

Wie hackt man einen Analogrechner

Alles über die zukünftigen
kontinuierlichen Computer

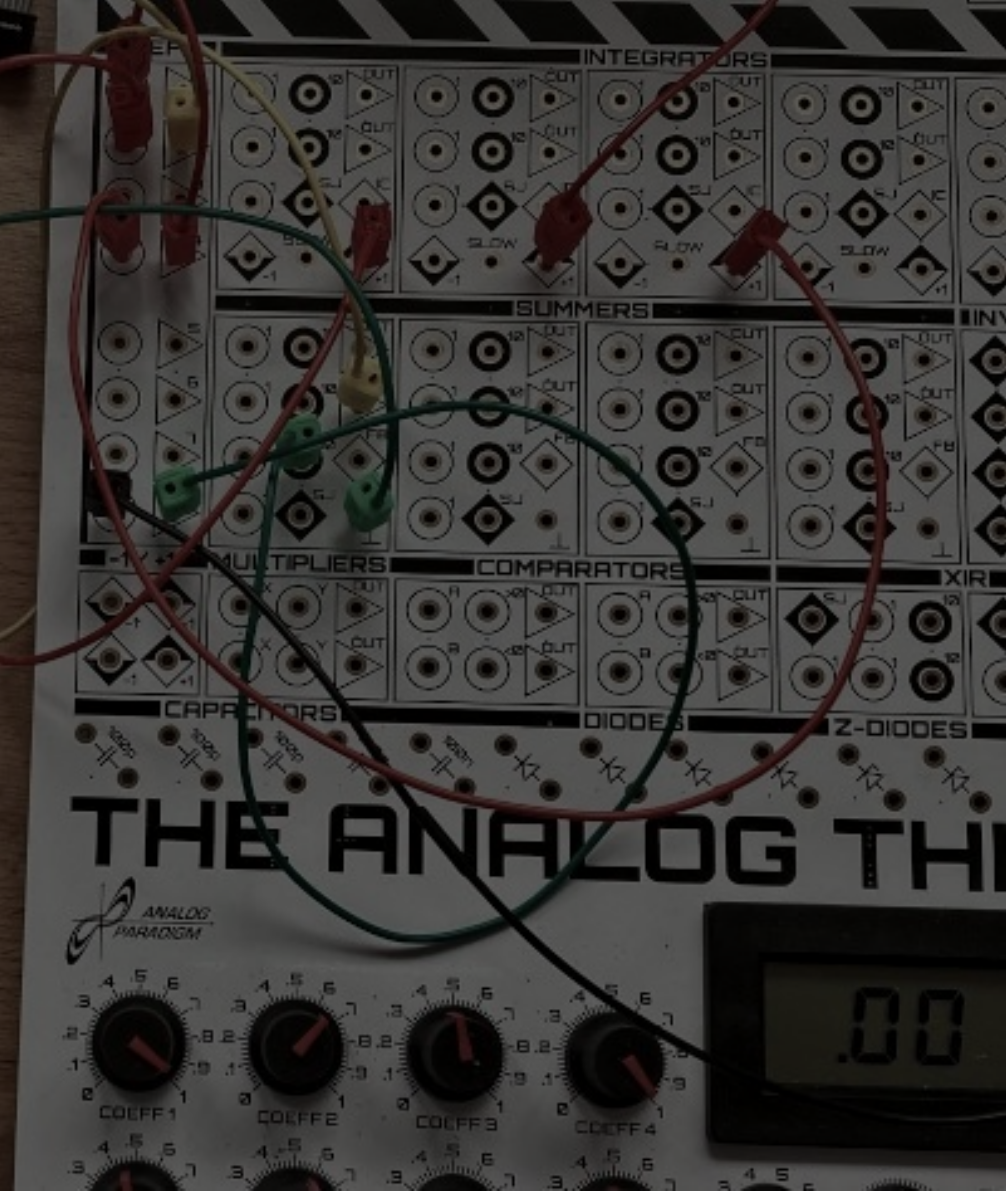
Dr. Sven Köppel
svenk@svenk.org

21.05.2022

20. Gulaschprogrammieren #gpn20

Zentrum für Kunst und Medien/Hochschule
für Gestaltung, Entropia e.V. - CCC Karlsruhe

[Picture credits: Chris Giles, Facebook]



H = 72

e = 101

l = 108

l = 108

o = 111

= 32

W = 87

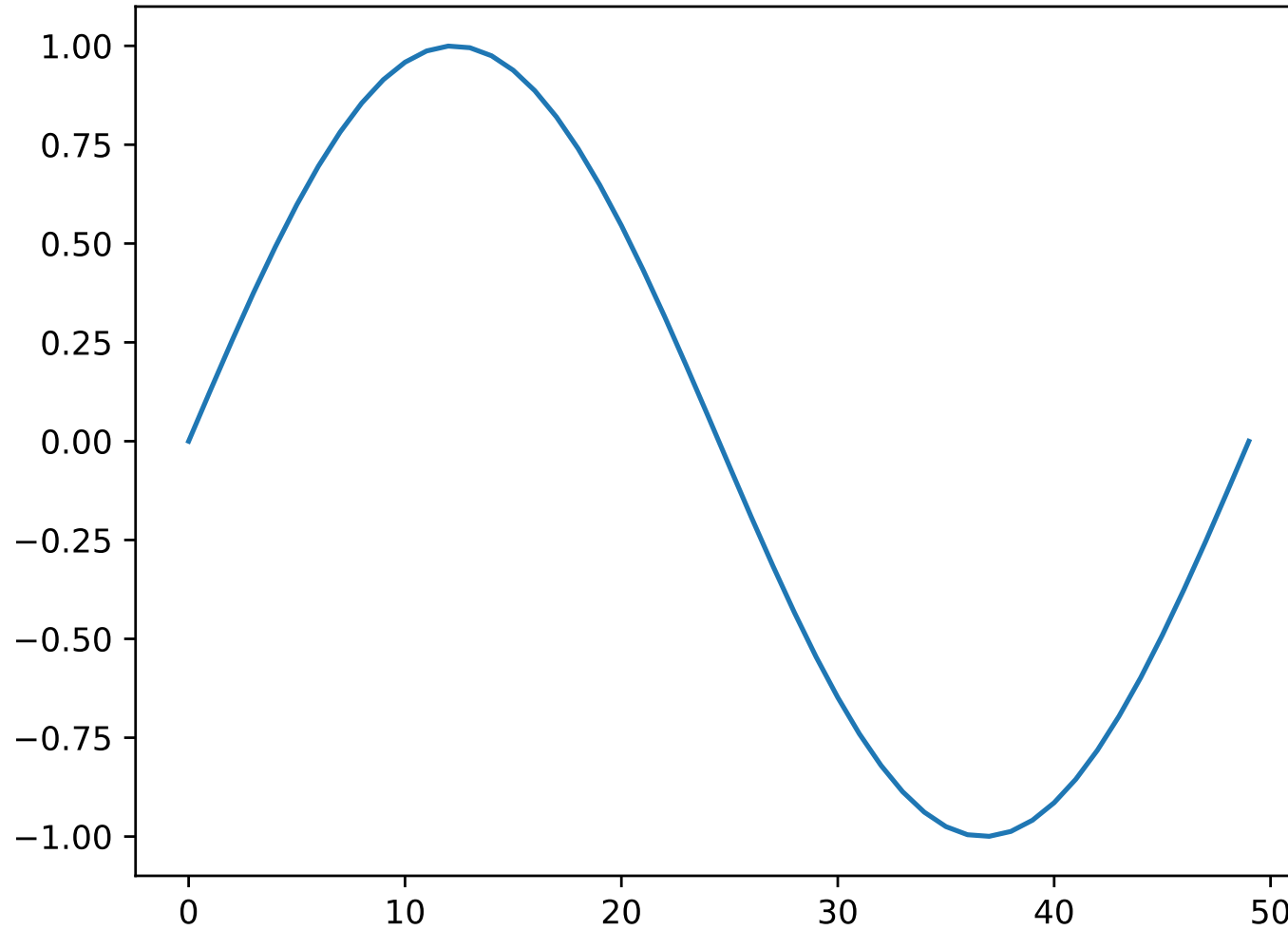
o = 111

r = 114

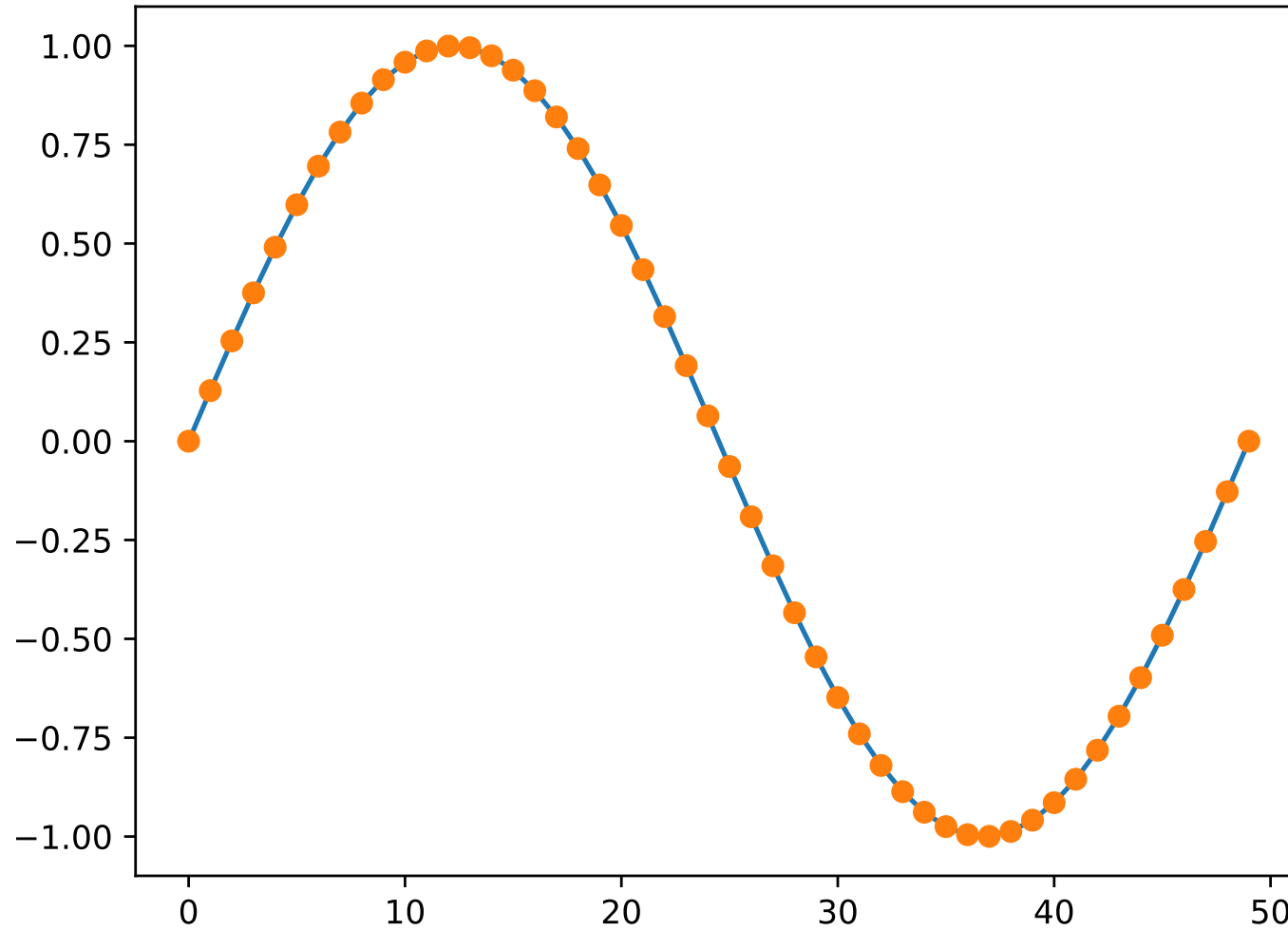
l = 108

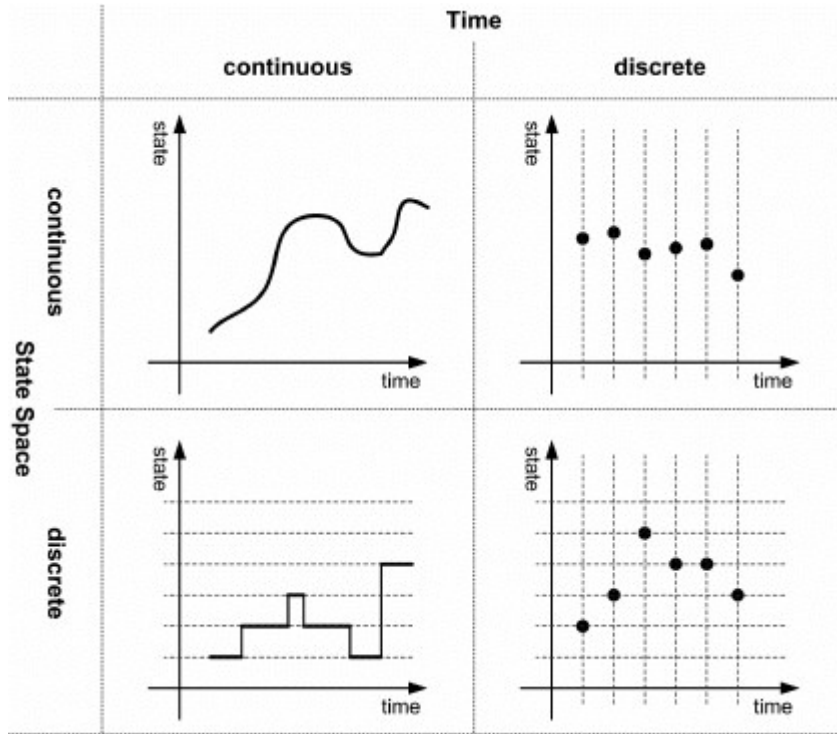
d = 100

```
plot(sin(linspace(0,2*pi)))
```

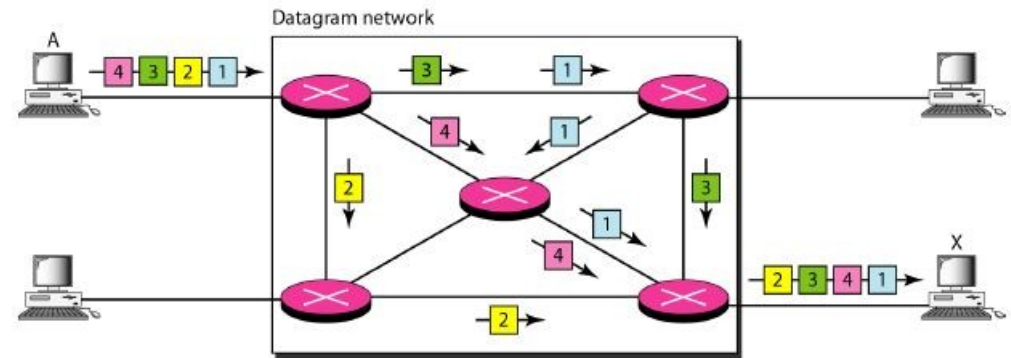
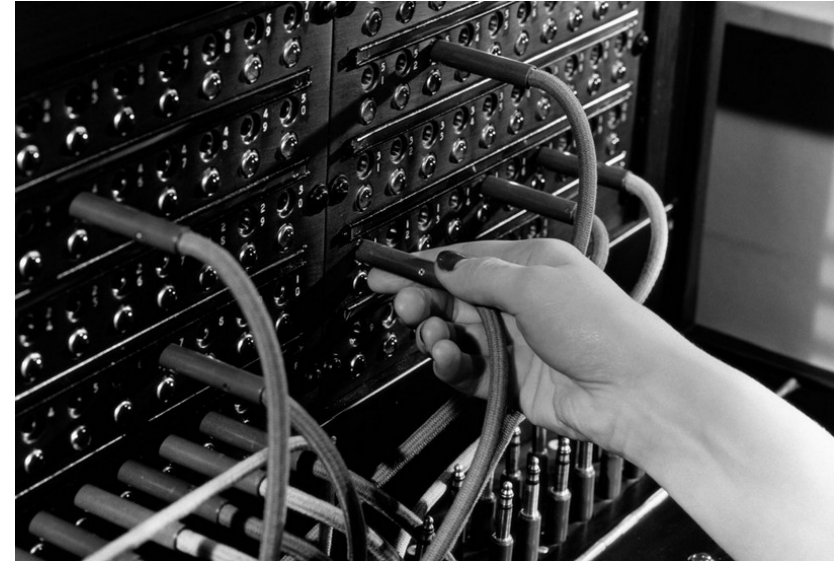


```
plot(sin(linspace(0,2*pi)), "o")
```





[10.14279/tuj.eceasst.27.385]





Klimawandel

Warum werden Computer heiss?

Landauer-Prinzip! [R. Landauer 1961]

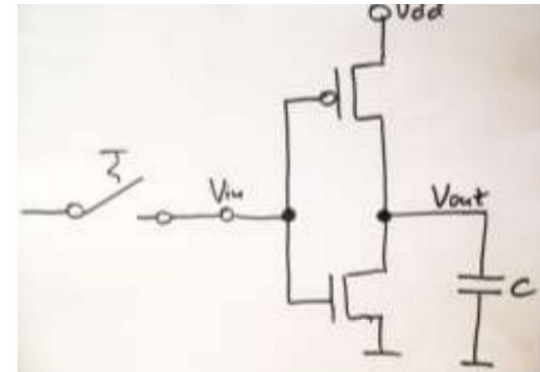
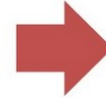
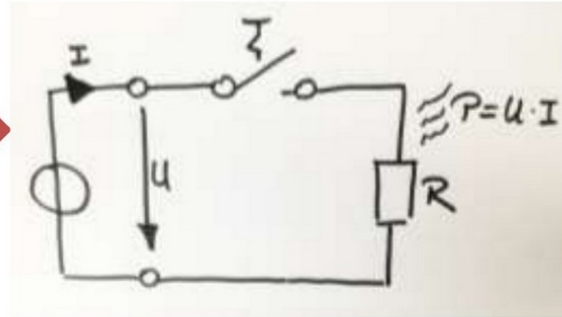
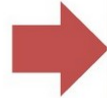
$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Signalverarbeitung}} + E_{\text{Wärme}}$$

Landauer-Limit (bei Raumtemperatur):

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

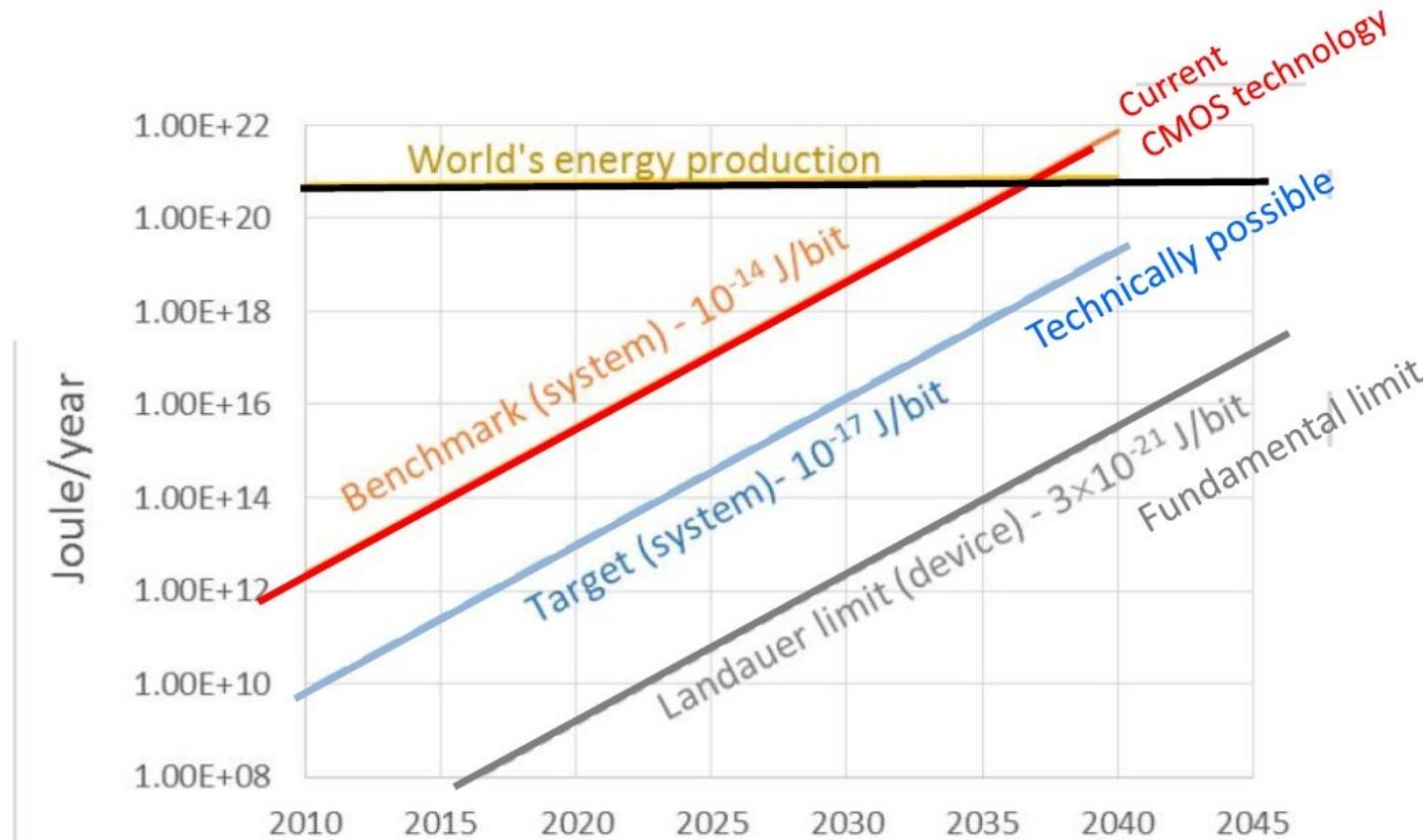


<https://www.lecker.de/wie-macht-man-das-perfekte-spiegelei-71193.html>



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

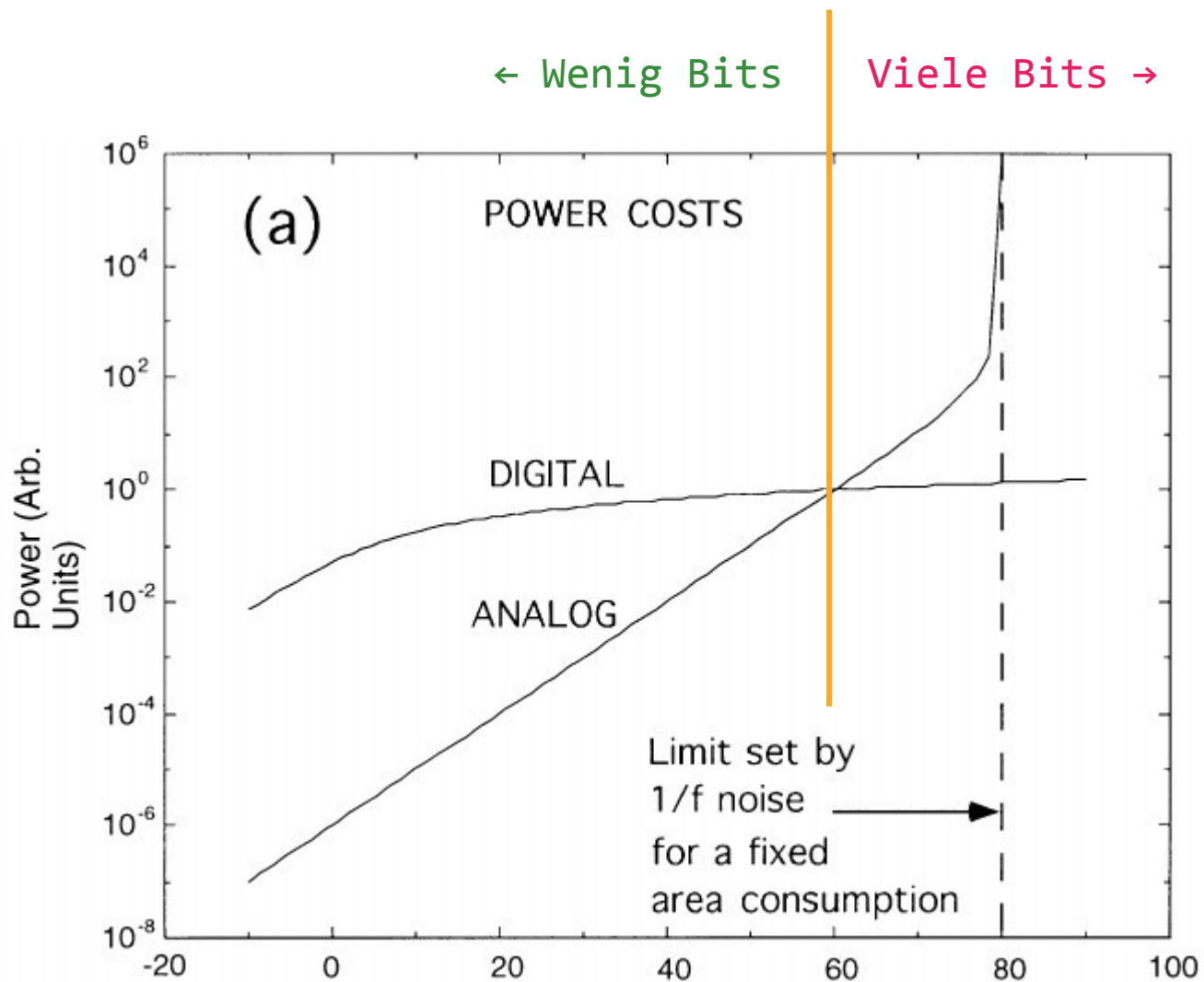
Schalten erzeugt Wärme: Und zwar global relevant viel!



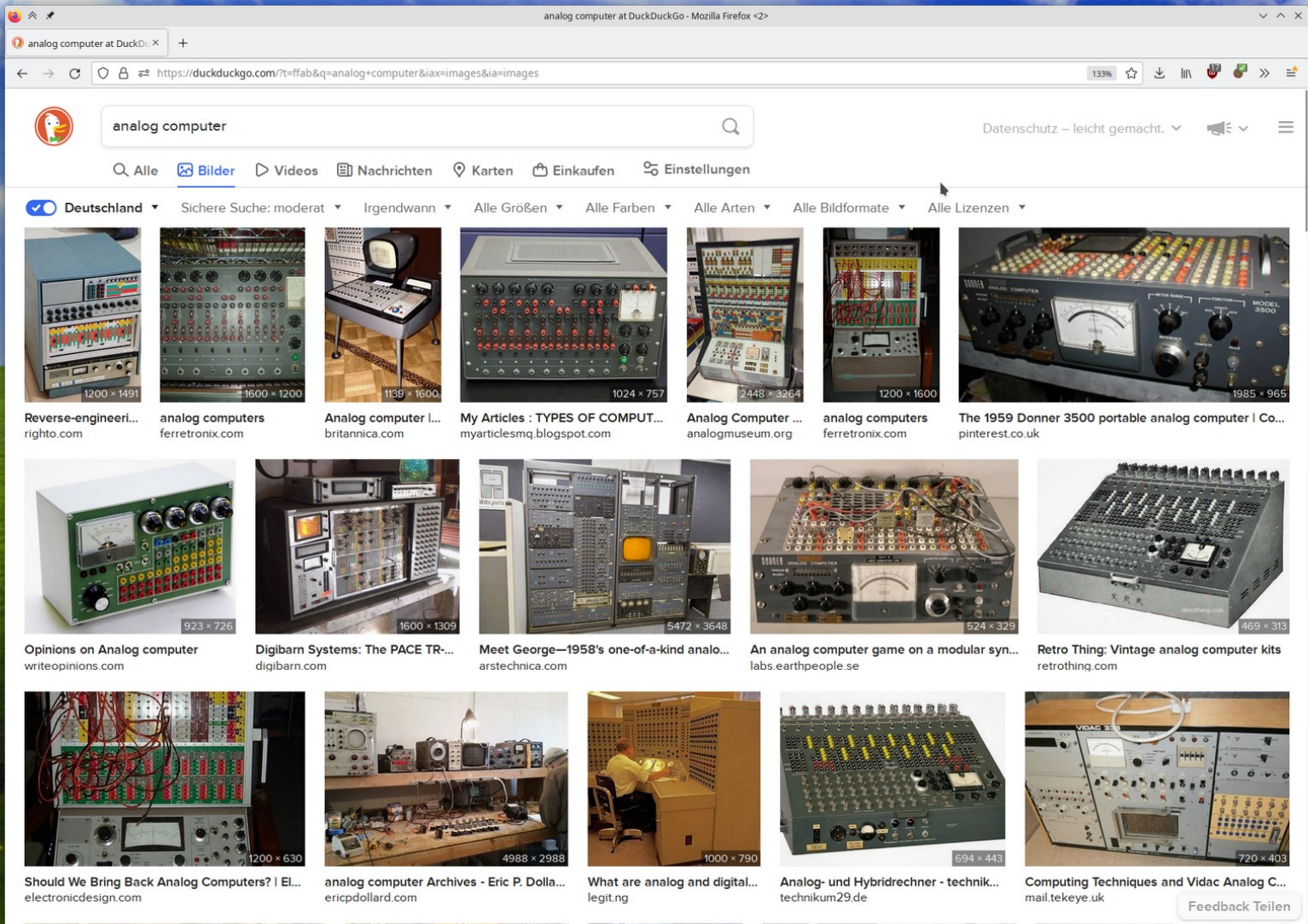
„Informations-
katastrophe“

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

Klimawandel?

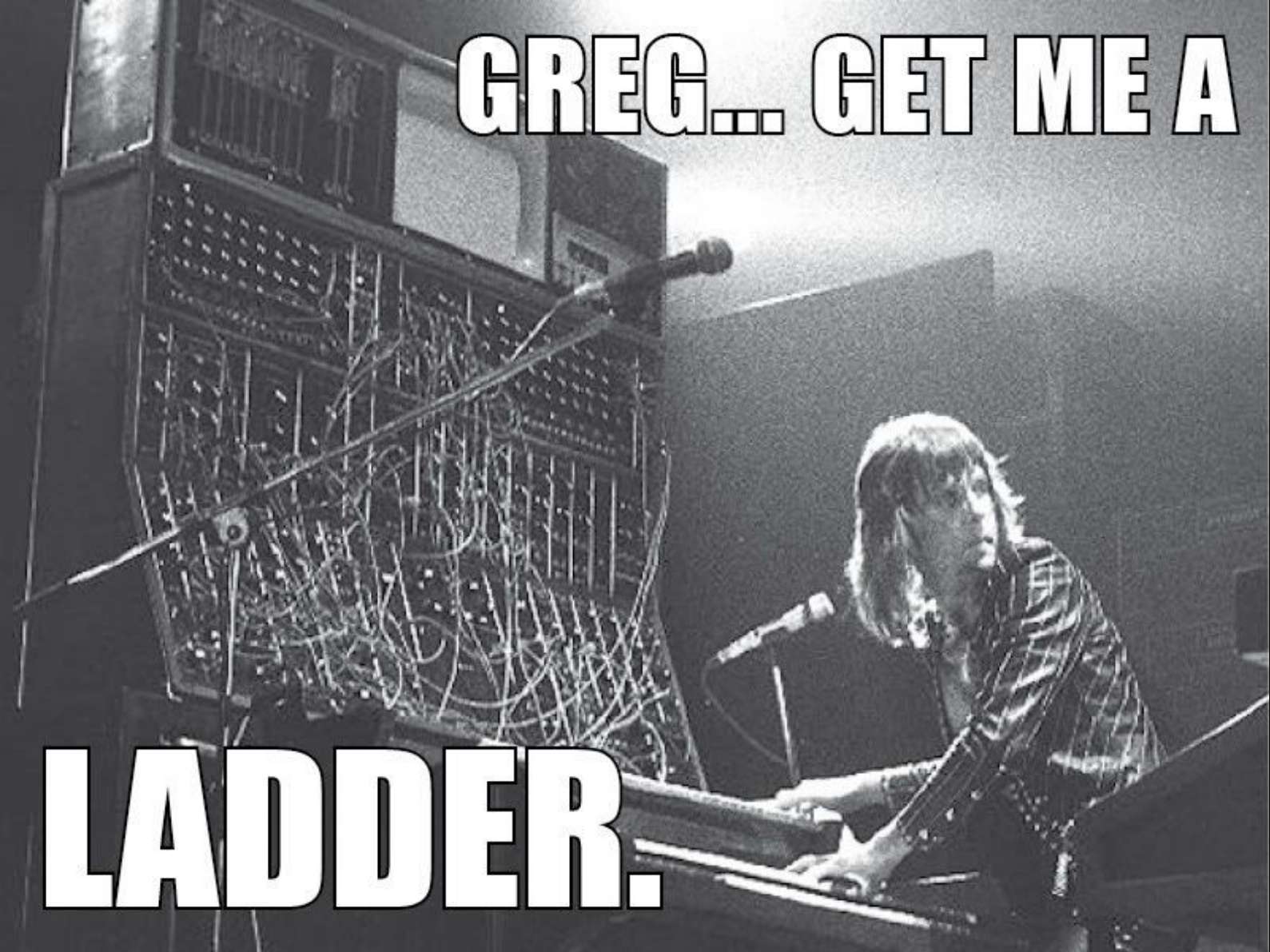






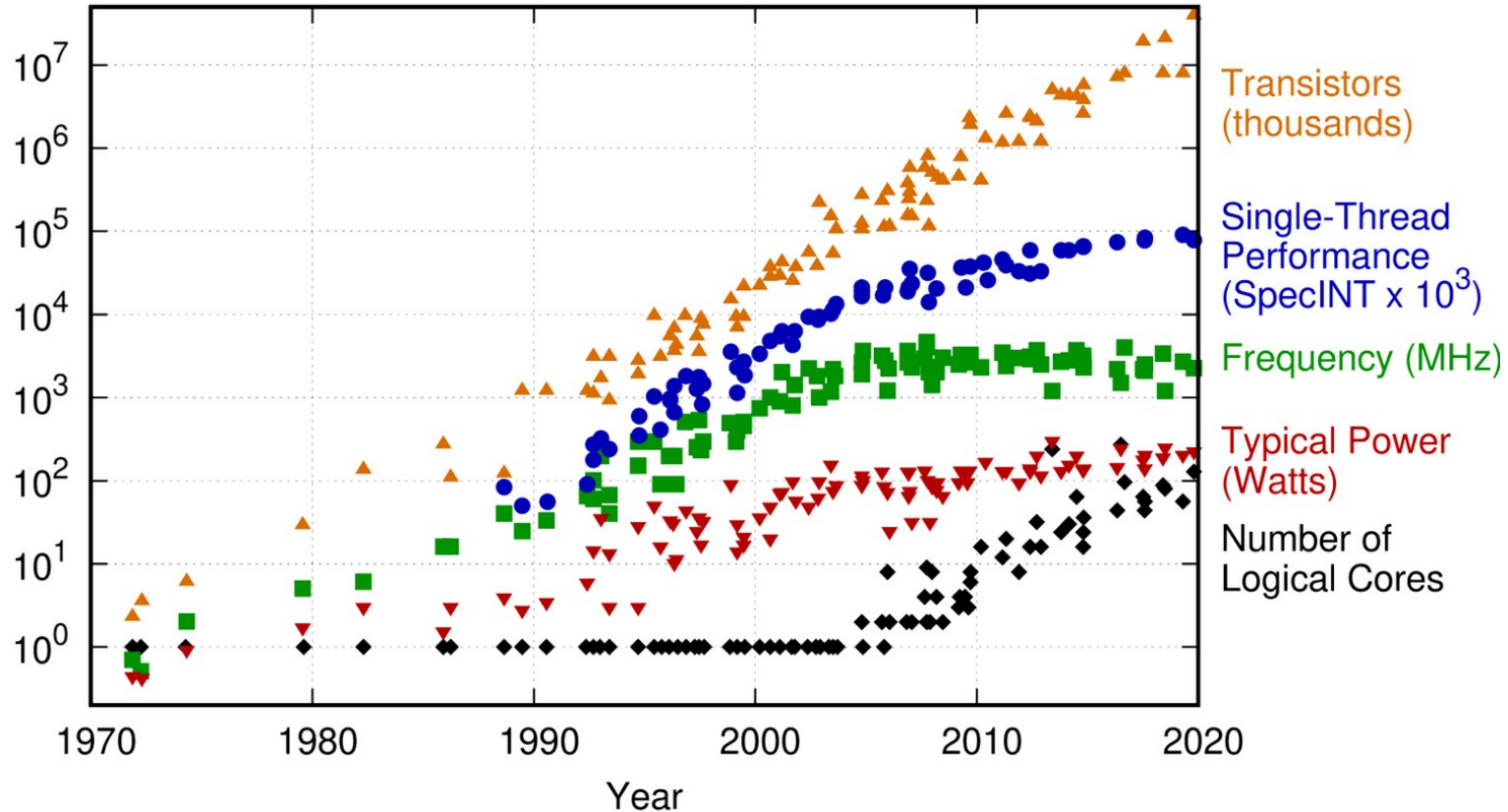
GREG... GET ME A

LADDER.



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

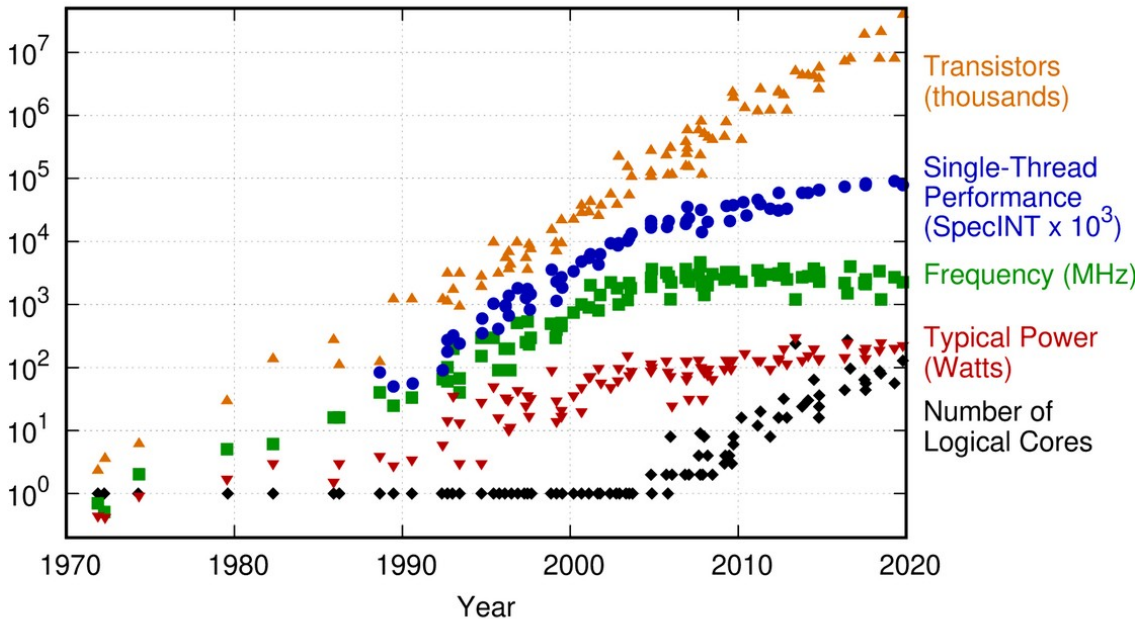
48 Years of Microprocessor Trend Data



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

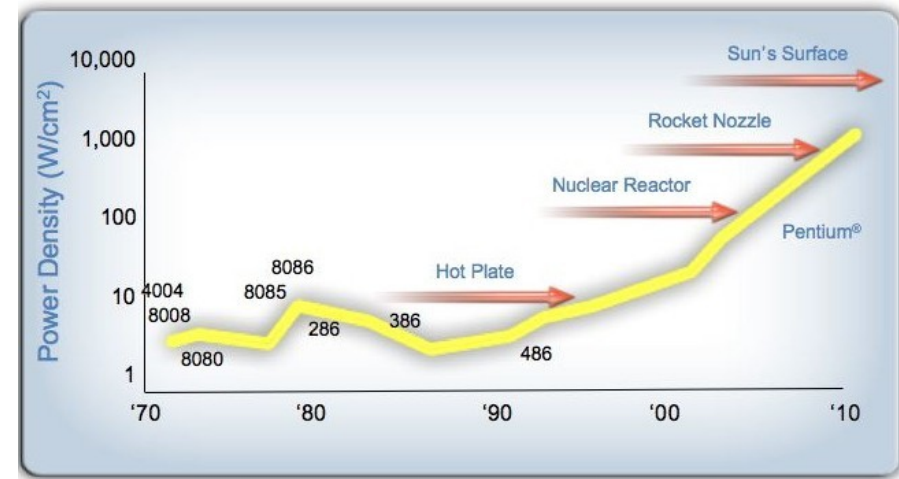
Moore's Law: Fortschritte nur noch bei Parallelisierung, nicht mehr Takt.

48 Years of Microprocessor Trend Data

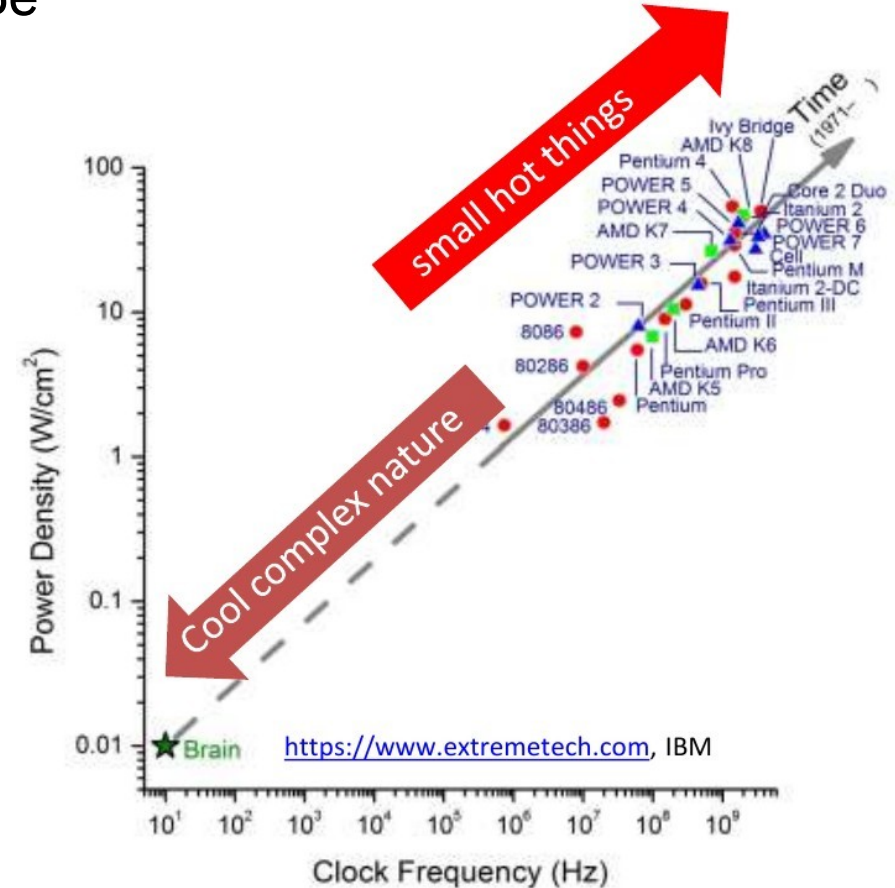
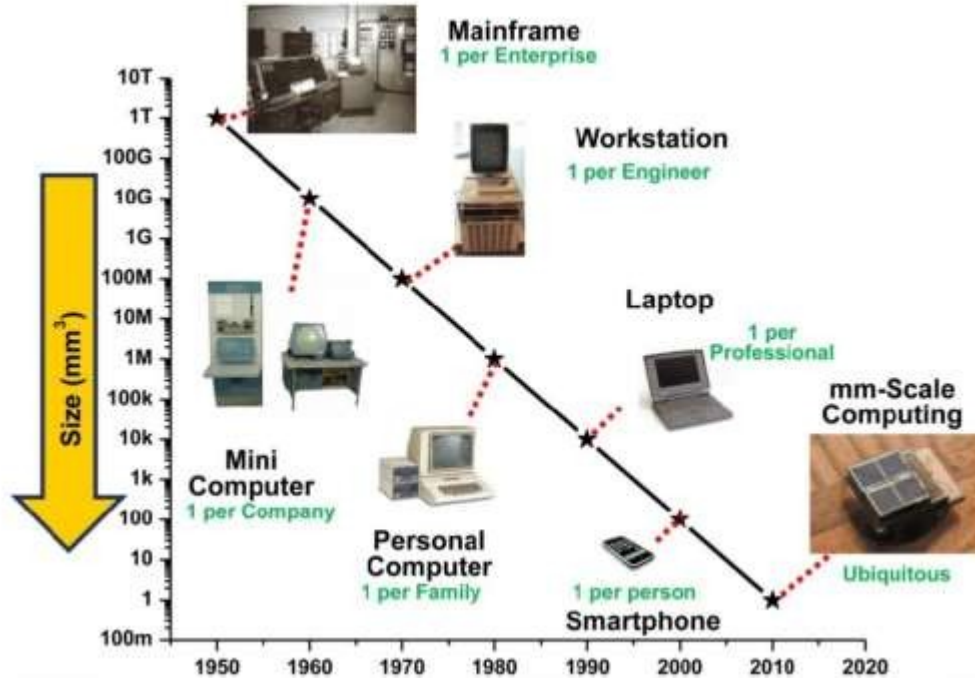


Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

„Energy barrier“

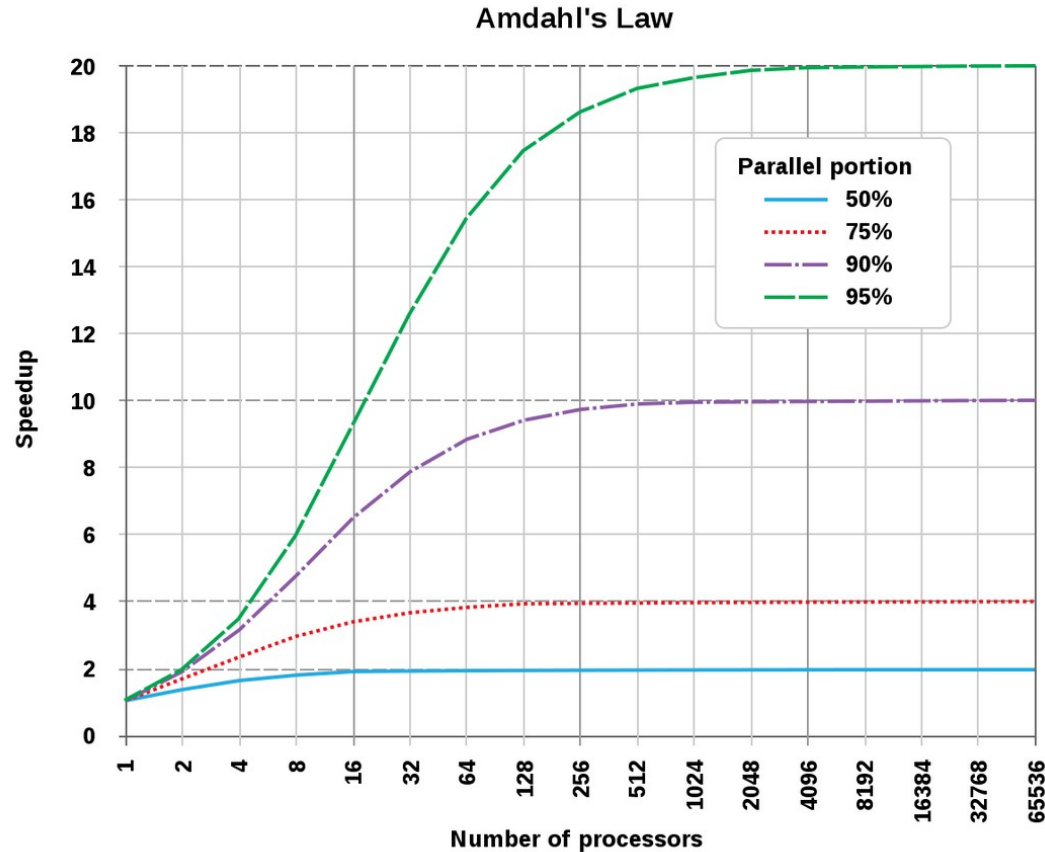


Wärmeentwicklung: Energie und Baugröße



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

Grenzen der Parallelisierbarkeit: Amdahl's Gesetz



Manycore-Architekturen und High Performance Cluster lassen Fortschritt zu.

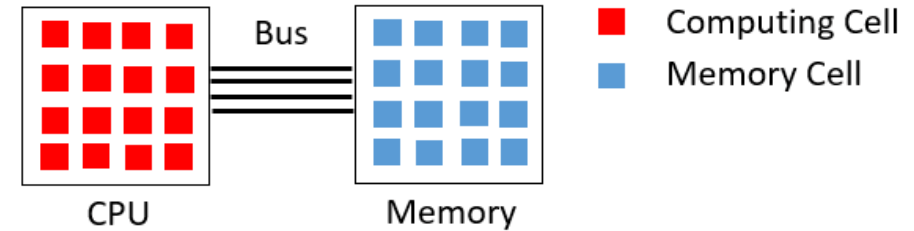
Doch der energetische Preis dafür ist sehr hoch!

Bei 95% Parallel portion:

3000 x Computer (Leistung)
aber nur 20 x Speedup

Digitale Architekturen: Zusammenfassung

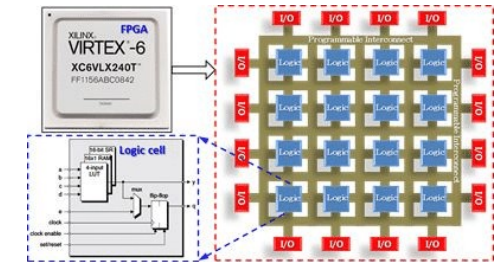
- **Energiebarriere:** Takt kann nicht schneller werden.
- **Amdahls Gesetz:**
Parallelisierbarkeit hat Grenzen.
- **Von Neumann-Flaschenhals:**
Konventionelle
Computerarchitektur begrenzt
Leistung.



Digitale Alternativen, zB.



GPGPUs



FPGAs

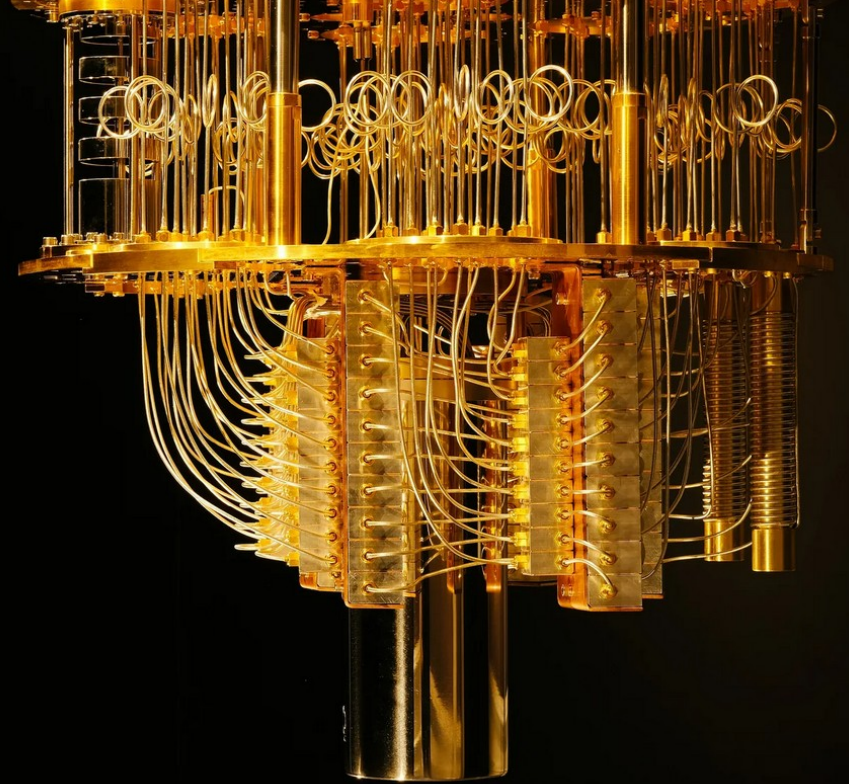
Exotic Computing:

Grundlagenforschung

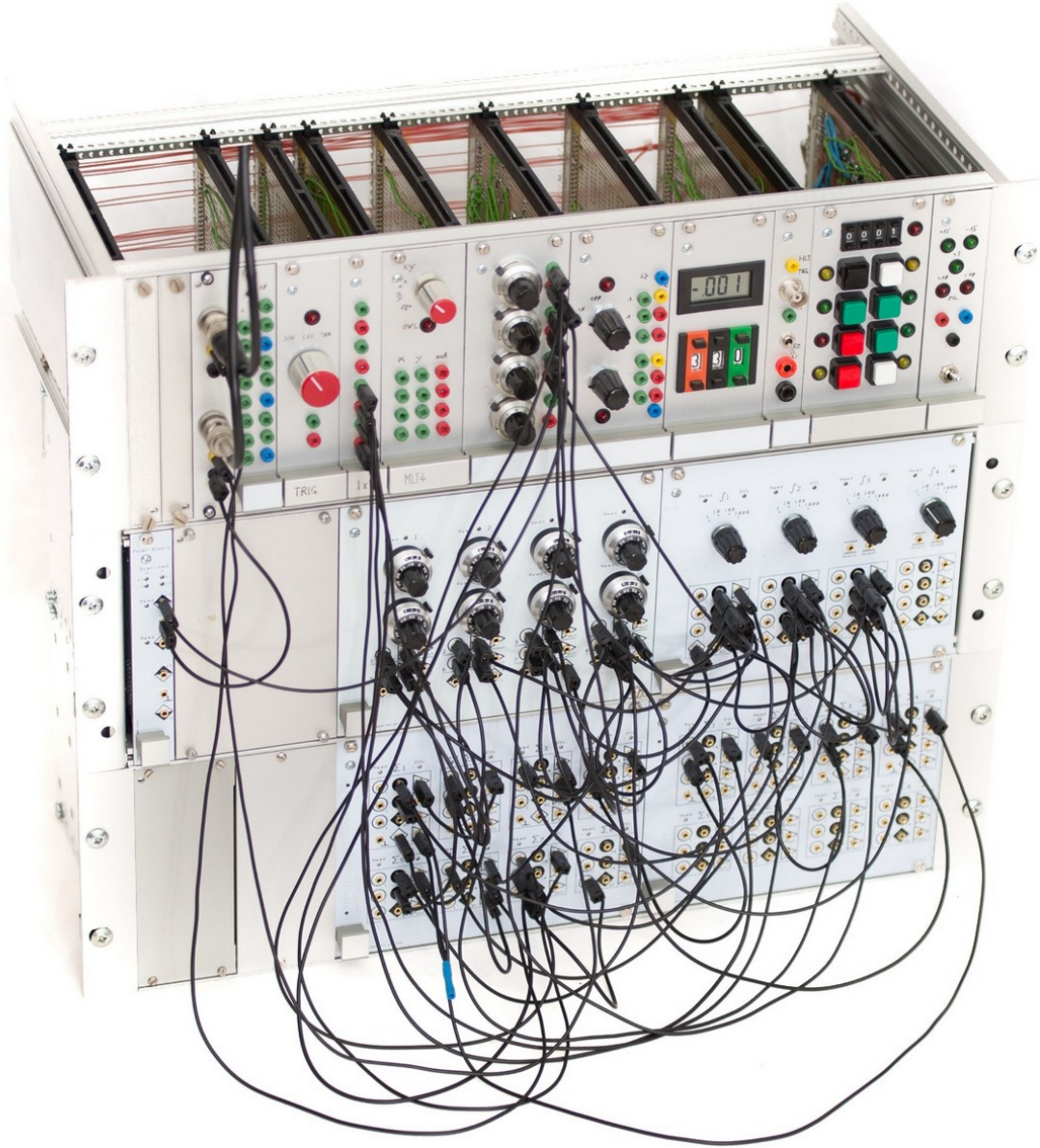
- Spintronik, Photonisches Rechnen
- Quantencomputing
- Neuromorphic Computing (AI)
- Memristoren, Computational Memory
- Klassisches Analogrechnen

Viel Materialforschung

Viele interdisziplinäre Verbindungen



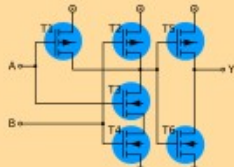
IBM Q System One



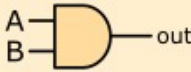
Die Rückkehr des Analogrechners

- 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.

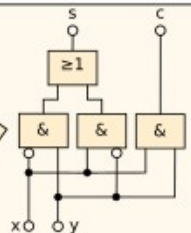
Elektrische Analog- und Digitalrechner nutzen Transistoren grundsätzlich anders



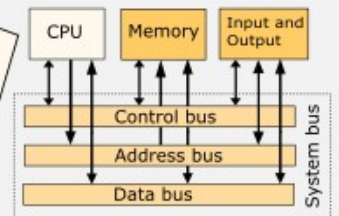
Ein logisches Gatter arbeitet mit Spannung/Strom an/aus. Eine Leitung trägt 1 Bit Information.



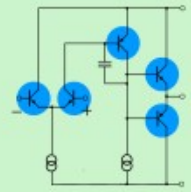
Gatter implementieren die Bool'sche Algebra und sind die Grundbausteine des Digitalrechners.



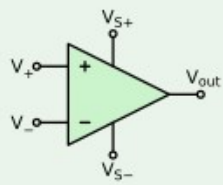
Aus Gattern kann man beliebig große arithmetische Rechenelemente bauen, die z.B. Ziffer für Ziffer addieren.



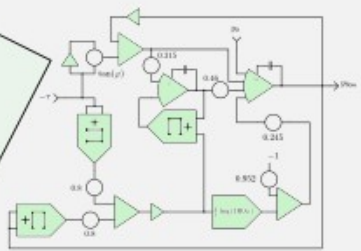
So entsteht der klassische Digitalprozessor, der Schritt für Schritt arbeitet.



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

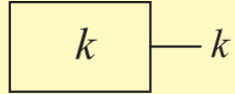


Der Operationsverstärker ist der Grundbaustein des Analogrechners und kann viele elementare Rechnungen durchführen. Er arbeitet mit kontinuierlichen Größen, instantan und ohne Takt und verbraucht dabei sehr wenig Energie.

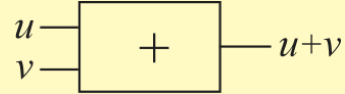


So entsteht der Analogrechner, der datenflussorientiert eine Aufgabenstellung löst.

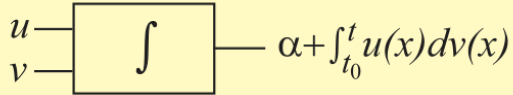
Bausteine des Analogrechners! The General Purpose Analog Computer



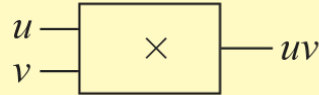
A constant unit associated to



An adder unit



An integrator unit



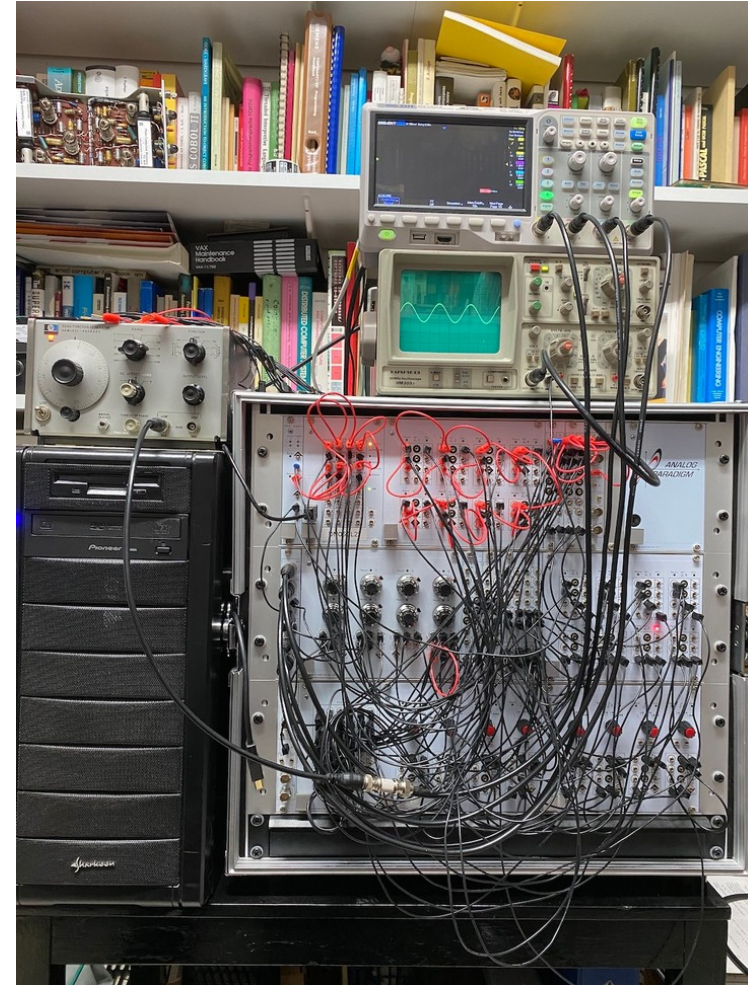
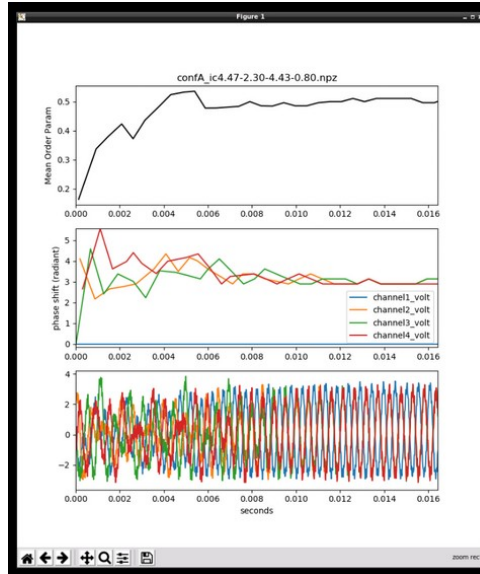
A multiplier unit

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**



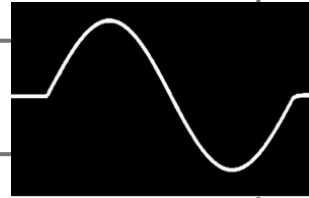
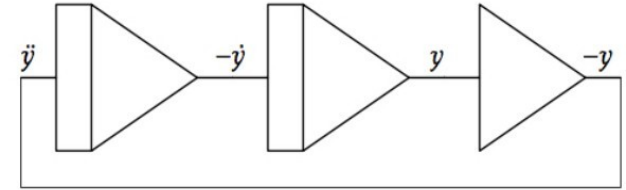
Analogrechnen: Ein Beispielprogramm

Harmonischer Oszillator:

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

Umschreiben zu:

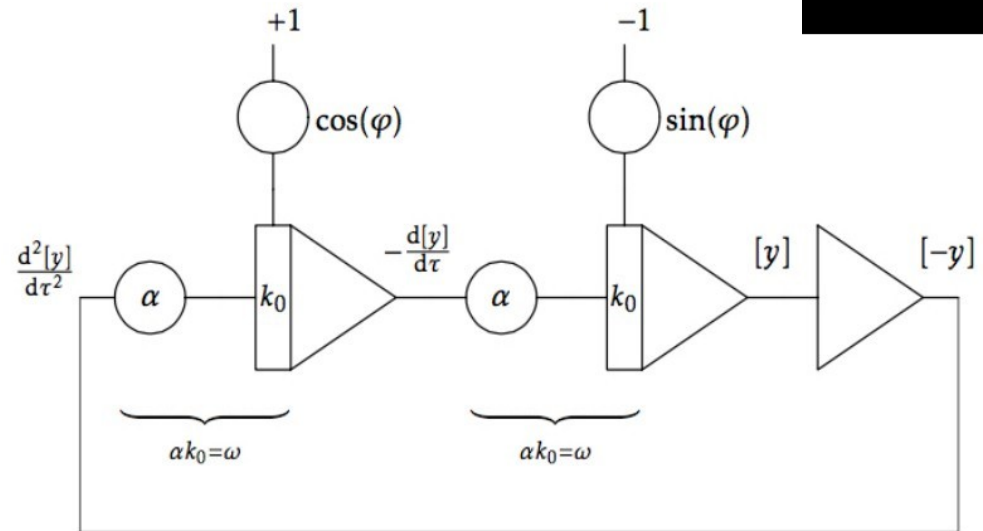
$$\ddot{y} = -y \quad (\text{mit } \omega = 1)$$



Mit Anfangswerten und Allgemein:

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

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



Anwendungen

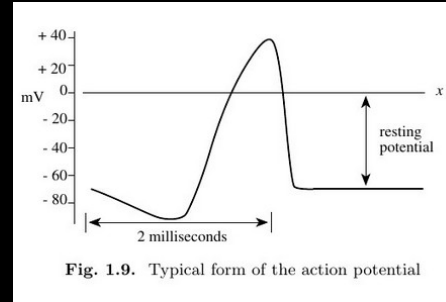
die von Analogrechtern profitieren würden

Anwendungen

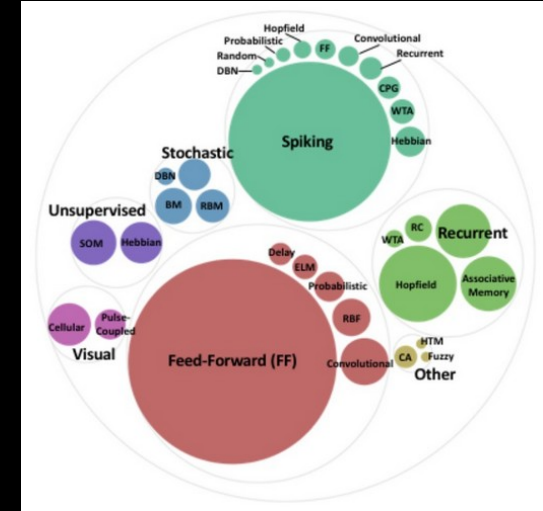
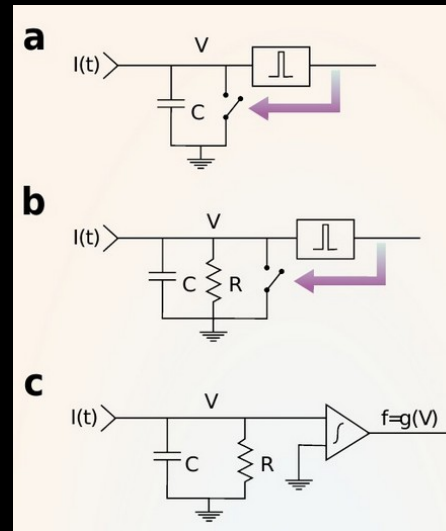
Artificial Intelligence



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



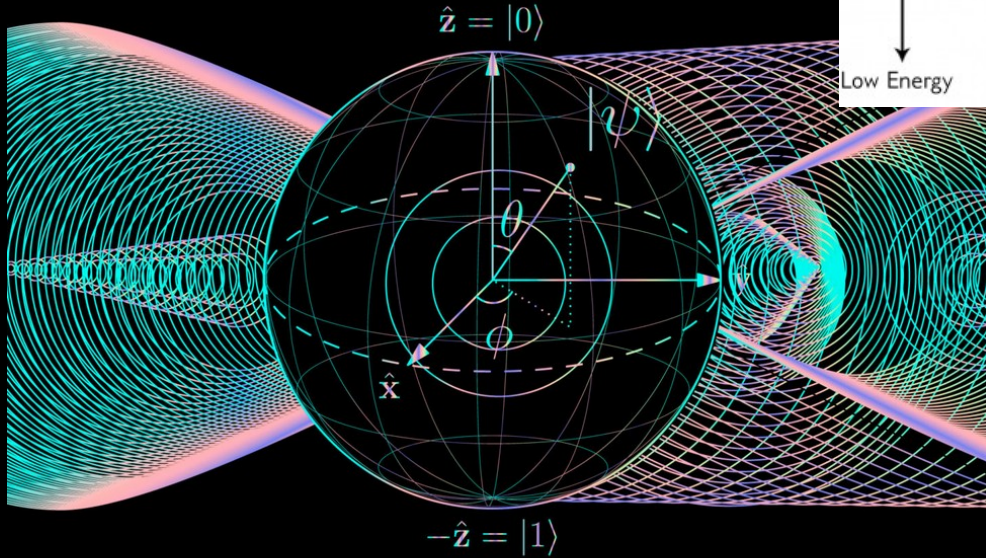
Rojas: Neural Networks (Springer 1996)



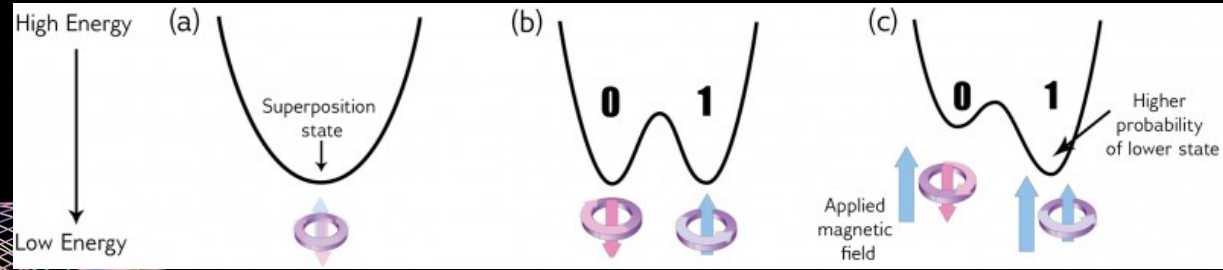
A survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware, [arXiv:1705.06963]

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

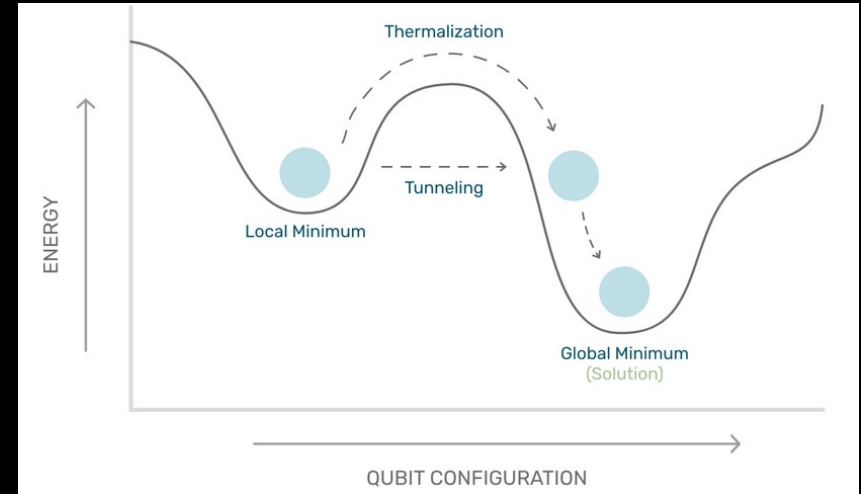
Anwendungen Quantum Computing



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]

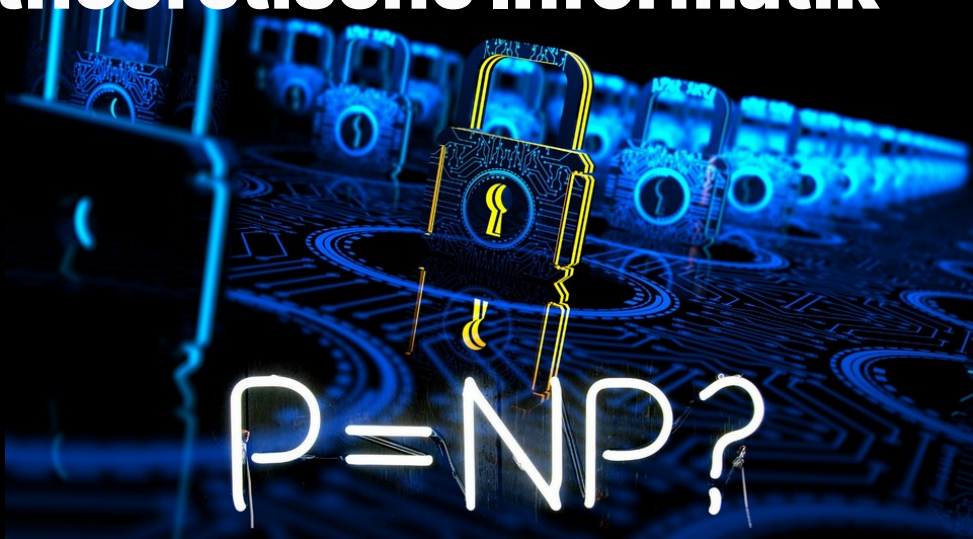


Quanten-Annealer [Bildquelle: miro.medium.com/max]

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

Anwendungen

Verschlüsselung und theoretische Informatik

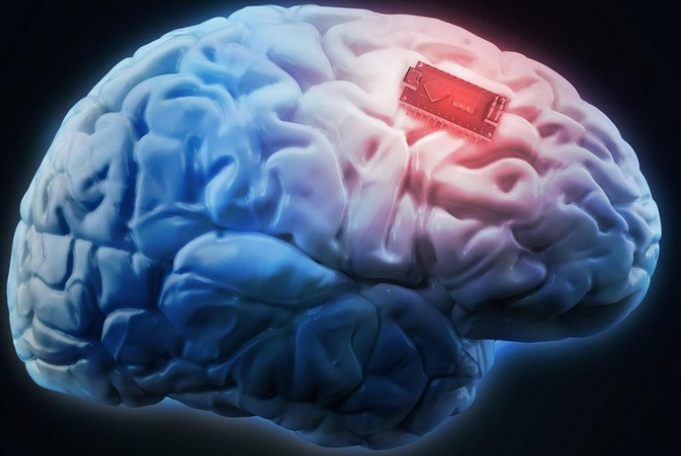


Analogrechner können möglicherweise
effizient **kombinatorische Probleme lösen**
und Pre-Quantum **Verschlüsselung**
knacken.

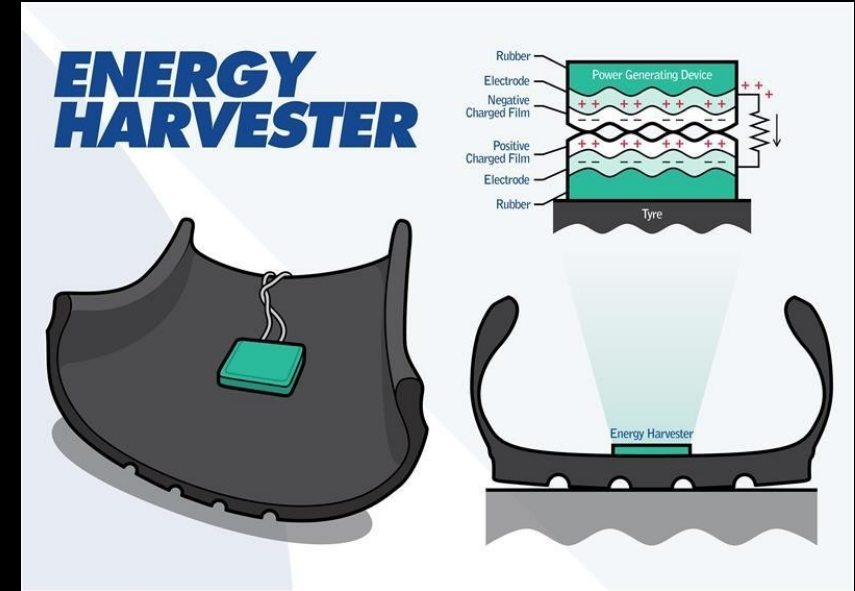
→ Hava Siegelmann: Computation
beyond the Turing Limit (Science 1995)

Anwendungen

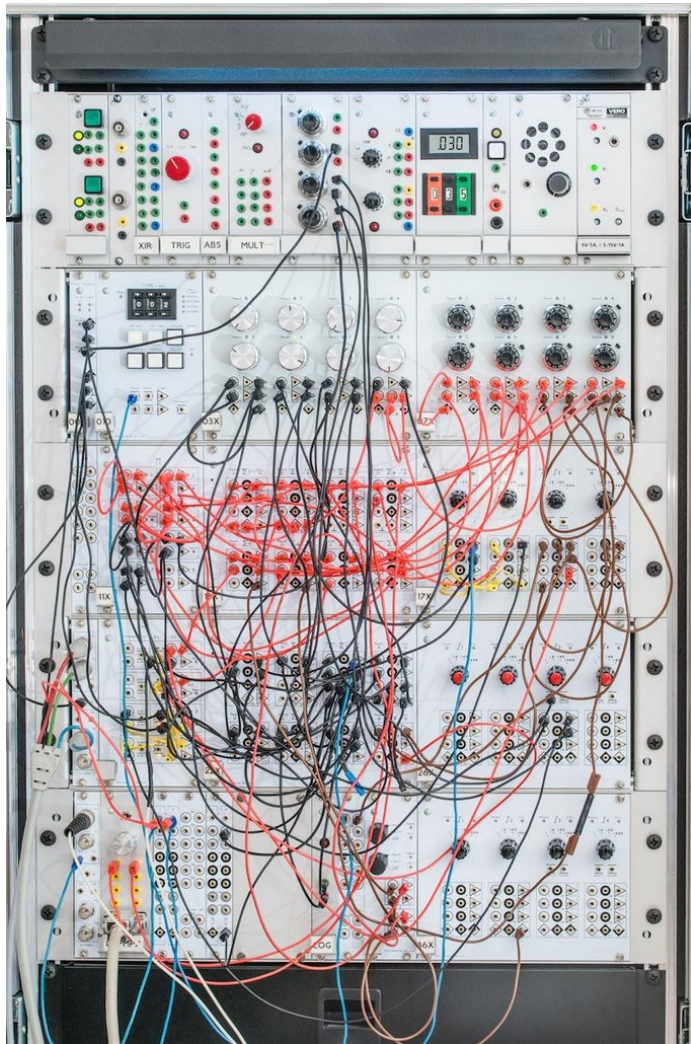
Wearables und Implantate



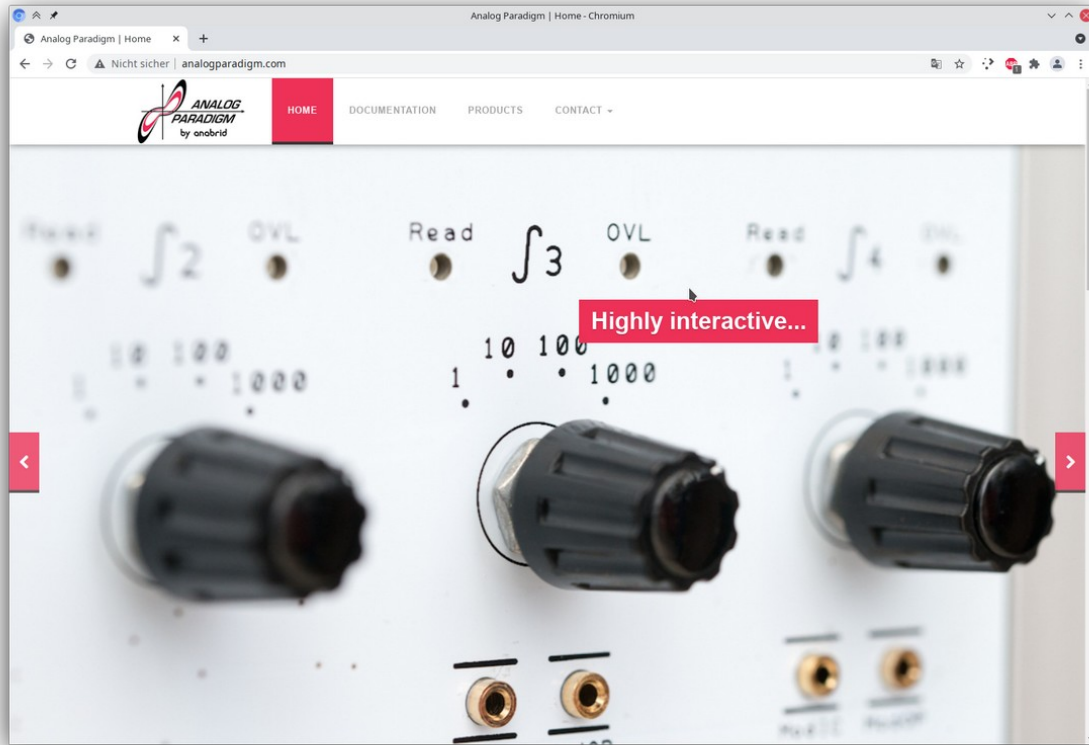
Analogrechner eignen sich für **herausfordernde** oder **schnelle Rechnungen** bei **wenig Energieverbrauch** benötigt werden. Analogrechner werden hier einen nachhaltigen Einfluss haben.



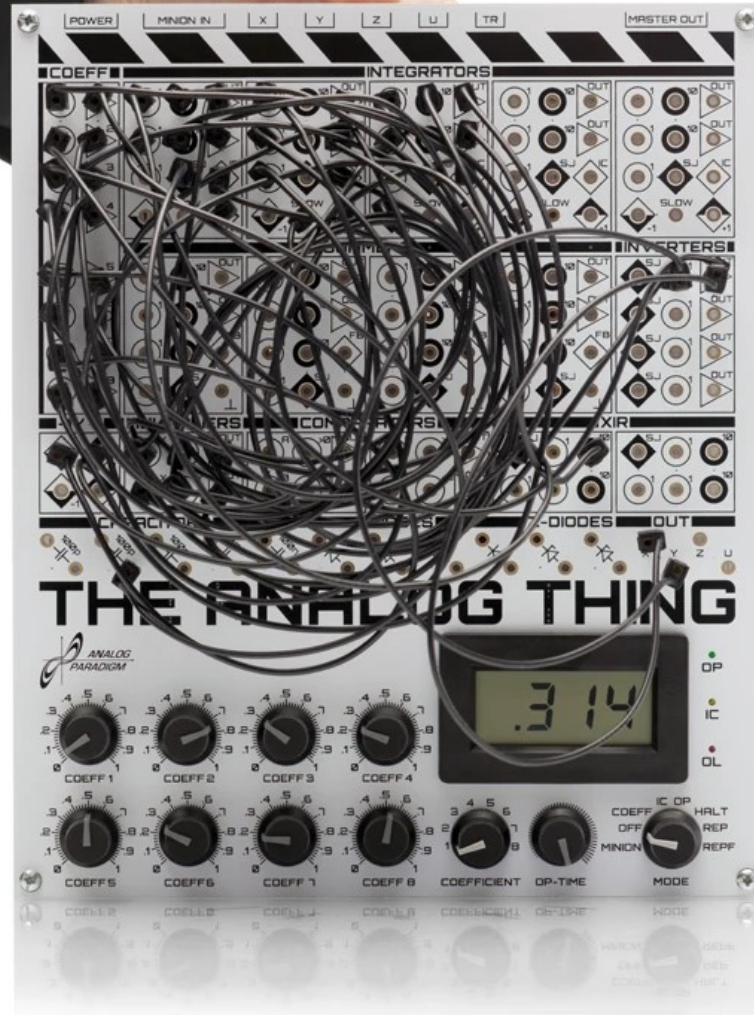
[Bildquelle: markallengroup.com]



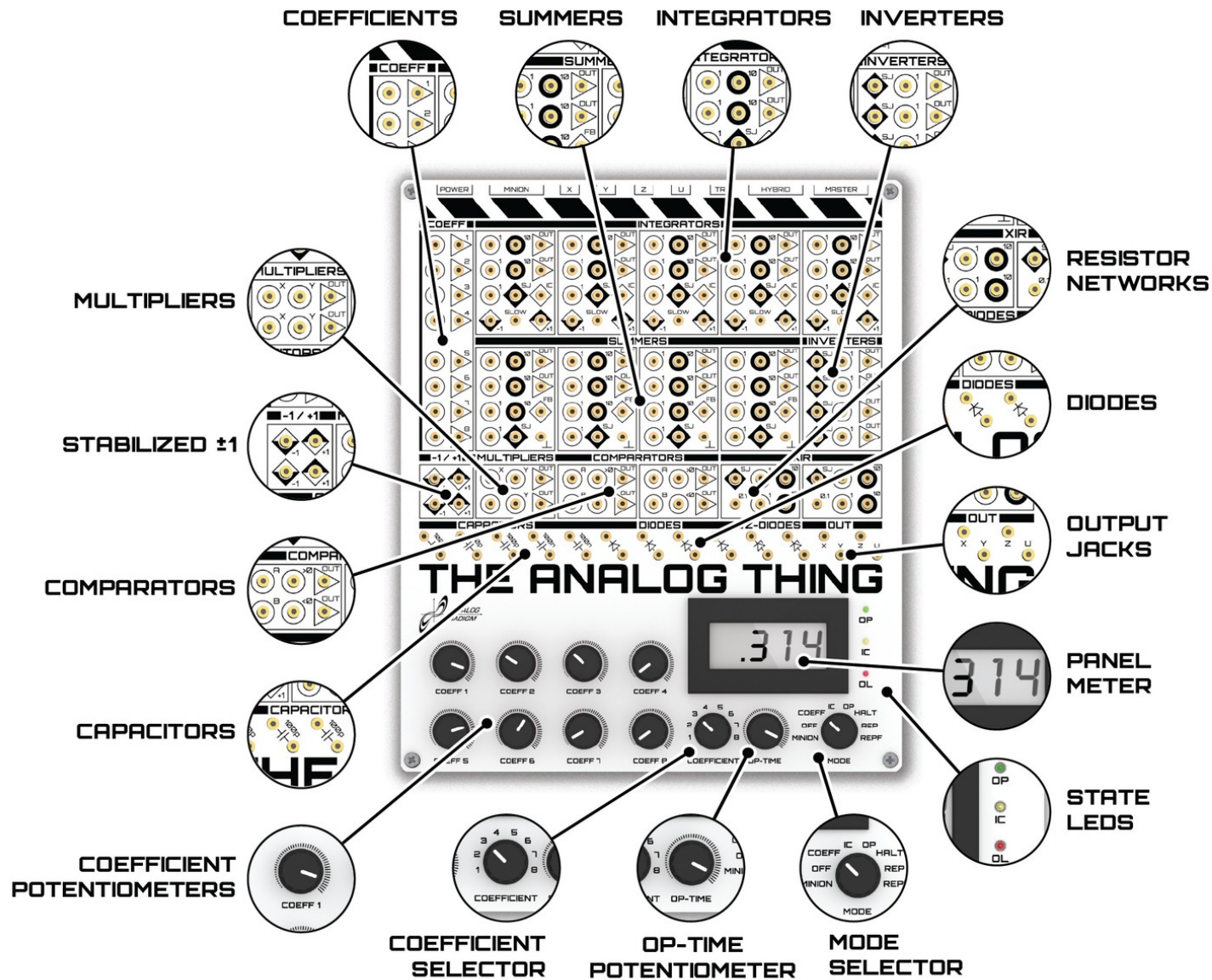
Über uns: www.analogparadigm.com



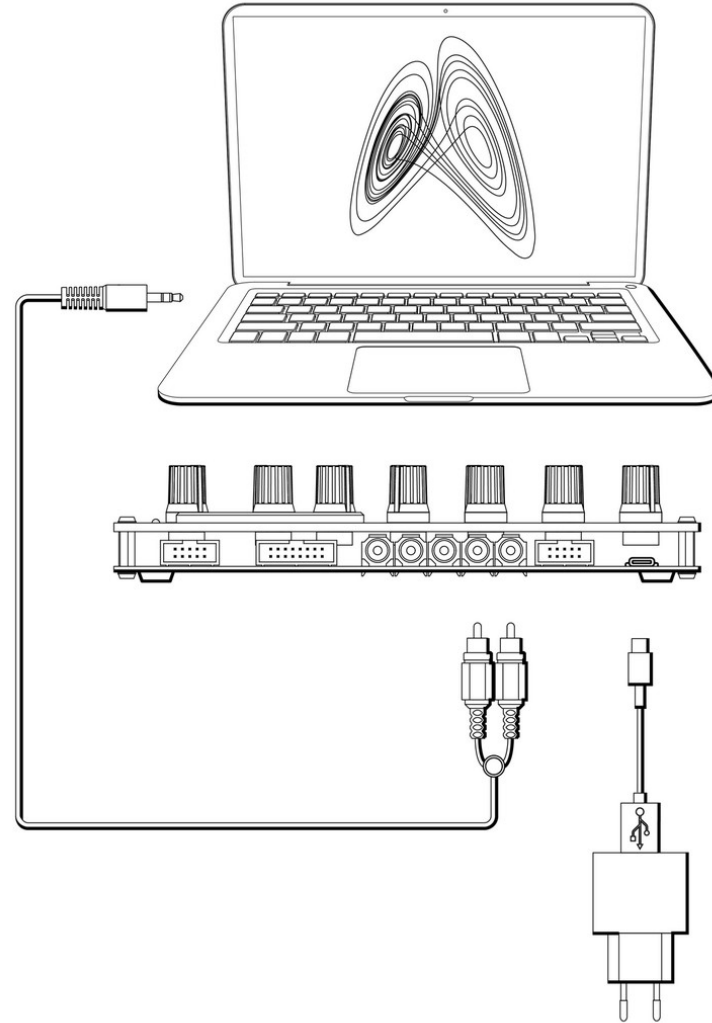
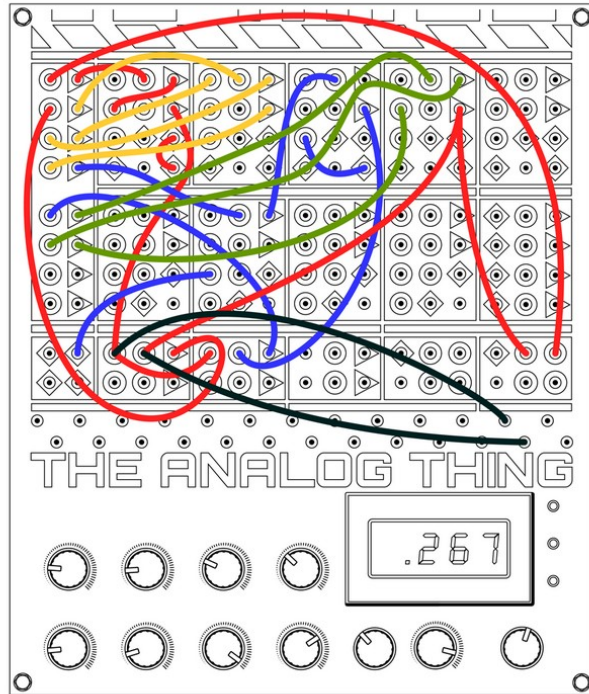
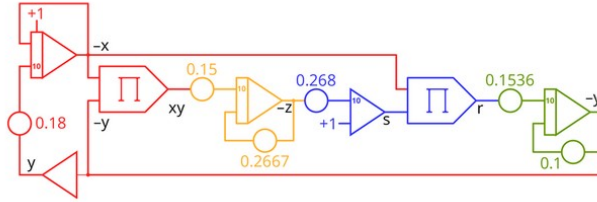
The Analog Thing

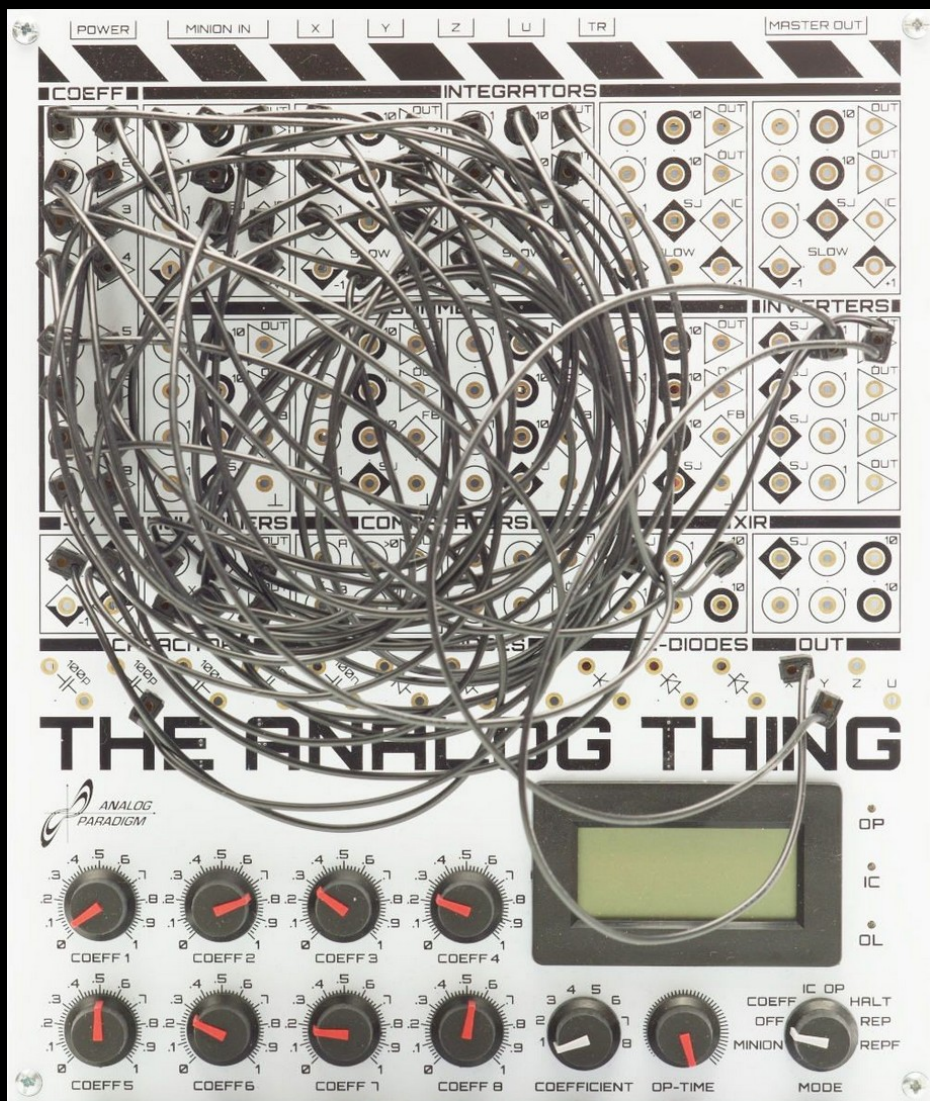


- Erschwinglicher Rechner für **Ausbildung und Lehre**.
- **Open Source-Hardware** soll zum Basteln einladen.
- Einfache Schnittstellen an **Arduino, Raspberry Pi**, etc.
- Start **ohne Laborequipment** möglich (dank Soundkarte)



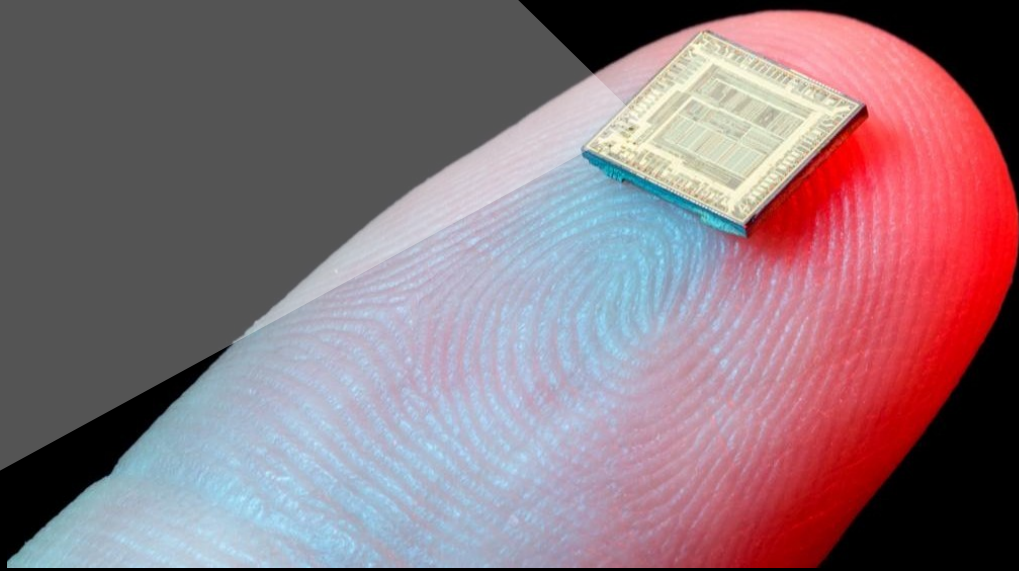
$$\begin{aligned}
 -x &= -\int 1.8y - x \, dt + C \\
 -z &= -\int 1.5xy - 0.2667z \, dt \\
 s &= -(1 - 2.68z) \\
 r &= -xs \\
 -y &= -\int 1.536r - 0.1y \, dt
 \end{aligned}$$





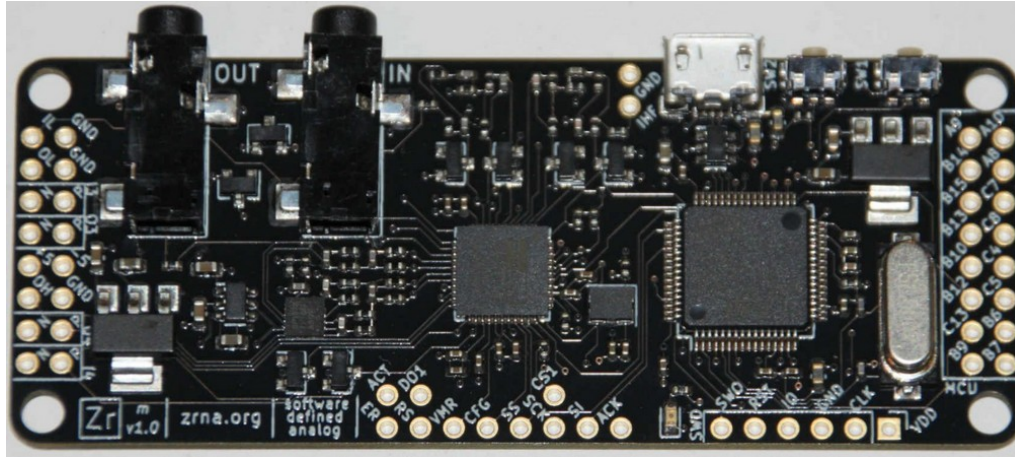
Unsere Vision

Integration eines
Analogrechners auf
einen Mikrochip.

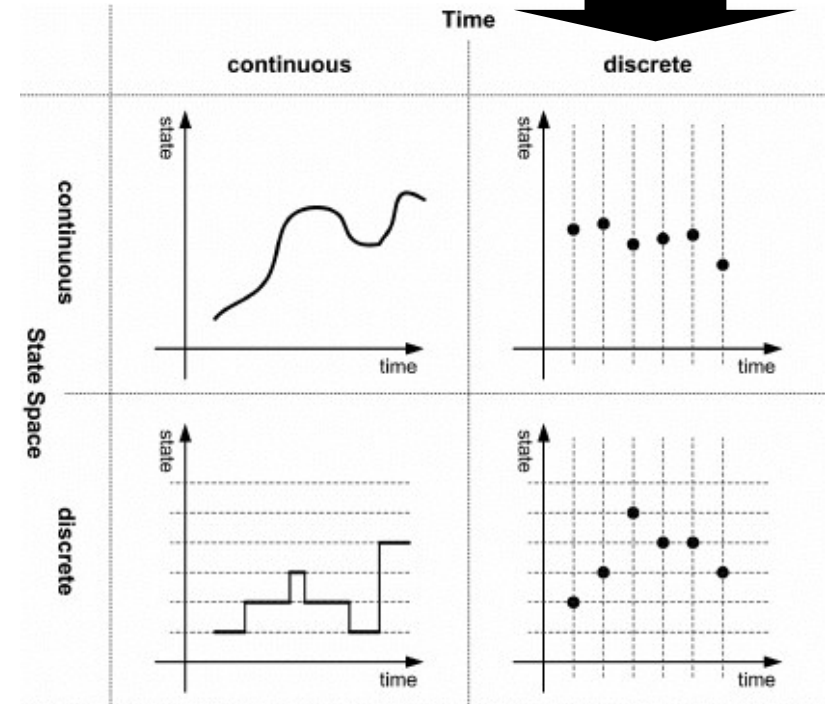


Field Programmable Analog Arrays zB. Der ZRNA (nutzt Anadigm Inc.)

Switched capacitor configurable
analog blocks (CABs)



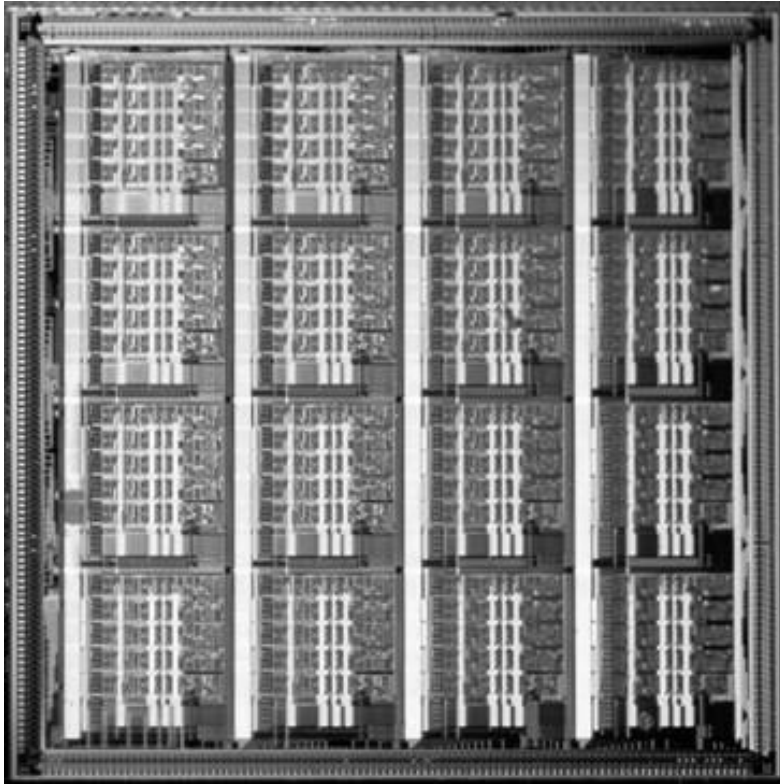
[<http://zrna.org>]



[10.14279/tuj.eceasst.27.385]

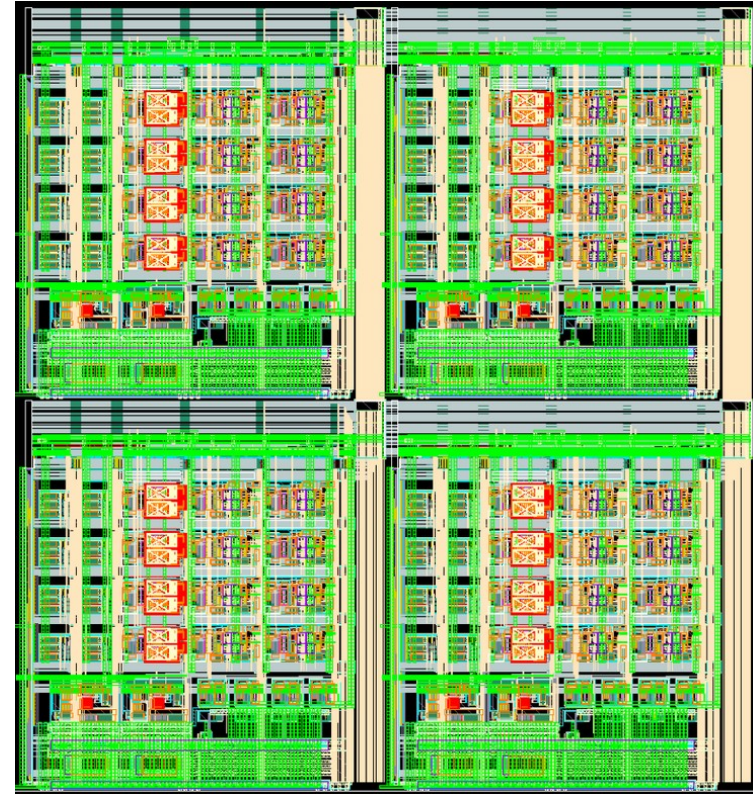
Die ersten Analogrechner-on-Chip

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

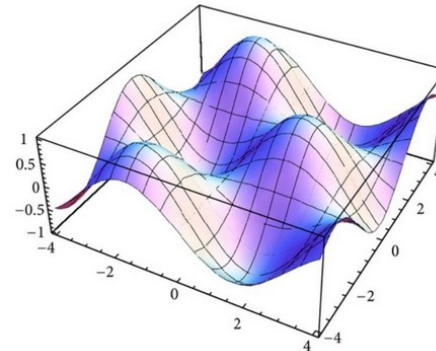
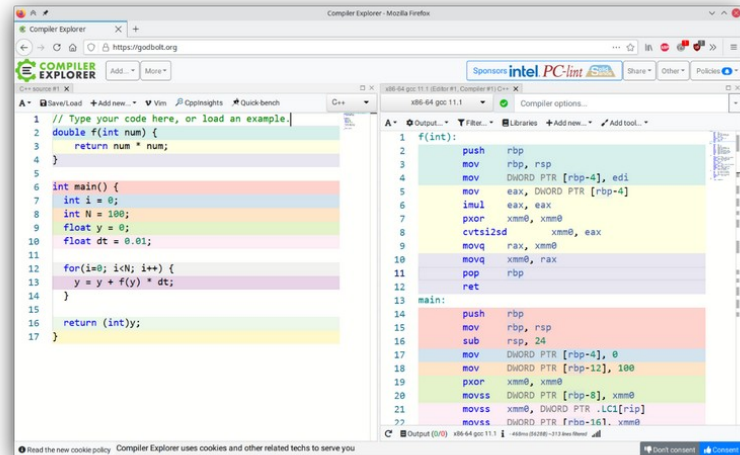
$$y_i \approx \sum_{i=0}^N f(t, y(t)) \Delta t$$

- 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

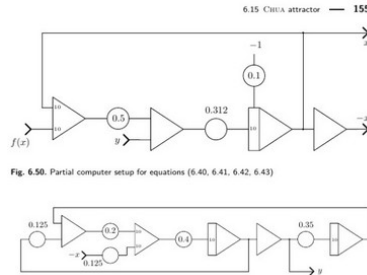
- 1** Will folgende Differentialgleichung (z.B. Bewegungsgleichung) lösen:

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

- 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 Berndts 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))

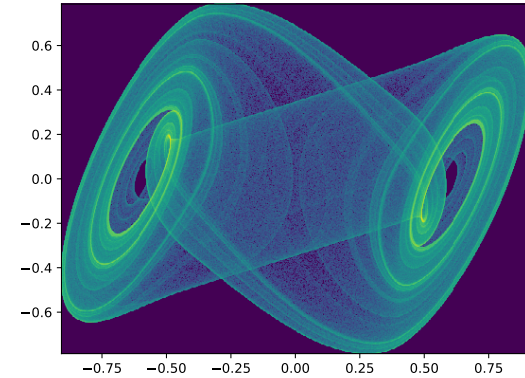
y1 = neg(sum(z, neg(mult(0.125, y))))
y2 = neg(sum(mult(1.25, x), mult(2, y1)))
y = mult(4, neg(int(y2, dt, 0)))

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

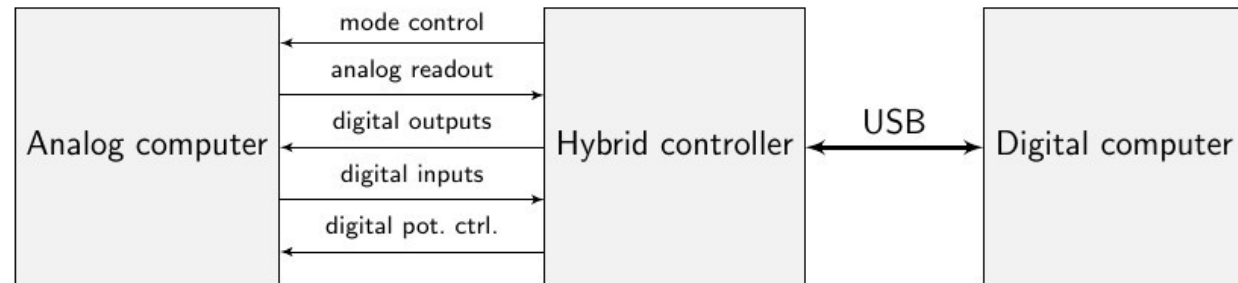
f1 = abs(sum(mult(0.7143, x), 0.2857))
f2 = abs(sum(mult(0.7143, x), -0.2857))
f3 = neg(sum(f1, neg(f2)))
fx = sum(mult(0.714, x), mult(0.3003, f3))

dt = const(0.001)
```

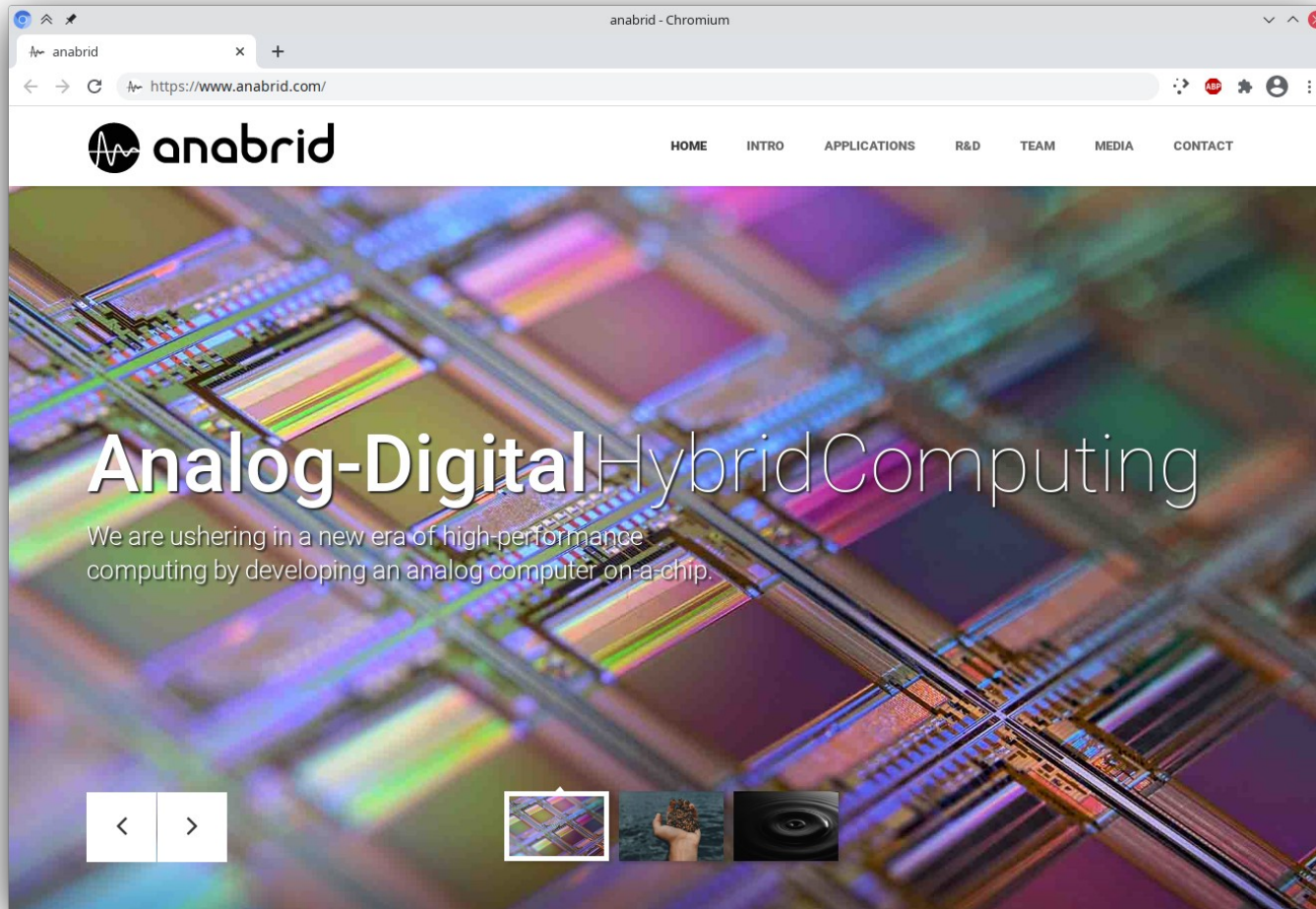
- 5** Laufen + Auswerten



Hieran arbeiten wir.



Analogcomputer on a Chip: www.anabrid.com



Kontinuierliche Computer – die Rechnerarchitektur der Zukunft

Dr. Sven Köppel
svenk@svenk.org

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

Kommt vorbei und probiert THATs aus
Oder schaut auf the-analog-thing.org

