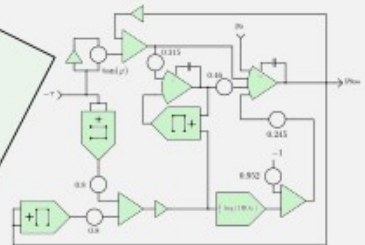
So entsteht der klassische Digitalprozessor, der Schritt für Schritt arbeitet.



Analoge Schaltkreise rechnen mit kontinuierlichen Strömen und Spannungen. Eine Leitung trägt viel Information.

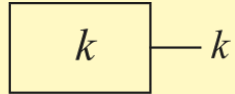


Der Operationsverstärker ist der Grundbaustein des Analogrechners und kann viele elementare Rechnungen durchführen. Er arbeitet mit kontinuierlichen Größen, instantan und ohne Takt und verbraucht dabei sehr wenig Energie.

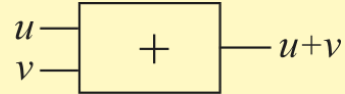


So entsteht der Analogrechner, der datenflussorientiert eine Aufgabenstellung löst.

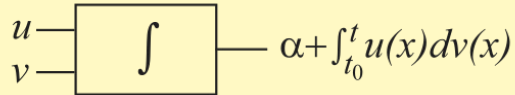
Bausteine des Analogrechners! The General Purpose Analog Computer



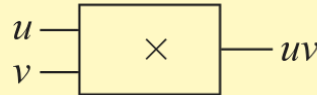
A constant unit associated to



An adder unit



An integrator unit



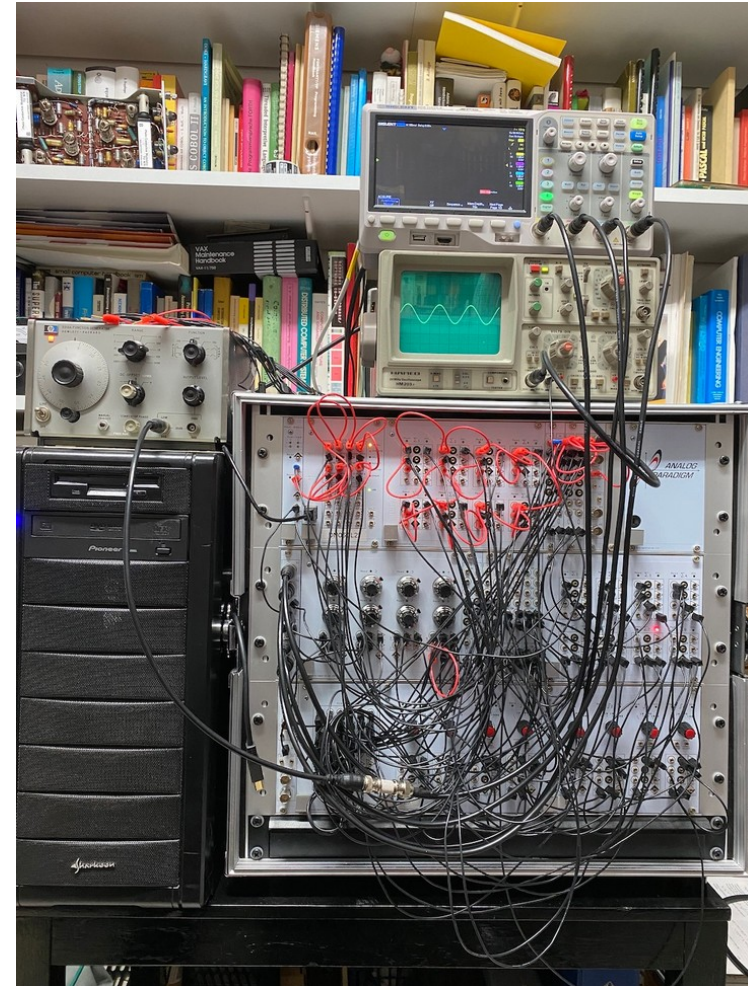
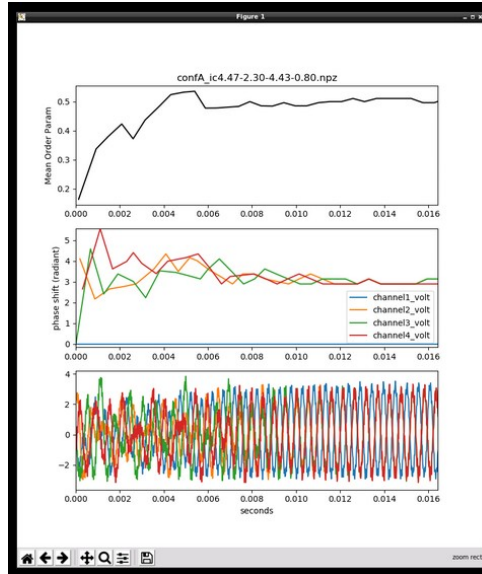
A multiplier unit

Claude Shannon [1941] hat für Analogrechner gemacht, was Turing für Digitalrechner gemacht hat.

- Kein Algorithmus, kein Speicher
- Alle Rechenelemente rechnen ständig und gleichzeitig

Herausforderungen bei Analogschaltungen: Die Nachteile

- Relativ **ungenau**: Nur 3-4 Dezimalstellen
- Die Rechnung wird zur „**Messoperation**“ (ähnlich Quantencomputer)
- Nur ein Freiheitsgrad „**Zeit**“ (Integration in Zeitrichtung)
- Bounded In, Bounded Out (Wertebereich): **Zahlenskalierung**



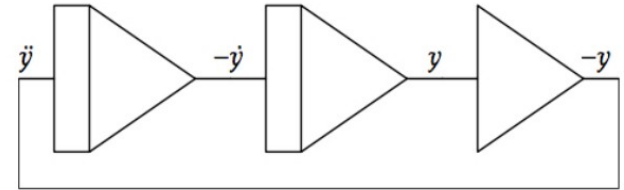
Analogrechnen: Ein Beispielprogramm

Harmonischer Oszillator:

$$\ddot{y} + \omega^2 y = 0$$

Umschreiben zu:

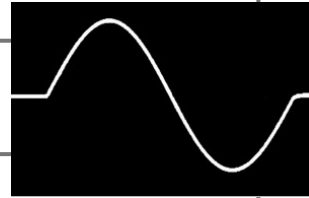
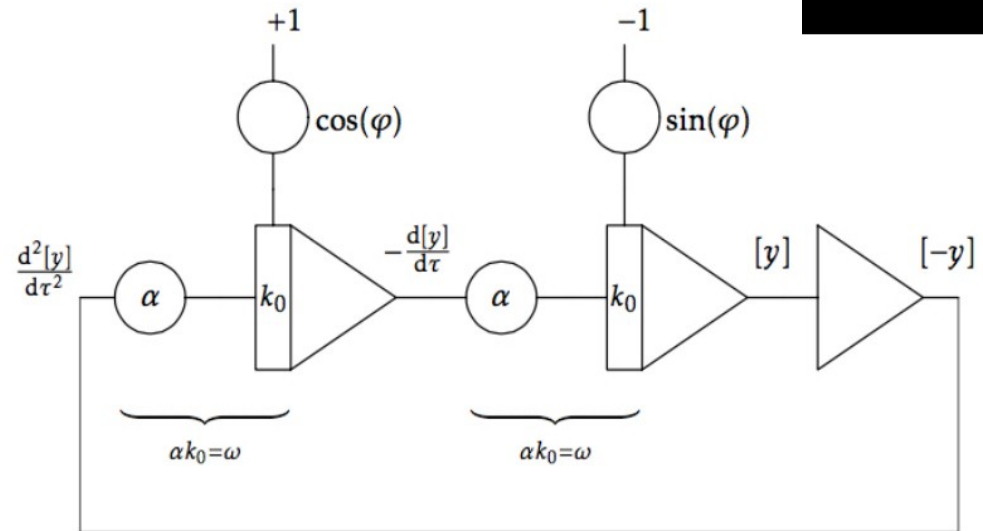
$$\ddot{y} = -y \quad (\text{mit } \omega = 1)$$



Mit Anfangswerten und Allgemein:

$$y_0 = a \sin(\phi)$$

$$\dot{y}_0 = a\omega \cos(\phi)$$



Anwendungen

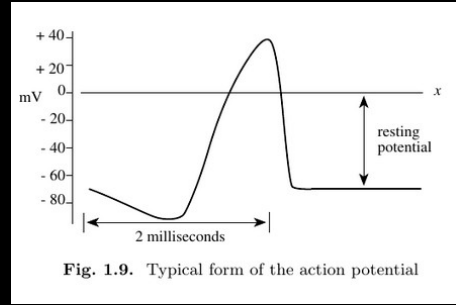
die von Analogrechnern profitieren würden

Anwendungen

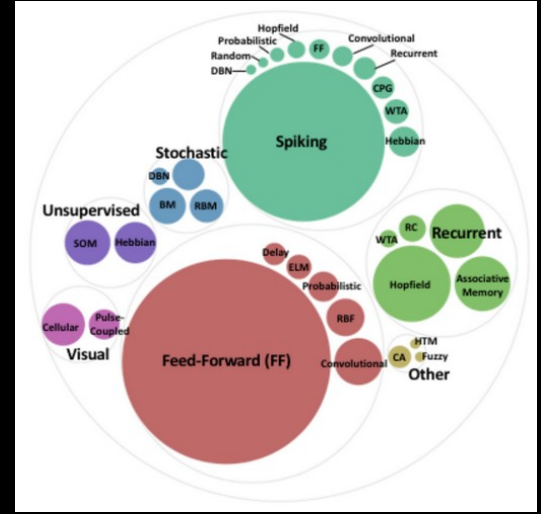
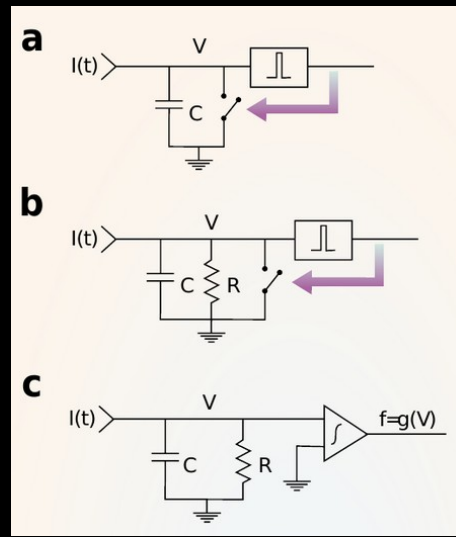
Artificial Intelligence



Neuronen sind Analogrechner, und analoge CMOS-Technologie ist die beste (vorhandene!) verfügbare Technologie sie zu simulieren.



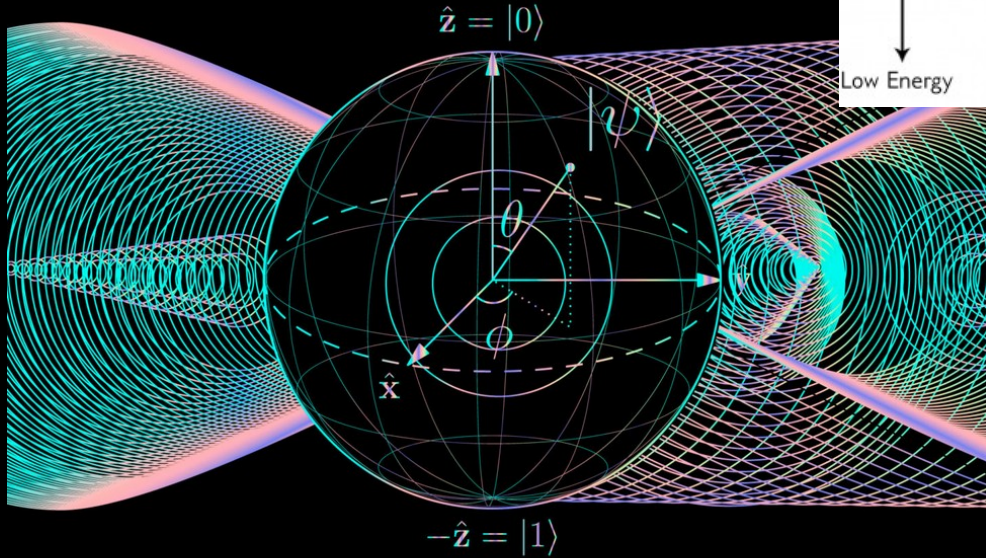
Rojas: Neural Networks (Springer 1996)



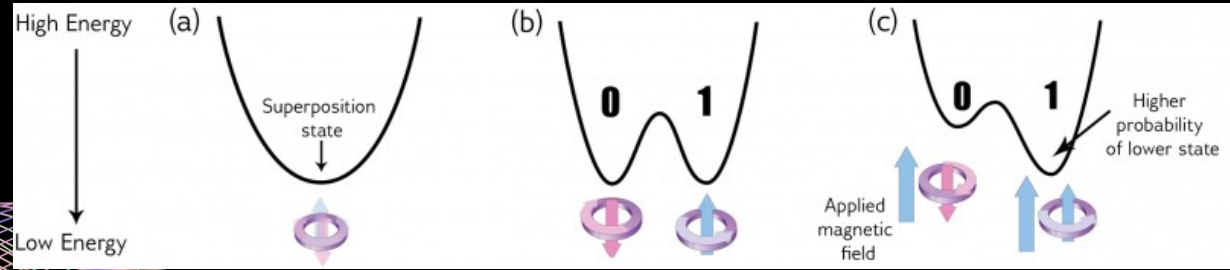
A survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware, [arXiv:1705.06963]

Koch, Segev: The role of single neurons in information processing (Nature neuroscience, vol. 3, 2000)

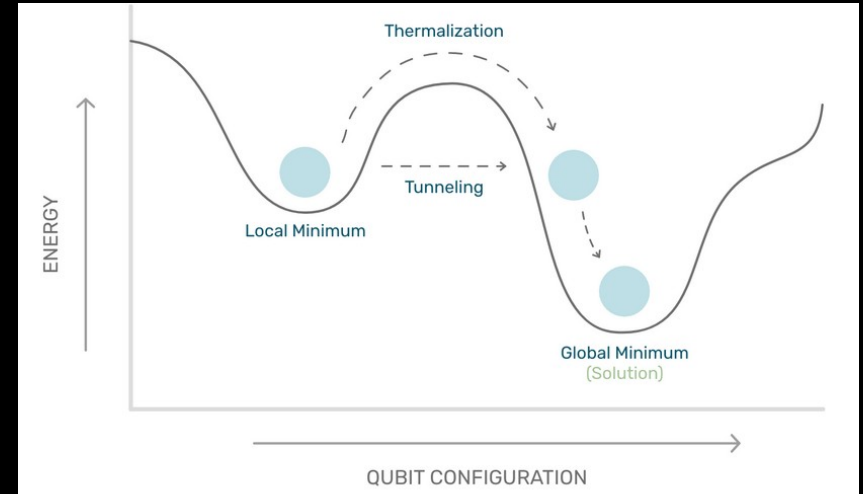
Anwendungen Quantum Computing



QC braucht auf Dauer **viel Energie**. Durch Fehlerkorrektur werden für **realistische Anwendungen** sehr viele Qubits benötigt. Klassische Wellenrechner sind in vielen Anwendungen **überlegen**, zB. **Grover-Algorithmus**.



Quanten-Annealer [Bildquelle: DWAVE / blog.aimultiple.com]

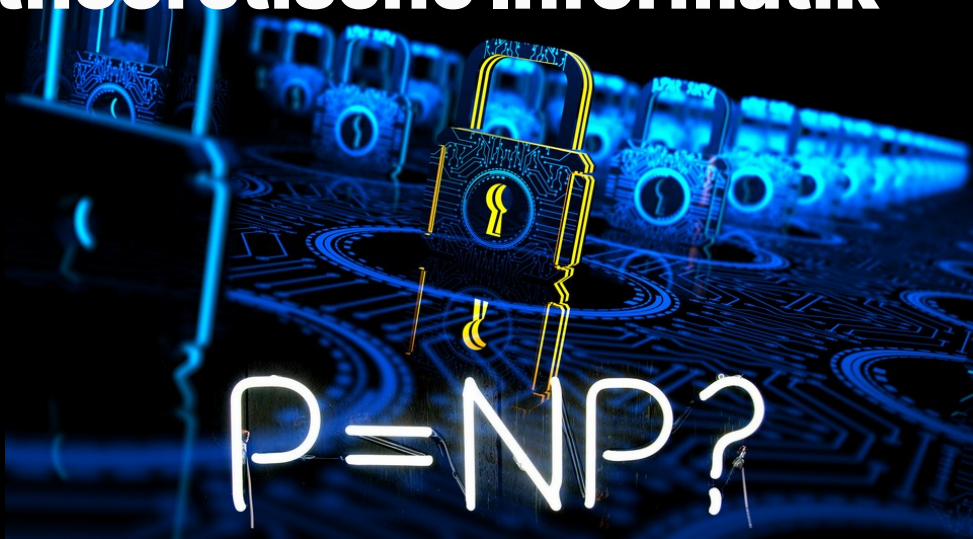


Quanten-Annealer [Bildquelle: miro.medium.com/max]

DARPA, April 2021: **Quantum-inspired classical computing program**
<https://www.darpa.mil/news-events/2021-10-04>

Anwendungen

Verschlüsselung und theoretische Informatik

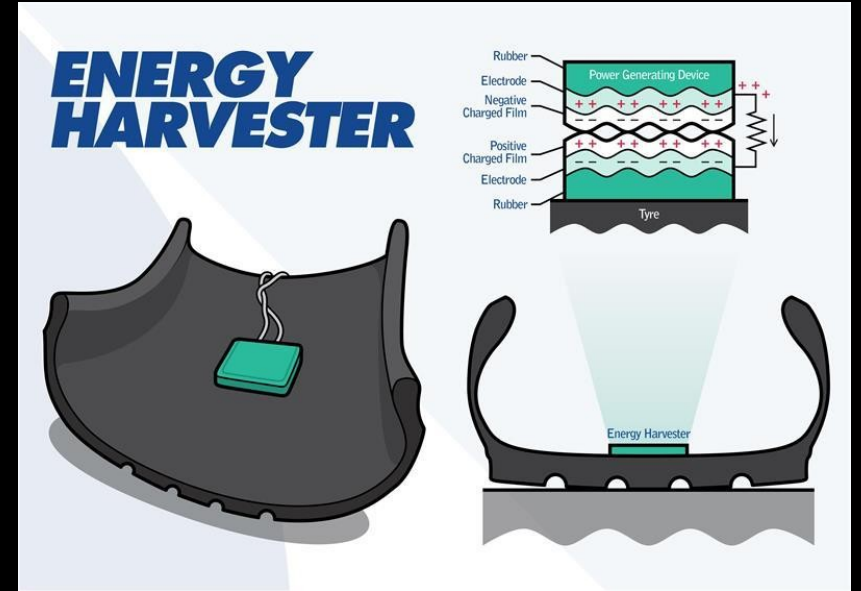
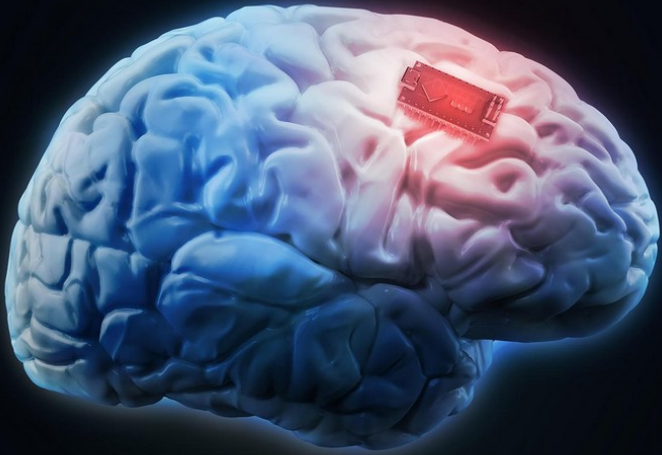


Analogrechner können möglicherweise effizient **kombinatorische Probleme lösen** und Pre-Quantum **Verschlüsselung** knacken.

→ Hava Siegelmann: Computation beyond the Turing Limit (Science 1995)

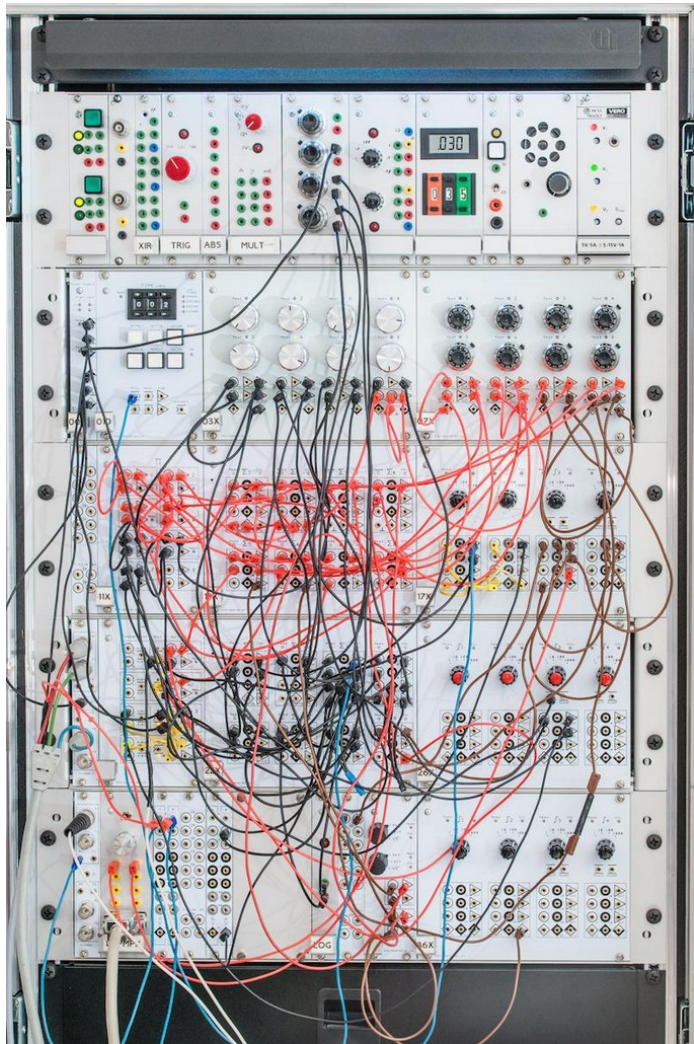
Anwendungen

Wearables und Implantate

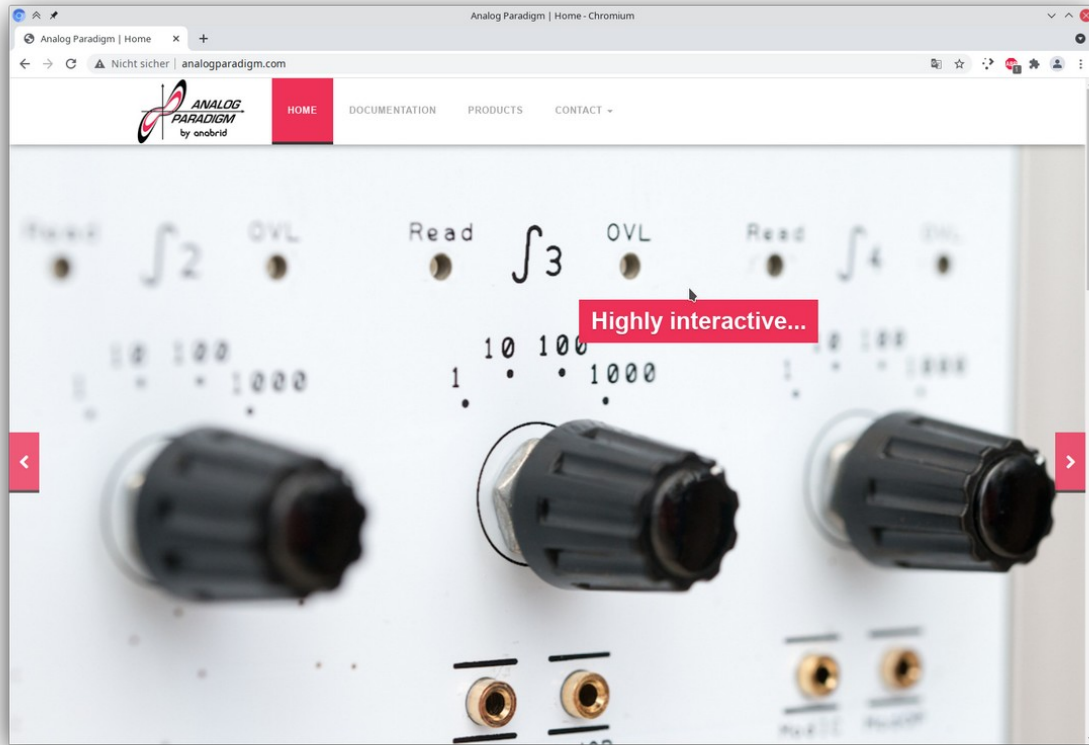


[Bildquelle: markallengroup.com]

Analogrechner eignen sich für **herausfordernde** oder **schnelle Rechnungen** bei **wenig Energieverbrauch** benötigt werden. Analogrechner werden hier einen nachhaltigen Einfluss haben.



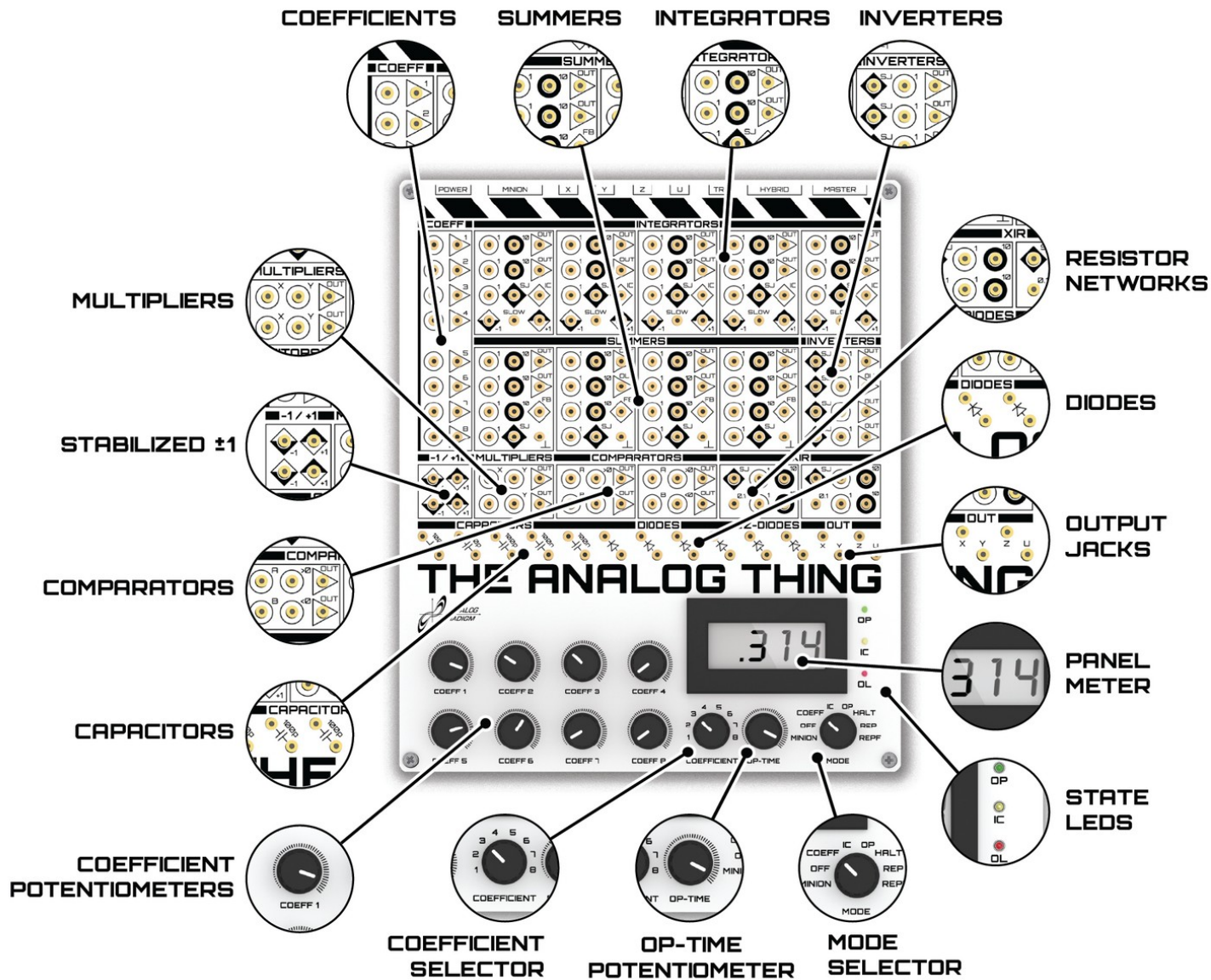
Über uns: www.analogparadigm.com



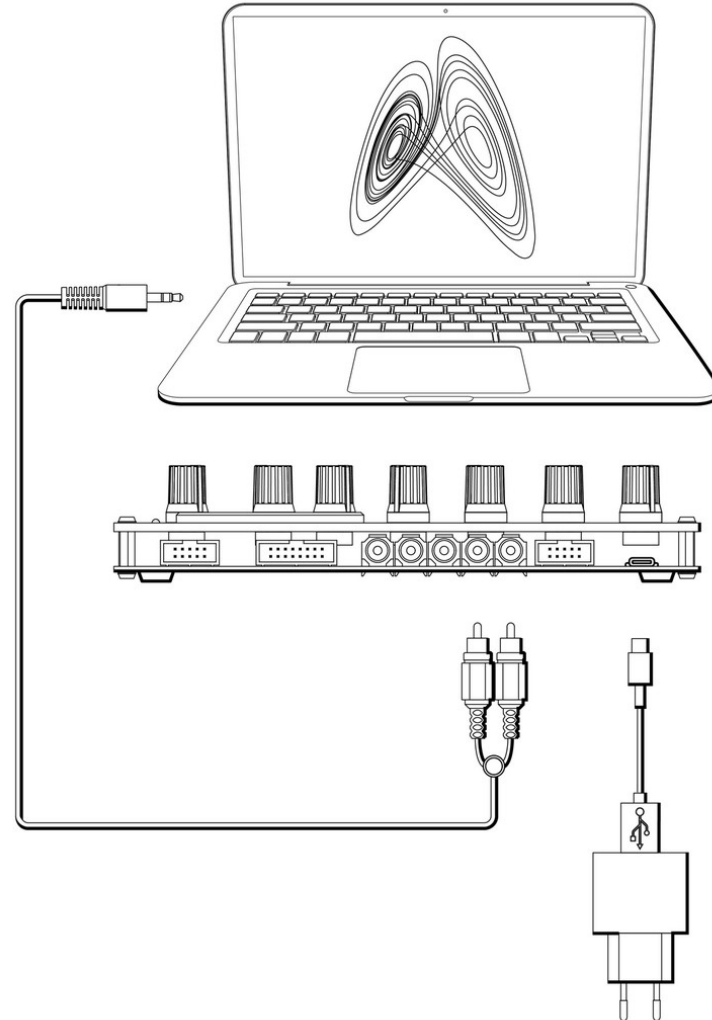
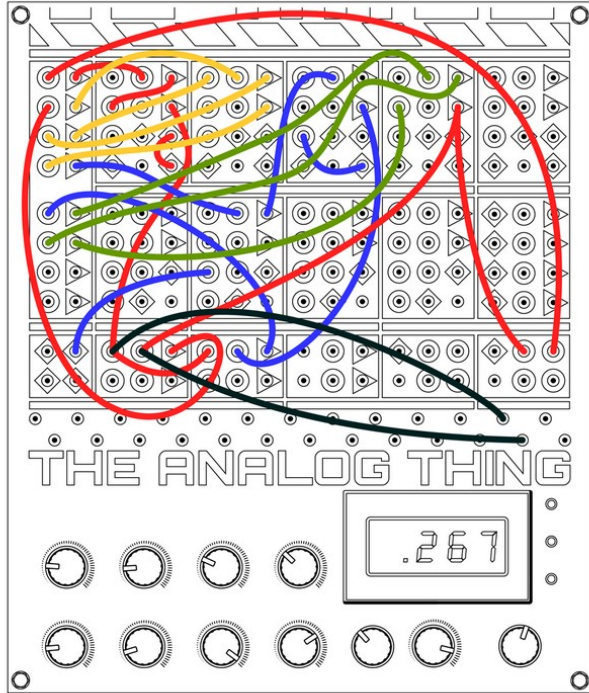
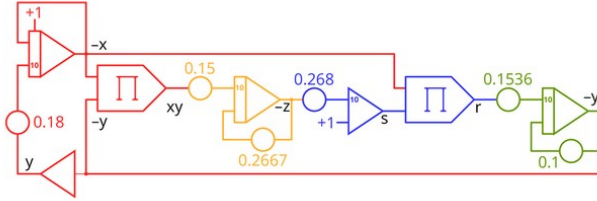
The Analog Thing

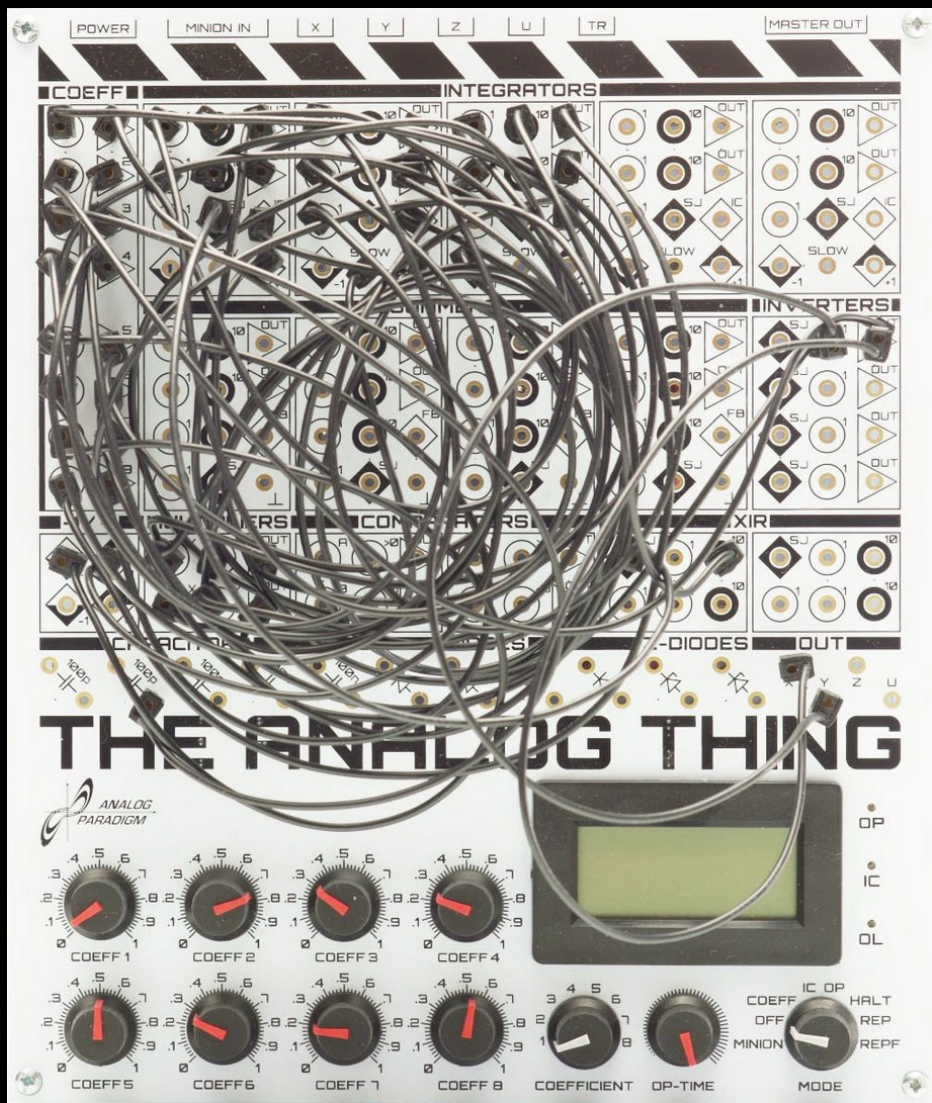


- Erschwinglicher Rechner für **Ausbildung und Lehre**.
- **Open Source-Hardware** soll zum Basteln einladen.
- Einfache Schnittstellen an **Arduino, Raspberry Pi**, etc.
- Start **ohne Laborequipment** möglich (dank Soundkarte)



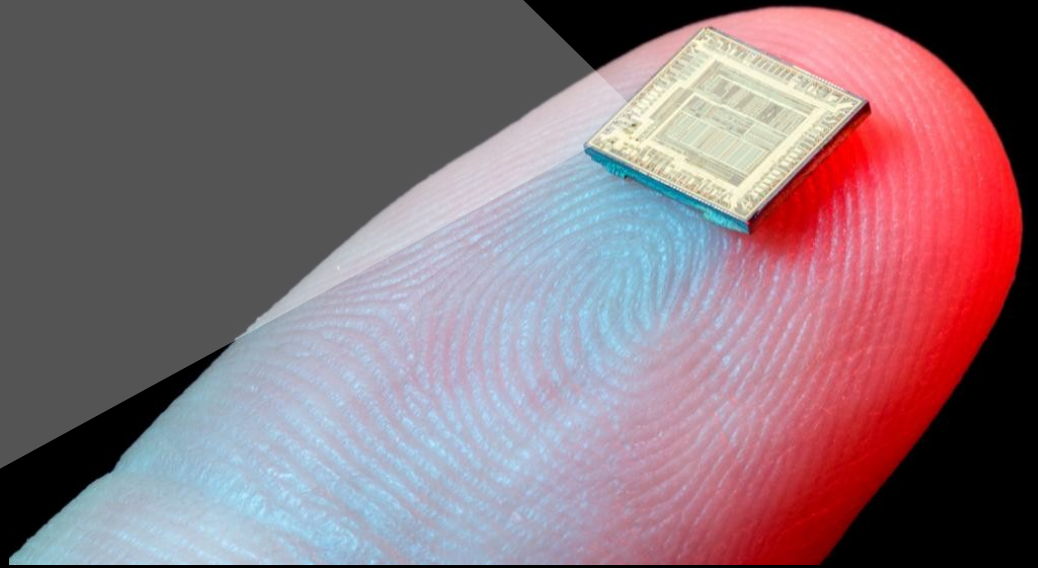
$$\begin{aligned}
 -x &= -\int 1.8y - x \, dt + C \\
 -z &= -\int 1.5xy - 0.2667z \, dt \\
 s &= -(1 - 2.68z) \\
 r &= -xs \\
 -y &= -\int 1.536r - 0.1y \, dt
 \end{aligned}$$



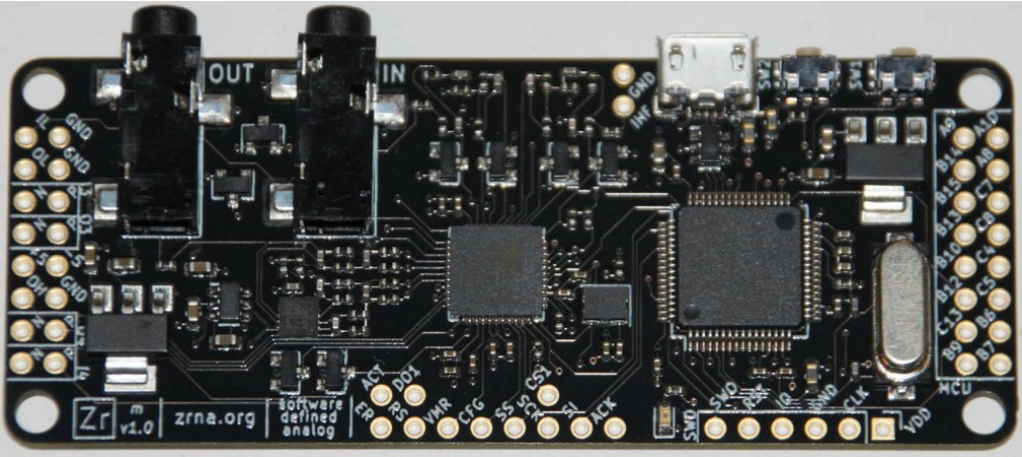


Unsere Vision

Integration eines
Analogrechners auf
einen Mikrochip.

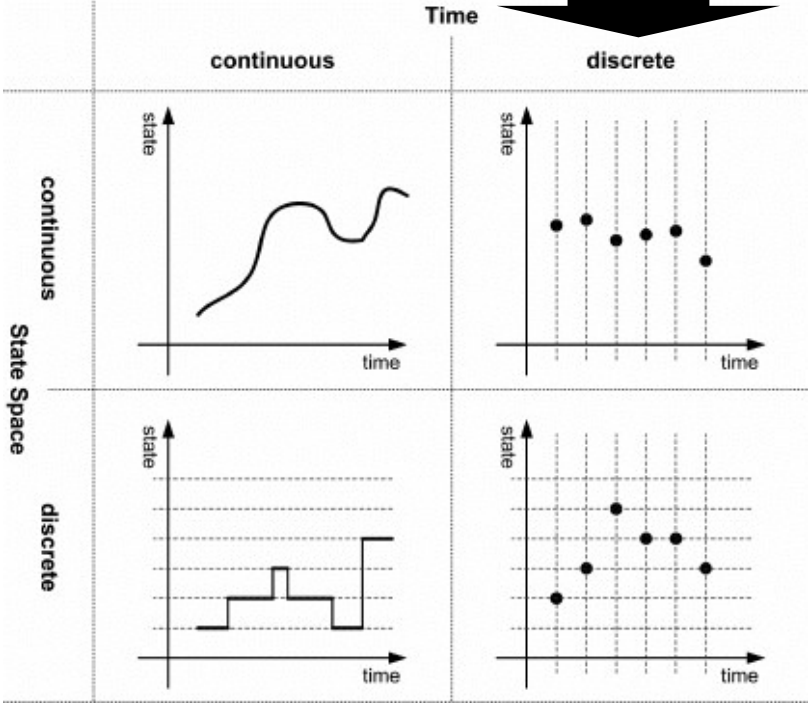


Field Programmable Analog Arrays zB. Der ZRNA (nutzt Anadigm Inc.)



[<http://zrna.org>]

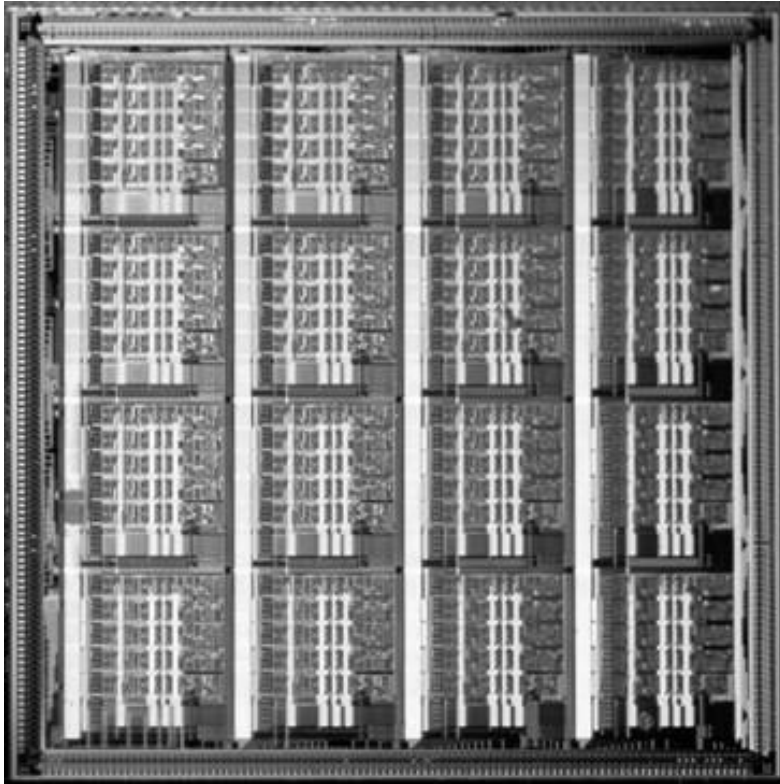
Switched capacitor configurable analog blocks (CABs)



[10.14279/tuj.eceasst.27.385]

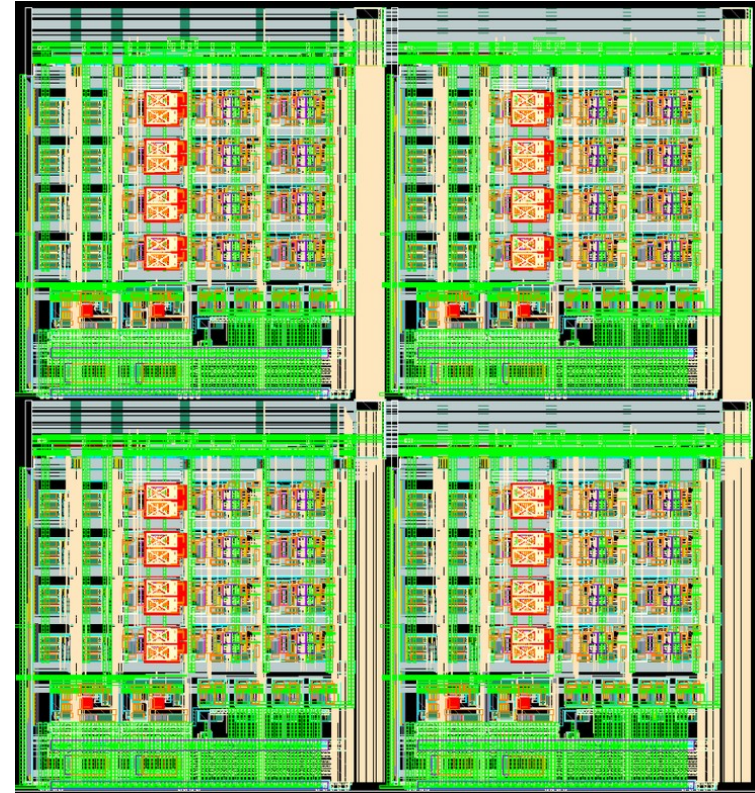
Die ersten Analogrechner-on-Chip

Akademische Projekte: Stark spezialisierte Chips, kleine Bandbreite, große statische/dynamische Fehler, geringe Softwareunterstützung



Glenn Cowan 2005

(A VLSI Analog Computer, PhD Thesis, Columbia University)



Ning Guo et al. 2016

(Energy-Efficient Hybrid A/D Approx Comp. In Continuous Time, IEEE Journal of Solid-State-Circuits)

Digitalrechner: Das „Hello World“ aus der Numerik

- 1** Will folgende Differentialgleichung (z.B. Bewegungsgleichung) lösen:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y(t))$$

- 2** Umschreibung in Integralgleichung:

$$y(t) = \int_0^t f(t, y(t)) dt$$

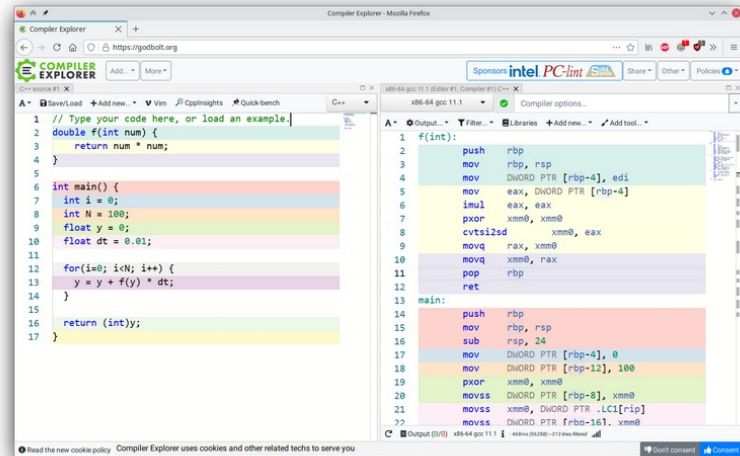
- 3** Diskretisierung

$$y_i \approx \sum_{i=0}^N f(t, y(t)) \Delta t$$

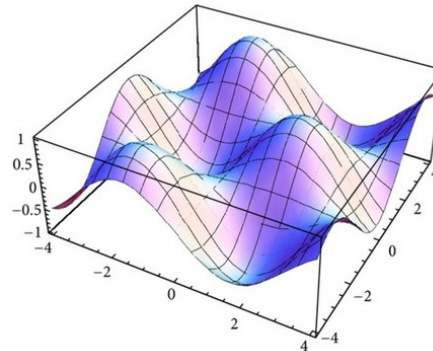
- 4** Programmierung

```
void main() {  
    int i = 0;  
    float y = 0;  
    float dt = 0.01;  
  
    for(i=0; i<N; i++) {  
        y = y + f(y) * dt;  
    }  
  
    printf(„final y = %f“,y);  
}
```

- 5** Kompilieren und laufen lassen



- 6** Auswerten



Analog rechnen: „Hello World“ aus der Elektrotechnik / Informatik

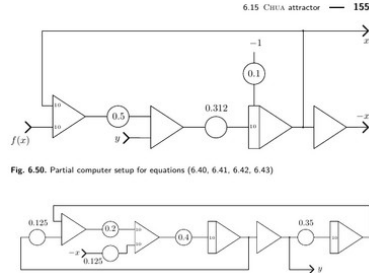
1 Will folgende Differentialgleichung (z.B. Bewegungsgleichung) lösen:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y(t))$$

2 Umschreibung in Integralgleichung:

$$y(t) = \int_0^t f(t, y(t)) dt$$

3 Auf elektrische Ersatzschaltung abbilden



4 Programmierung

```
# Chua attractor, chapter 6.15 from Bernd's book
# Below is the scaled version (equations)

x0 = const(0.1)
x1 = mult(-10, neg(sum(x, fx)))
x2 = neg(sum(y, mult(0.5, x1)))
x = neg(sum(mult(3.12, neg(int(x2, dt, 0))), x0))

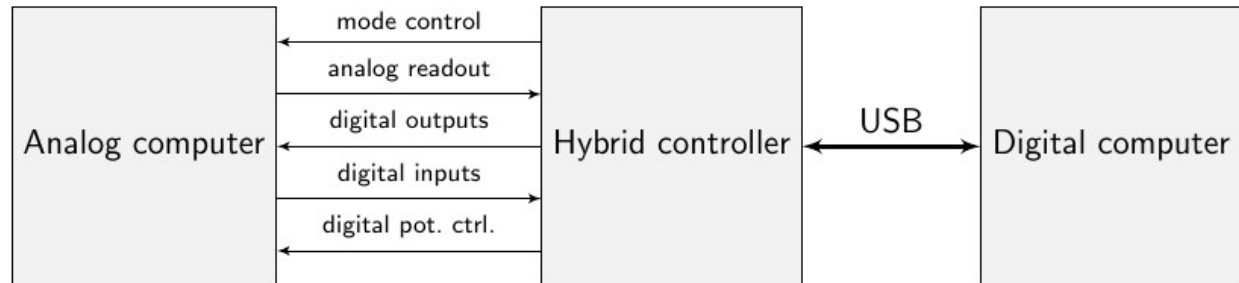
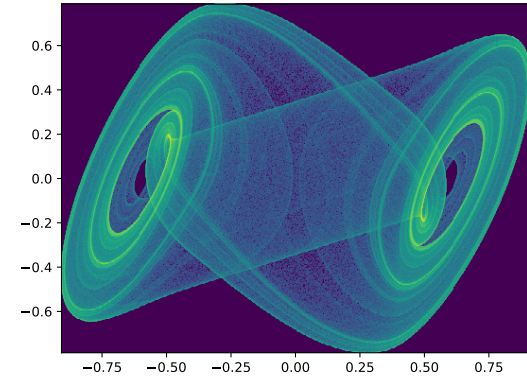
y1 = neg(sum(z, neg(mult(0.125, y))))
y2 = neg(sum(mult(1.25, x), mult(2, y1)))
y = mult(4, neg(int(y2, dt, 0)))

z = int(mult(3.5, y), dt, 0)

f1 = abs(sum(mult(0.7143, x), 0.2857))
f2 = abs(sum(mult(0.7143, x), -0.2857))
f3 = neg(sum(f1, neg(f2)))
fx = sum(mult(0.714, x), mult(0.3003, f3))

dt = const(0.001)
```

5 Laufen + Auswerten



Analogcomputer on a Chip: www.anabrid.com

anabrid - Chromium


anabrid

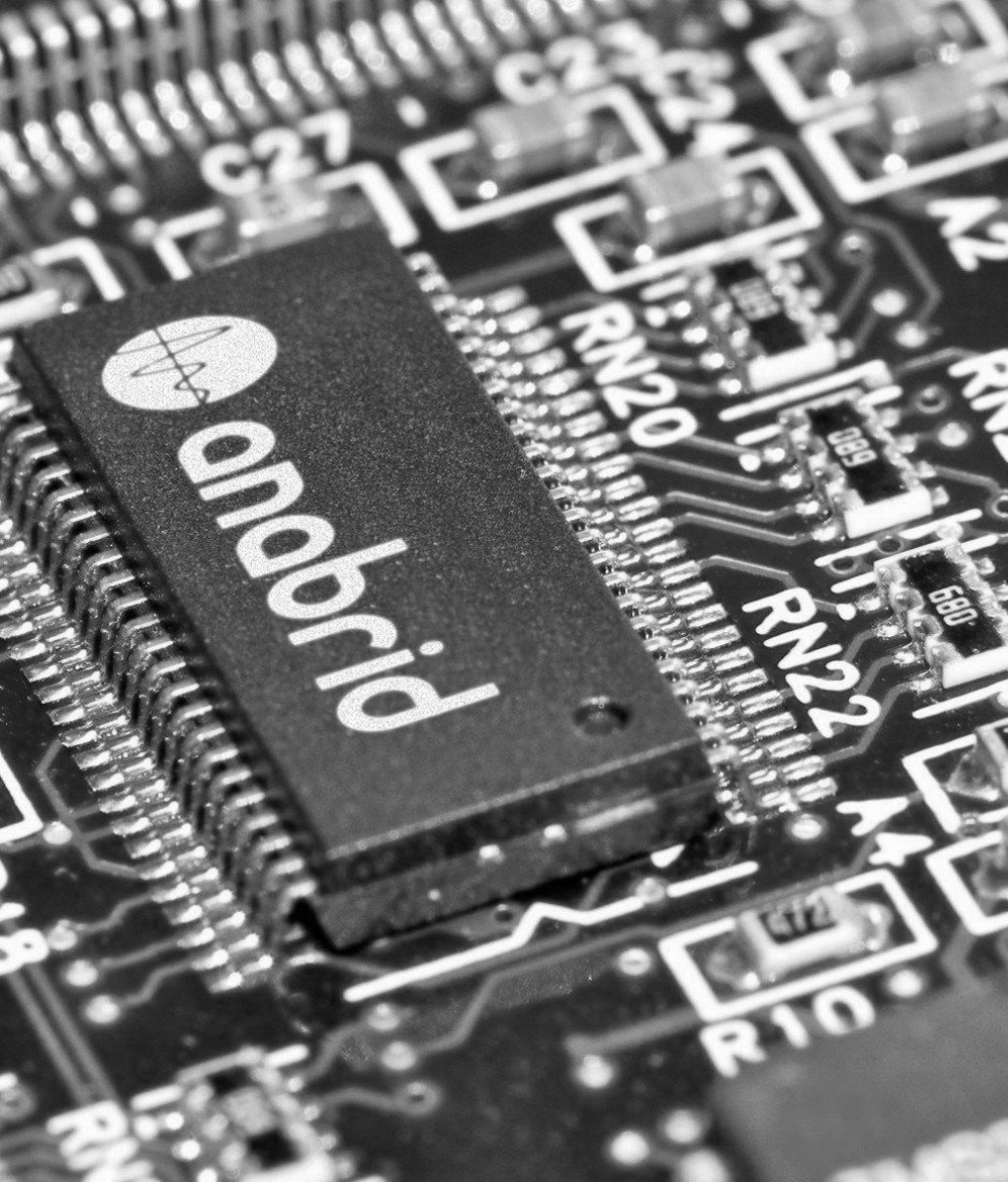
HOME INTRO APPLICATIONS R&D TEAM MEDIA CONTACT

Analog-Digital Hybrid Computing

We are ushering in a new era of high-performance computing by developing an analog computer on-a-chip.

< >





Die Zukunft ist Analog – wenn Digitalcomputern die Luft ausgeht

Dr. Sven Köppel
koeppel@anabrid.com

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

13.10.2021
Kolloquium am Fachbereich Elektrotechnik
und Informatik,
FH Münster, Campus Steinfurt



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences