

# Wie hackt man einen Analogrechner

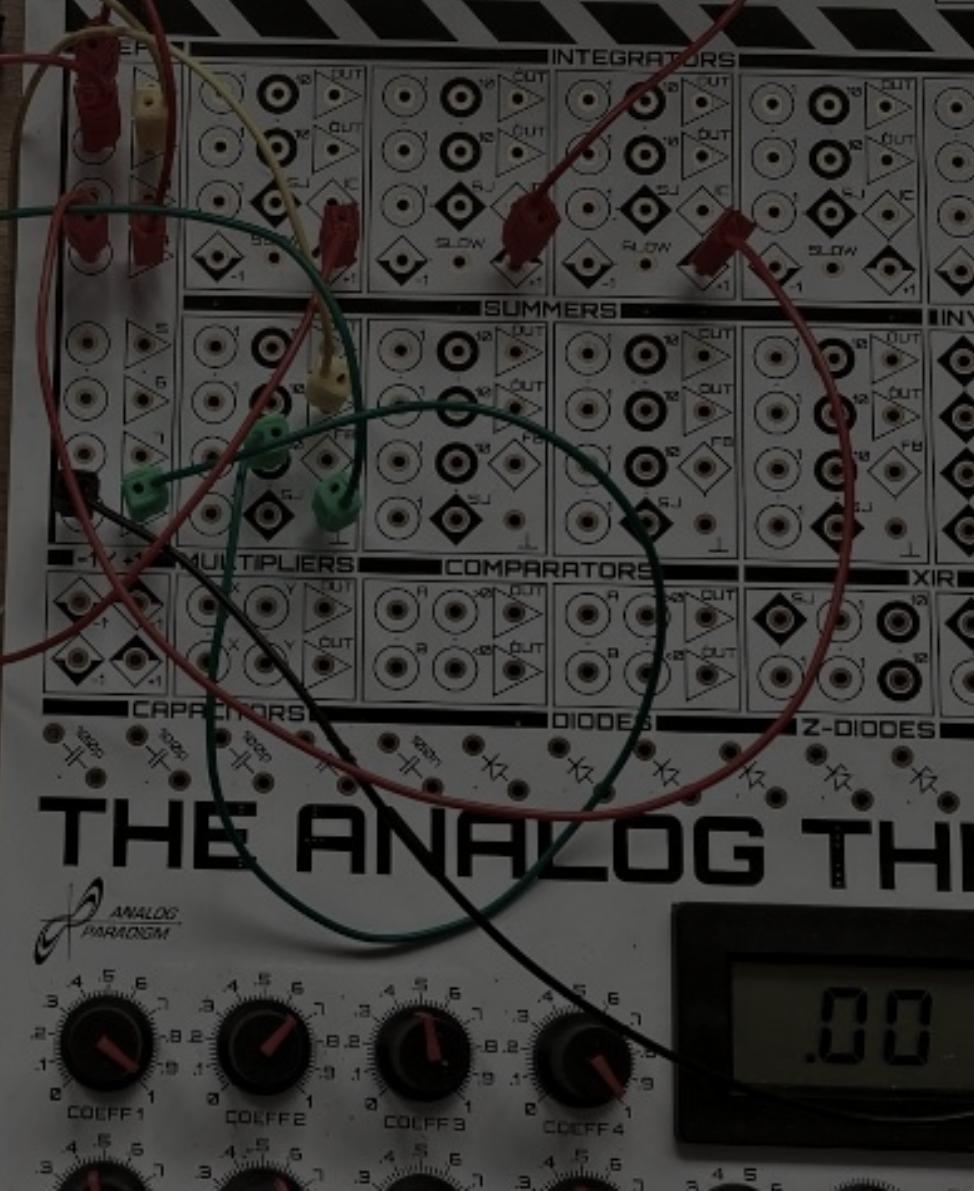
## Alles über die zukünftigen kontinuierlichen Computer

Dr. Sven Köppel  
[svenk@svenk.org](mailto:svenk@svenk.org)

21.05.2022

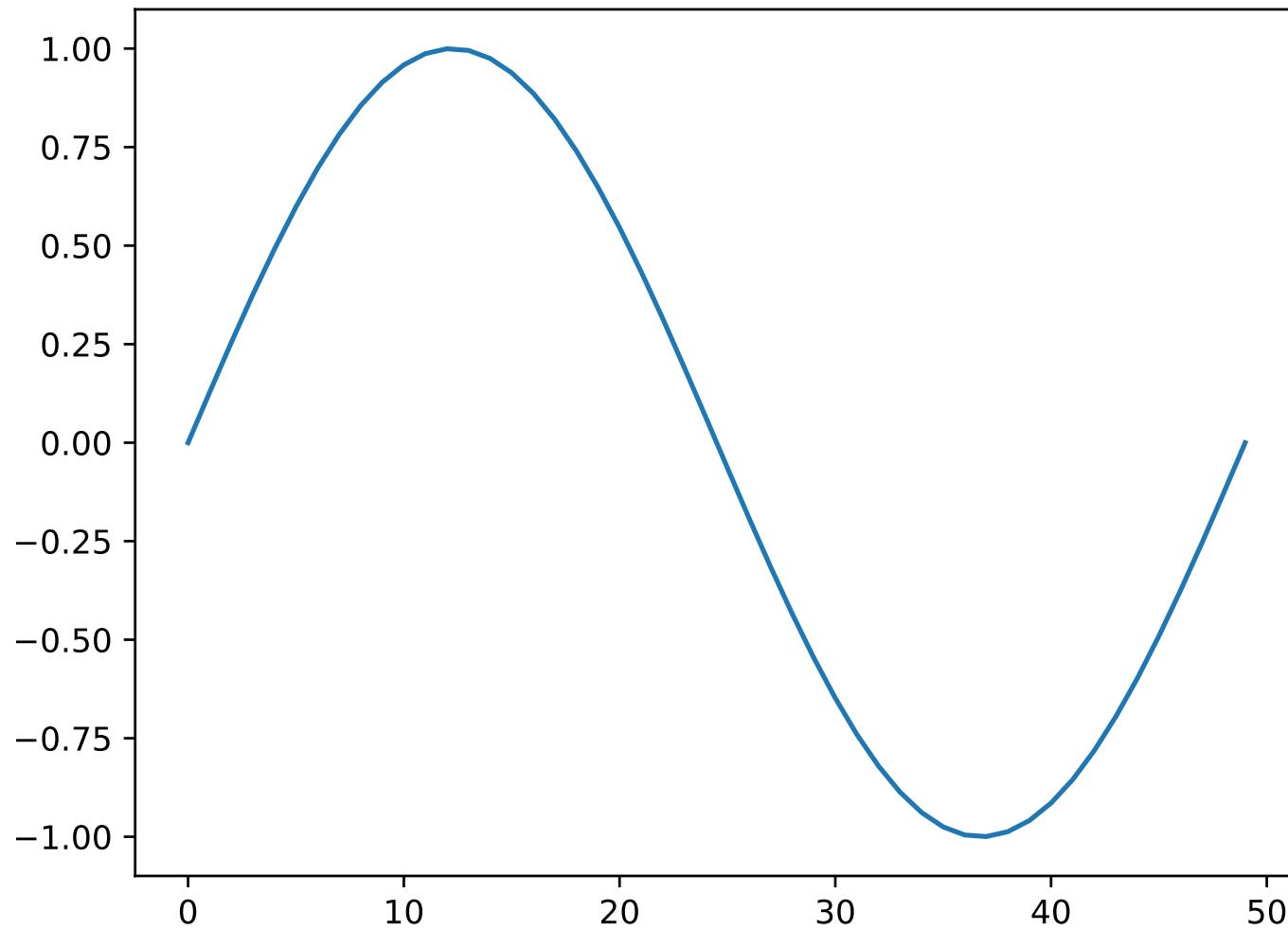
20. Gulaschprogrammiernacht #gpn20  
Zentrum für Kunst und Medien/Hochschule  
für Gestaltung, Entropia e.V. - CCC Karlsruhe

[Picture credits: Chris Giles, Facebook]

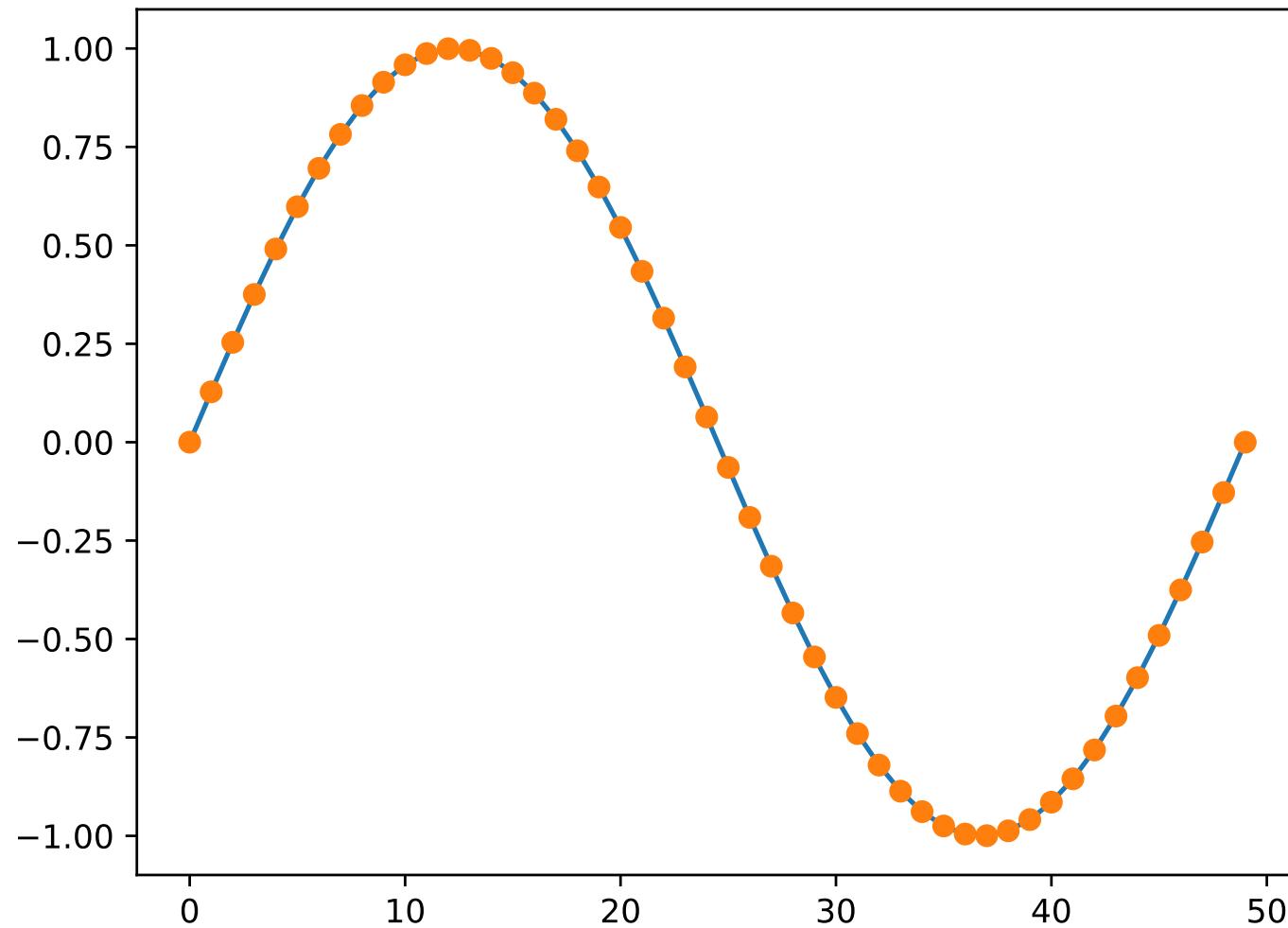


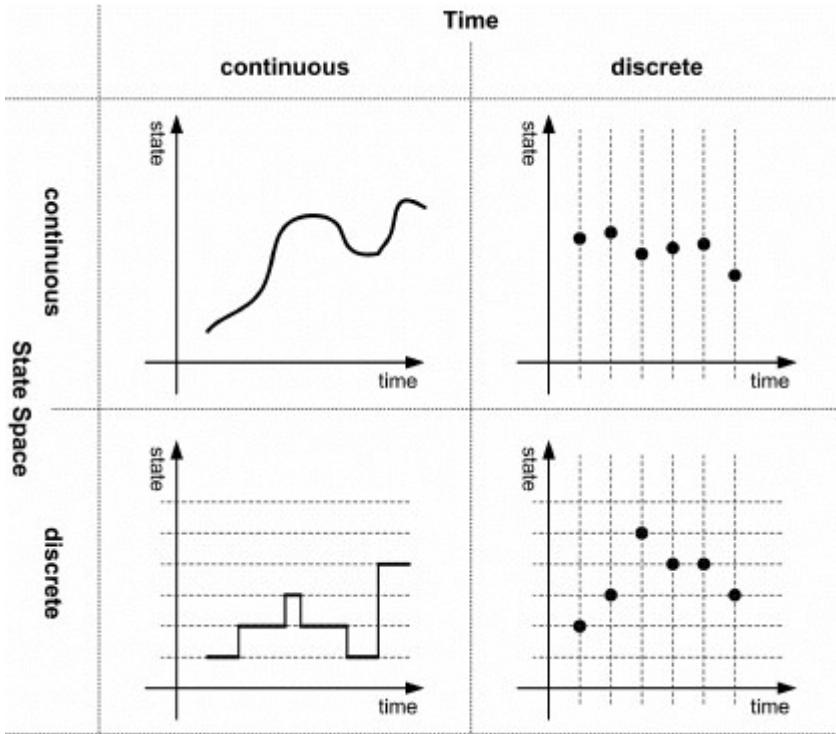
H	=	72
e	=	101
l	=	108
l	=	108
o	=	111
	=	32
W	=	87
o	=	111
r	=	114
l	=	108
d	=	100

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

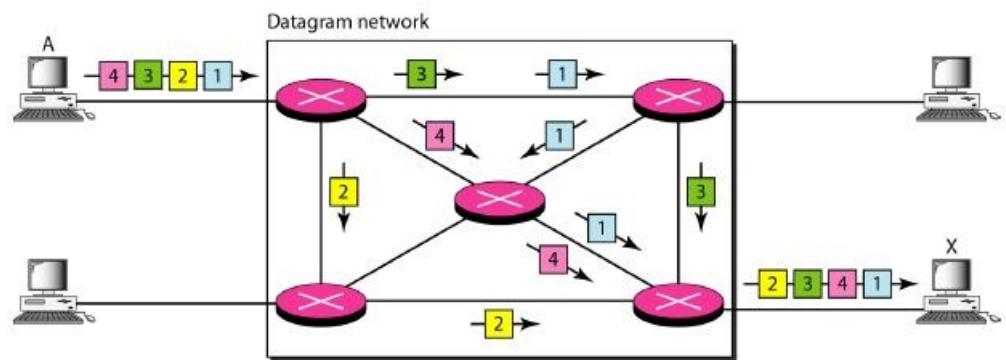
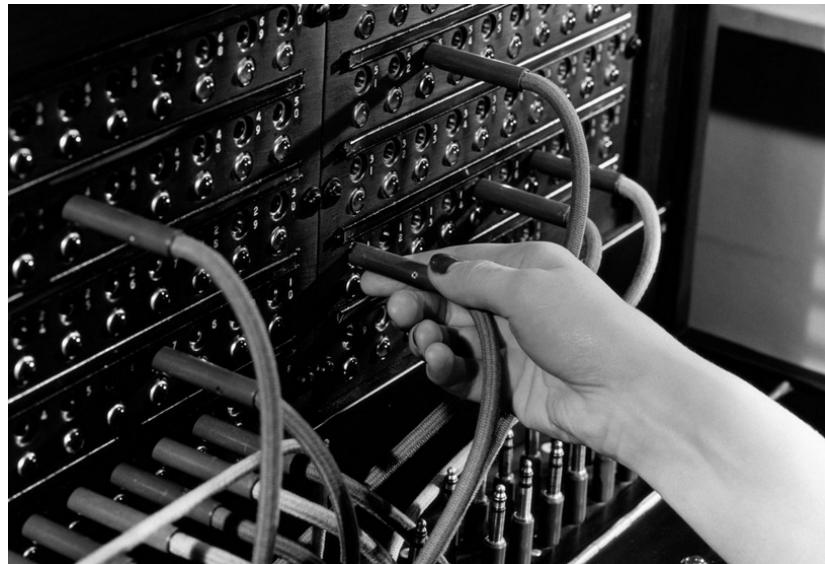


```
plot(sin(linspace(0,2*pi)), "o")
```





[10.14279/tuj.eceasst.27.385]





# Klimawandel

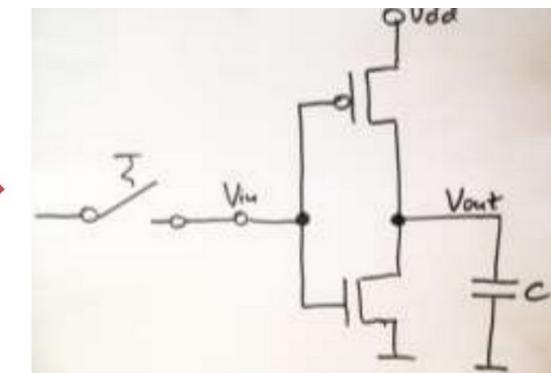
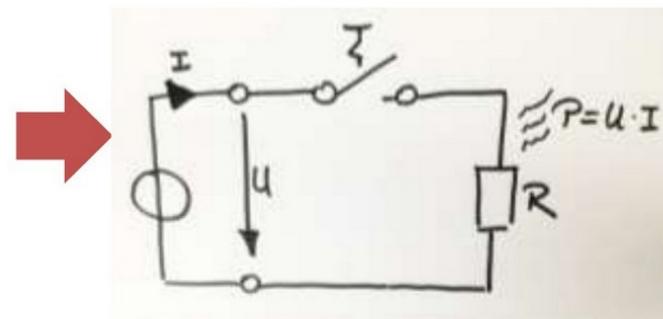
# Warum werden Computer heiss?

Landauer-Prinzip! [R. Landauer 1961]

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

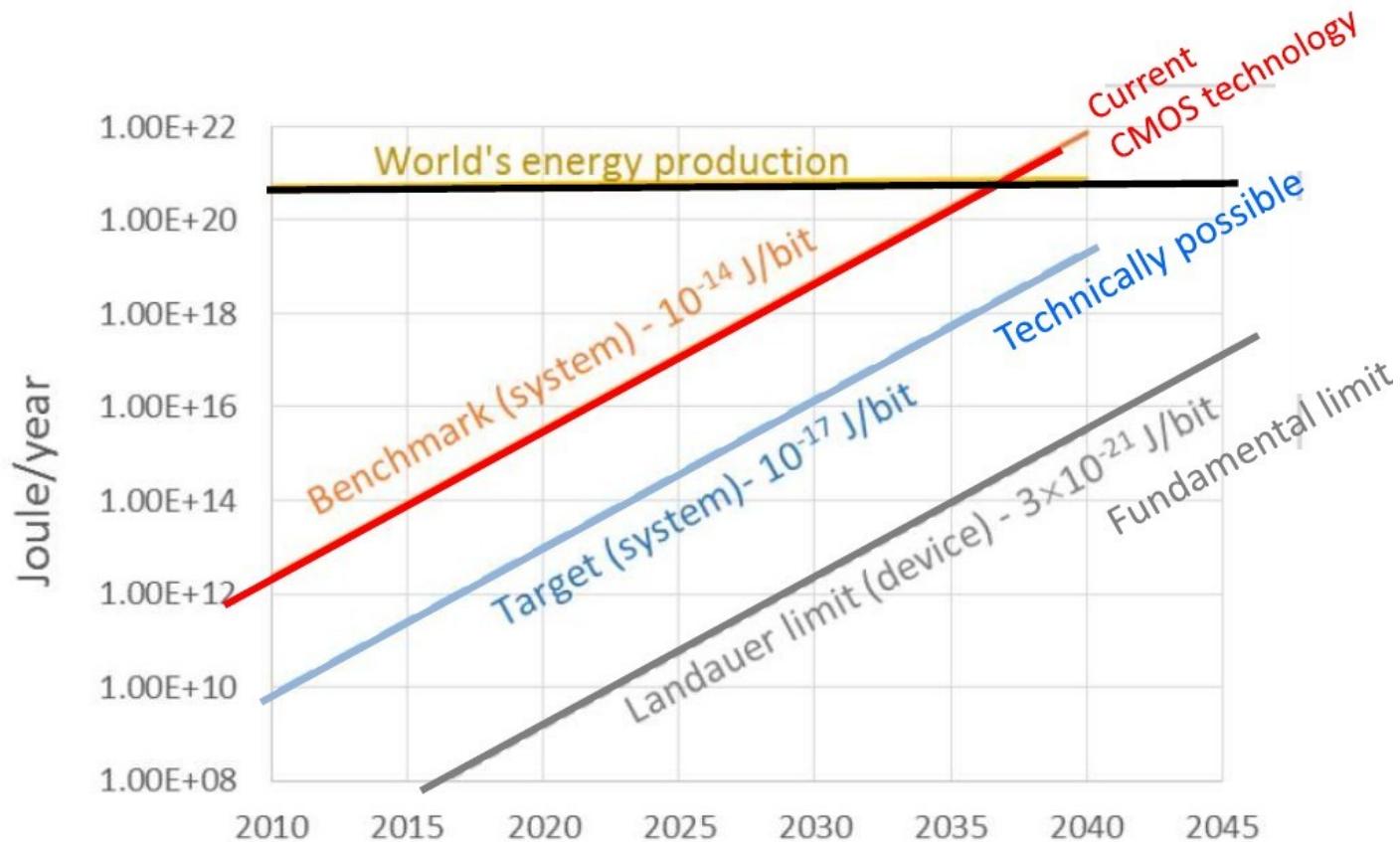
Landauer-Limit (bei Raumtemperatur):

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



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

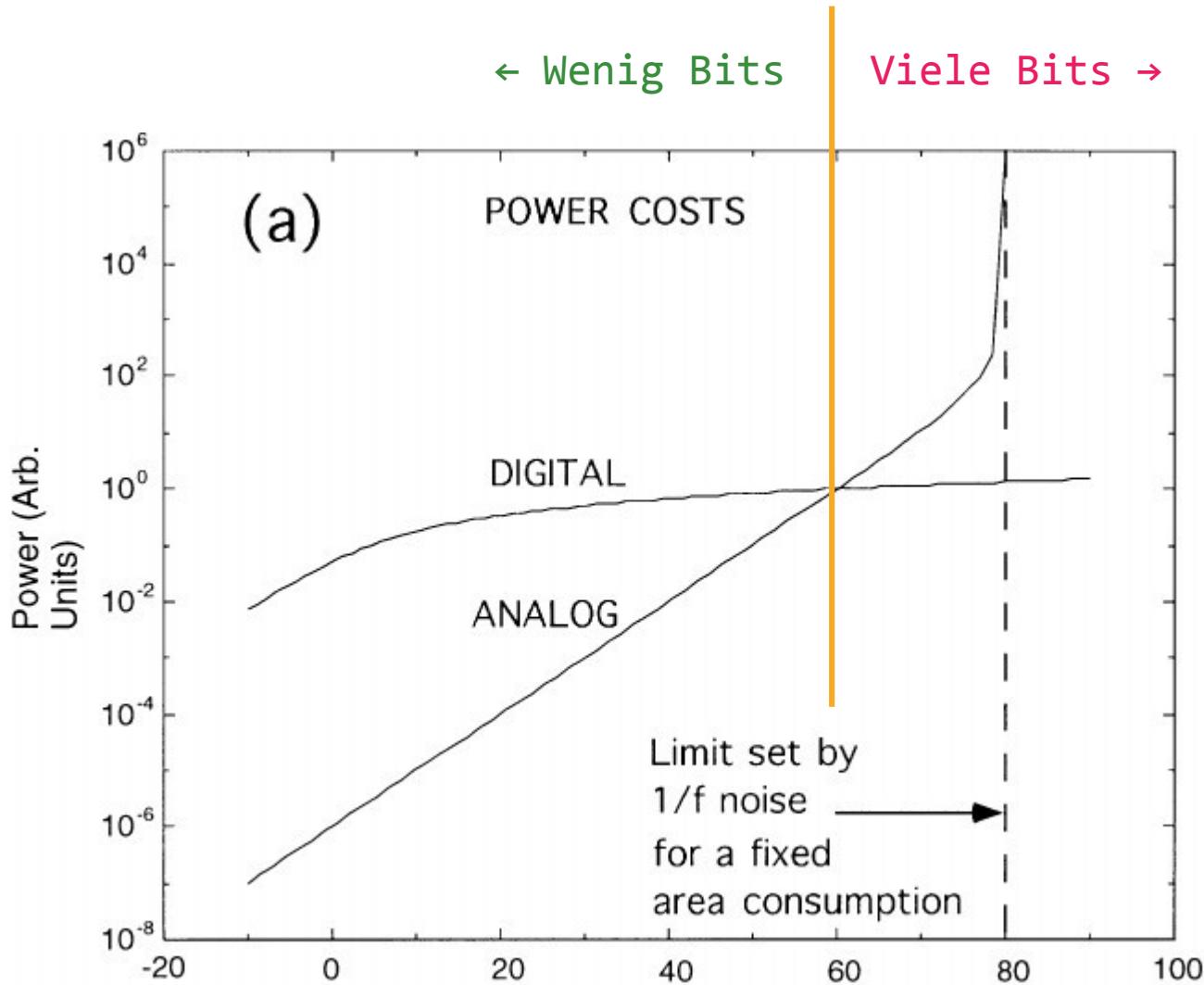
# Schalten erzeugt Wärme: Und zwar global relevant viel!



„Informationskatastrophe“

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

Klimawandel?





analog computer at DuckDuckGo - Mozilla Firefox <2>

analog computer at DuckDuckGo

https://duckduckgo.com/?t=ffab&q=analog+computer&iact=images&ia=images

Datenschutz – leicht gemacht. ▾ 🔍 ⚙️

analog computer

Alle Bilder Videos Nachrichten Karten Einkaufen Einstellungen

Deutschland Sichere Suche: moderat Irgendwann Alle Größen Alle Farben Alle Arten Alle Bildformate Alle Lizenzen

 Reverse-engineering... righto.com 1200 x 1491

 analog computers ferrettronix.com 1600 x 1200

 Analog computer I... britannica.com 1139 x 1600

 My Articles : TYPES OF COMPUT... myarticlesmq.blogspot.com 1024 x 757

 Analog Computer ... analogmuseum.org 2448 x 3264

 analog computers ferrettronix.com 1200 x 1600

 The 1959 Donner 3500 portable analog computer | Co... pinterest.co.uk 1985 x 965

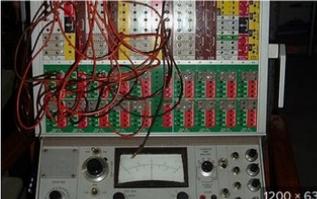
 Opinions on Analog computer writeopinions.com 923 x 726

 Digibarn Systems: The PACE TR... digibarn.com 1600 x 1309

 Meet George—1958's one-of-a-kind analog computer arstechnica.com 5472 x 3648

 An analog computer game on a modular synthesizer labs.earthpeople.se 524 x 329

 Retro Thing: Vintage analog computer kits retrothing.com 469 x 313

 Should We Bring Back Analog Computers? | El... electronicdesign.com 1200 x 630

 analog computer Archives - Eric P. Dollard... ericpdollard.com 4988 x 2988

 What are analog and digital... legit.ng 1000 x 790

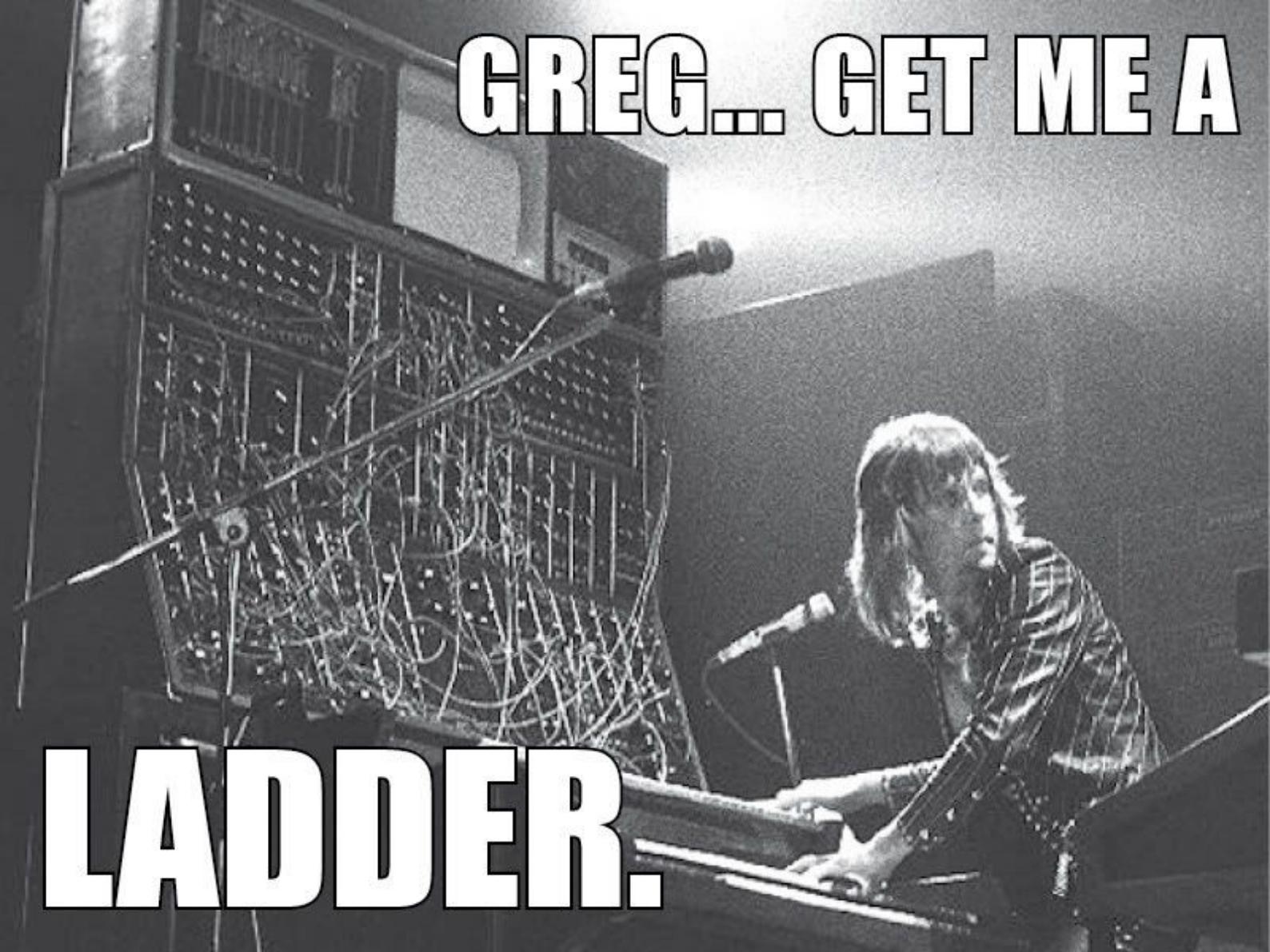
 Analog- und Hybridrechner - technikum29.de 694 x 443

 Computing Techniques and Vidac Analog C... mail.tekeye.uk 720 x 403

Feedback Teilen

**GREG... GET ME A**

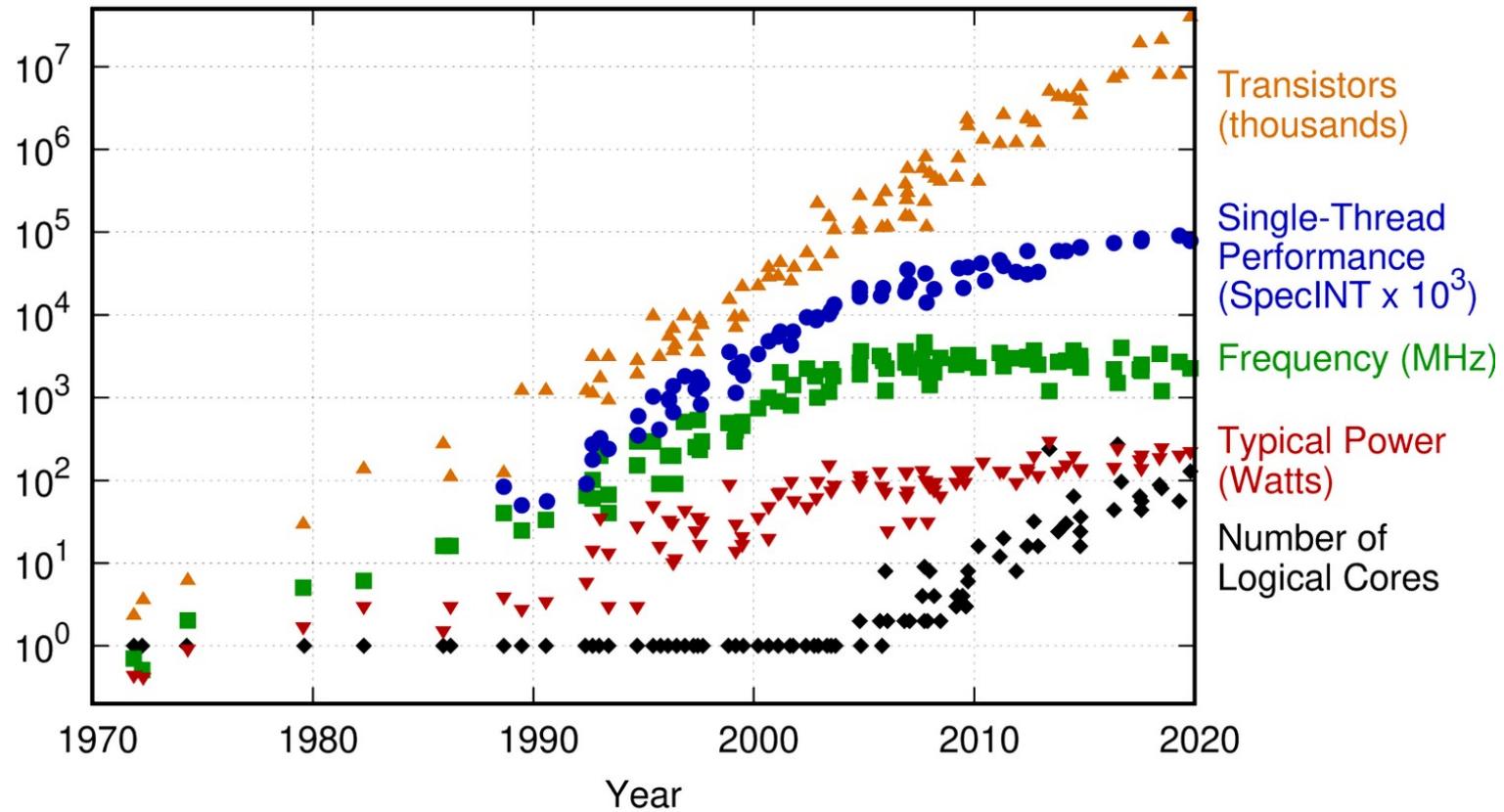
**LADDER.**





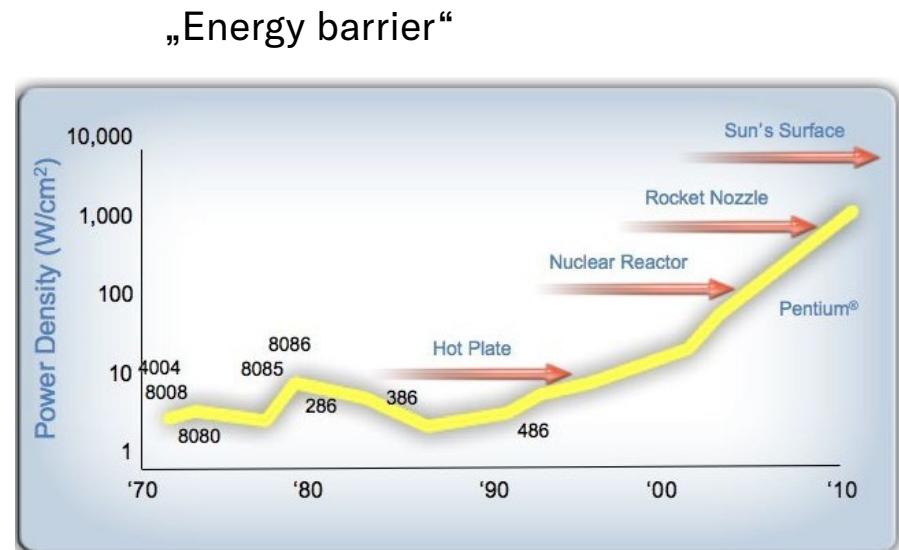
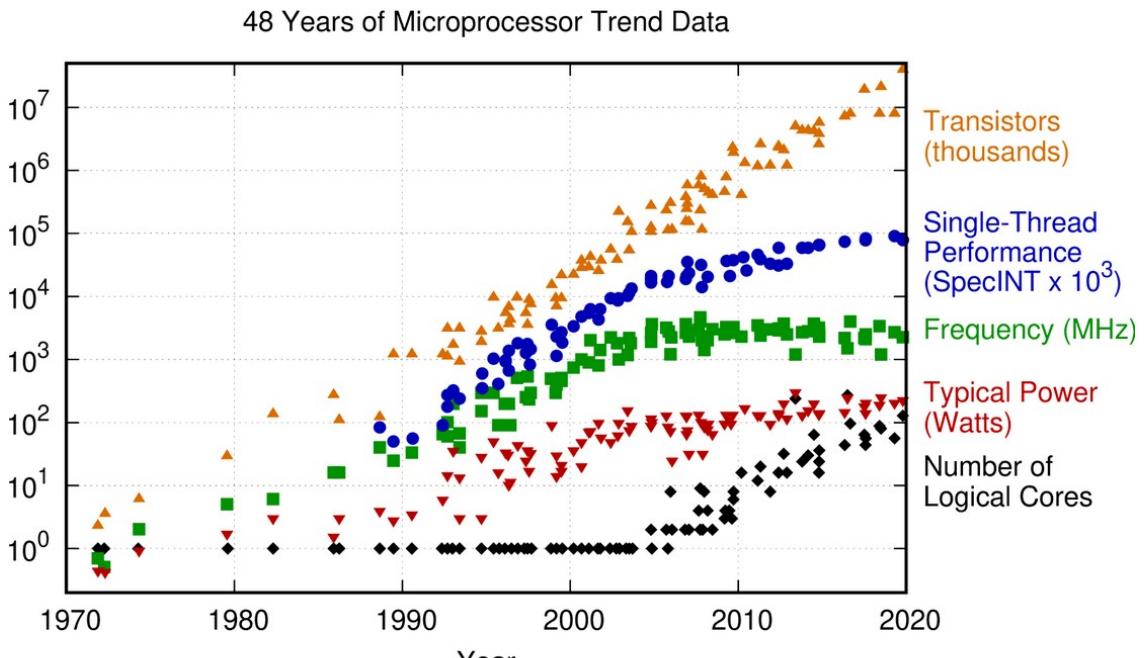
# Moore's Law: Fortschritte nur noch bei Parallelisierung, nicht mehr Takt.

48 Years of Microprocessor Trend Data

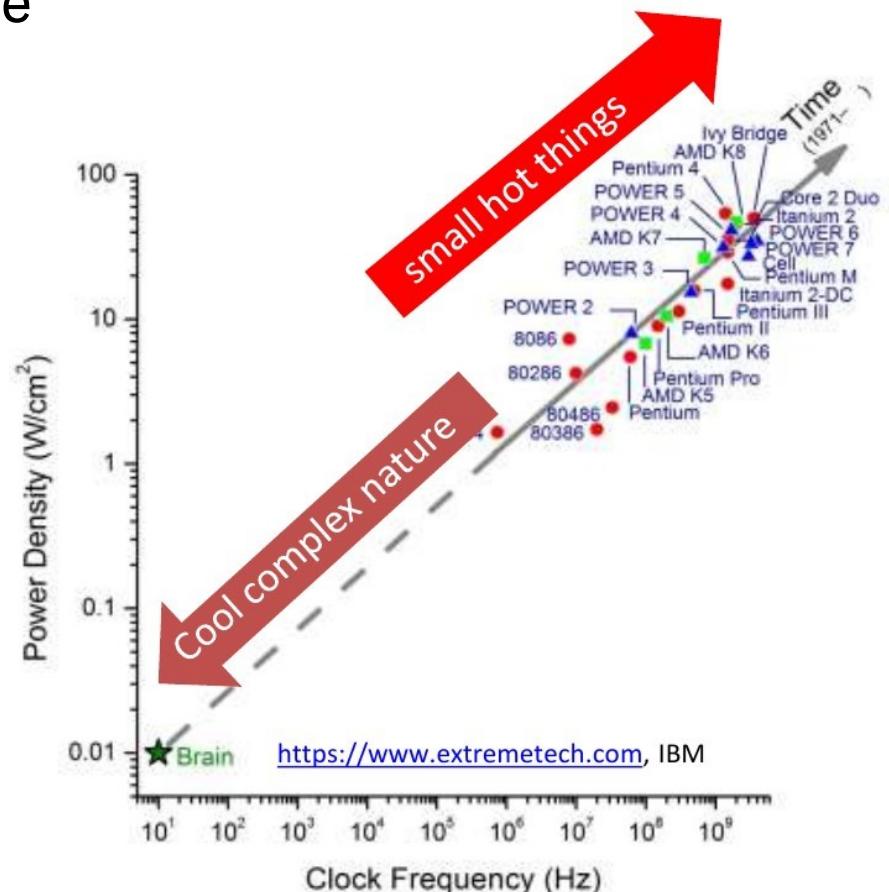
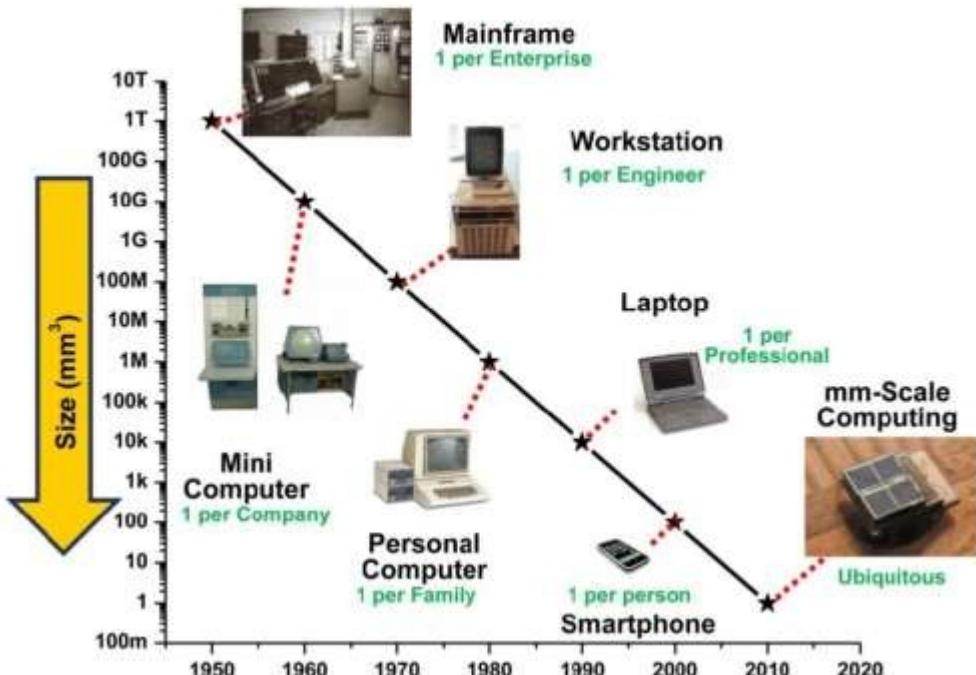


Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten  
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

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

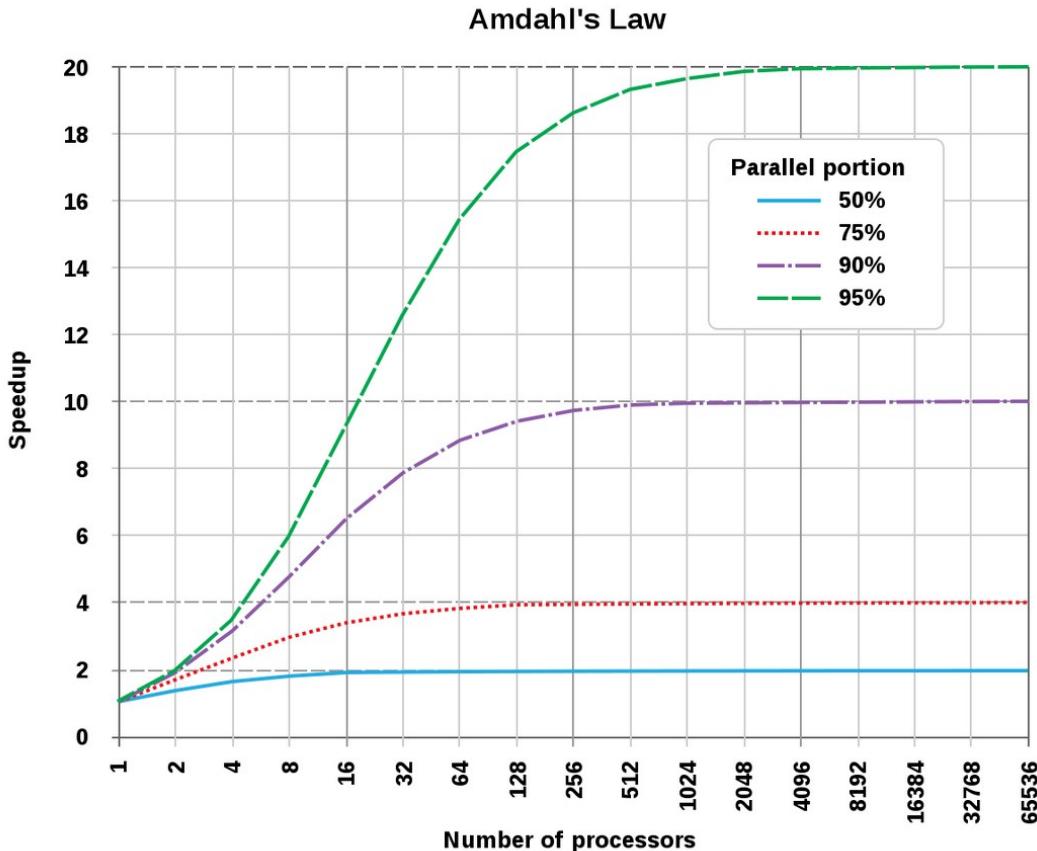


# Wärmeentwicklung: Energie und Baugröße



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.

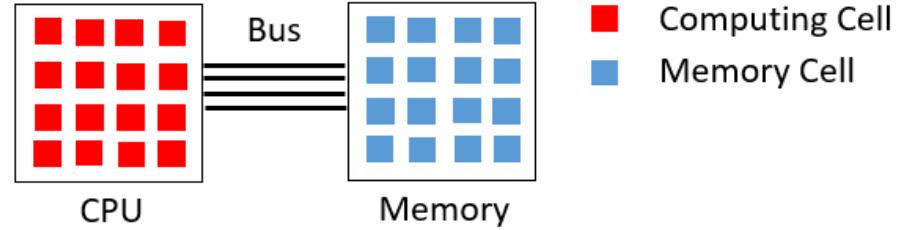
Doch der energetische Preis dafür ist sehr hoch!

Bei 95% Parallel portion:

3000 x Computer (Leistung)  
aber nur 20 x Speedup

# Digitale Architekturen: Zusammenfassung

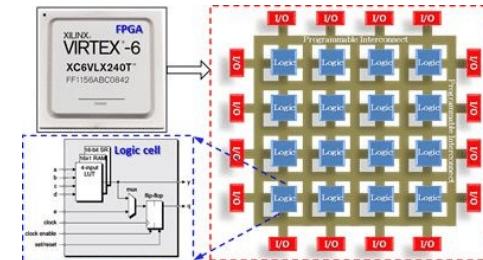
- **Energiebarriere:** Takt kann nicht schneller werden.
- **Amdahls Gesetz:**  
Parallelisierbarkeit hat Grenzen.
- **Von Neumann-Flaschenhals:**  
Konventionelle Computerarchitektur begrenzt Leistung.



Digitale **Alternativen**, zB.



GPGUs

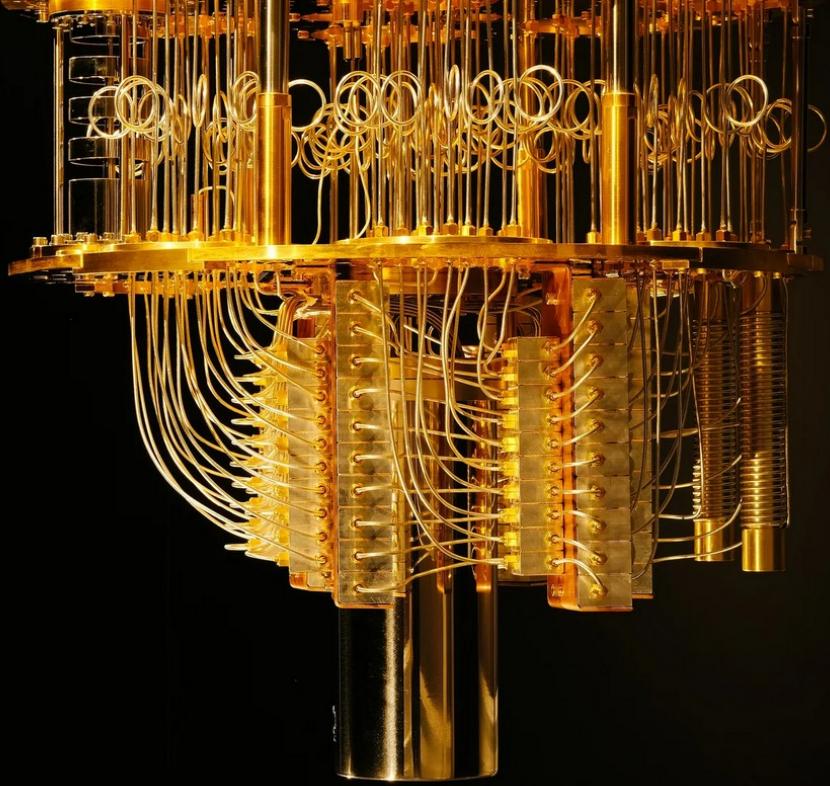


FPGAs

# Exotic Computing: Grundlagenforschung

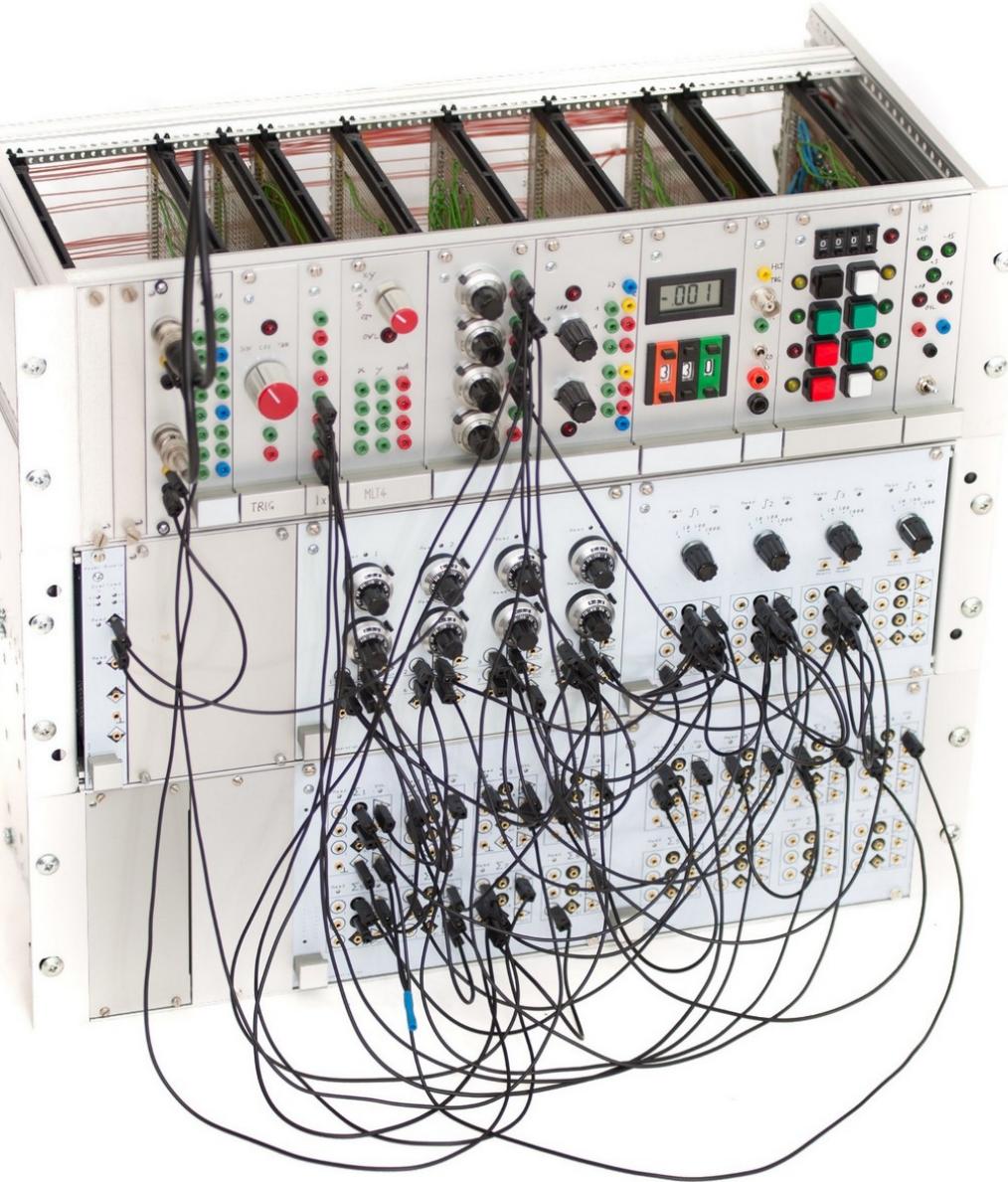
- Spintronik, Photonisches Rechnen
- Quantencomputing
- Neuromorphic Computing (AI)
- Memristoren, Computational Memory
- Klassisches Analogrechnen

Viel Materialforschung  
Viele interdisziplinäre Verbindungen



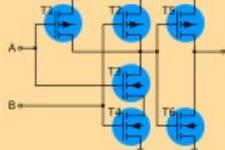
IBM Q System One

# Die Rückkehr des Analogrechners



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

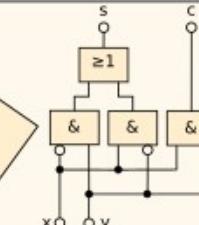
# Elektrische Analog- und Digitalrechner nutzen Transistoren grundsätzlich anders



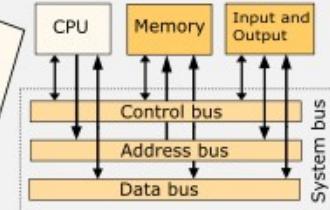
Ein logisches Gatter arbeitet mit Spannung/Strom an/aus  
Eine Leitung trägt 1 Bit Information.



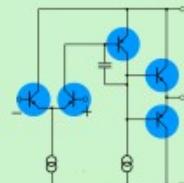
Gatter implementieren die Bool'sche Algebra und sind die Grundbausteine des Digitalrechners.



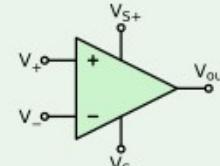
Aus Gattern kann man beliebig große arithmetische Rechenelemente bauen, die z.B. Ziffer für Ziffer addieren.



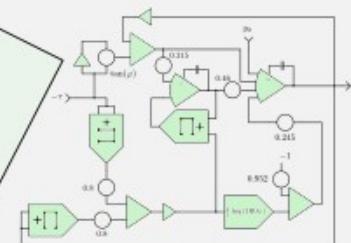
So entsteht der klassische Digitalprozessor, der Schritt für Schritt arbeitet.



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

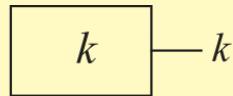


Der Operationsverstärker ist der Grundbaustein des Analogrechners und kann viele elementare Rechnungen durchführen. Er arbeitet mit kontinuierlichen Größen, instantan und ohne Takt und verbraucht dabei sehr wenig Energie.

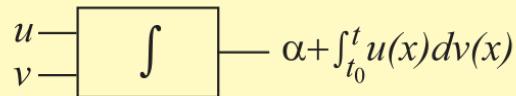


So entsteht der Analogrechner, der datenflussorientiert eine Aufgabenstellung löst.

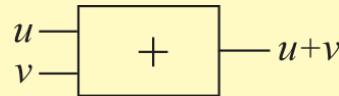
# Bausteine des Analogrechners! The General Purpose Analog Computer



A constant unit associated to



An integrator unit



An adder unit



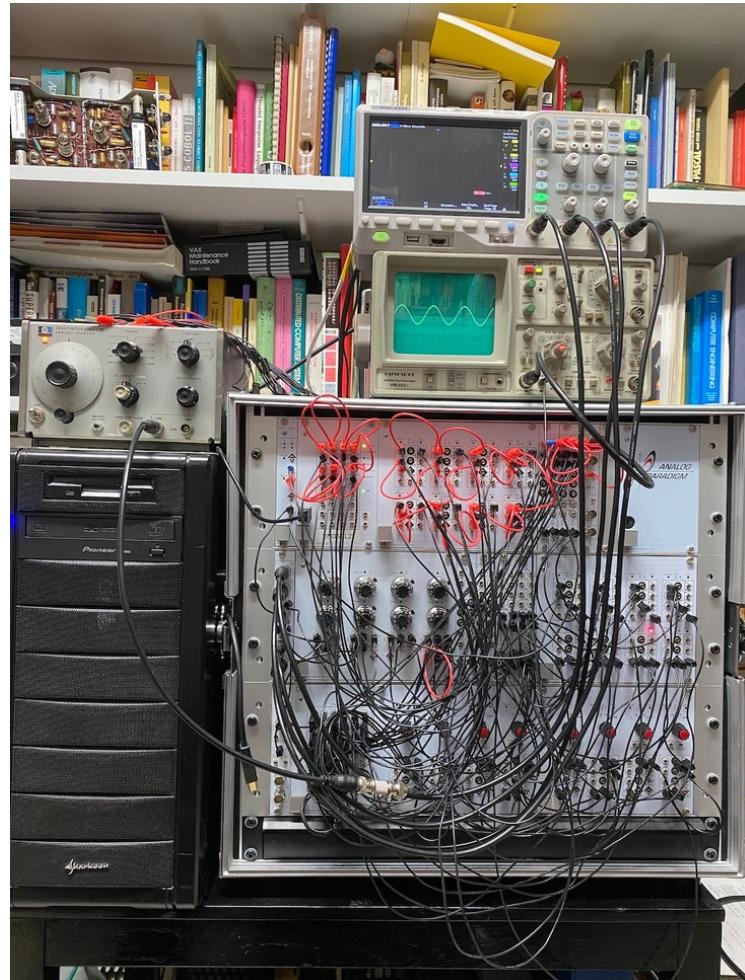
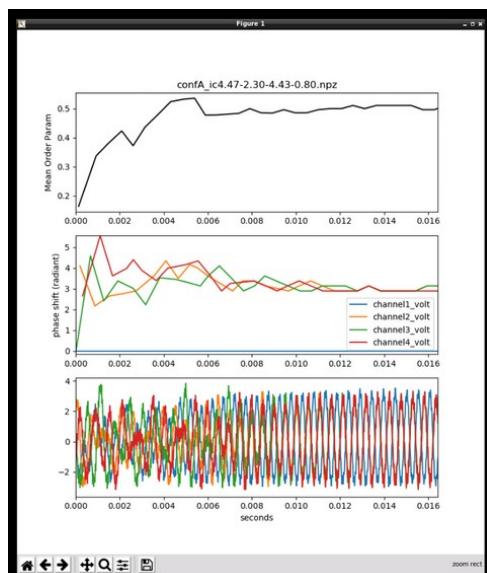
A multiplier unit

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**



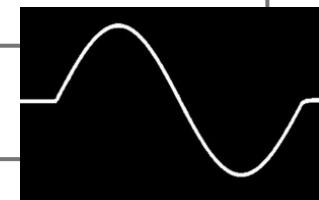
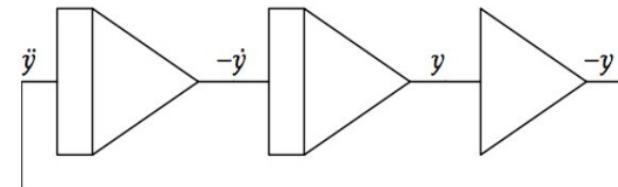
# Analogrechnen: Ein Beispielprogramm

Harmonischer Oszillatior:

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

Umschreiben zu:

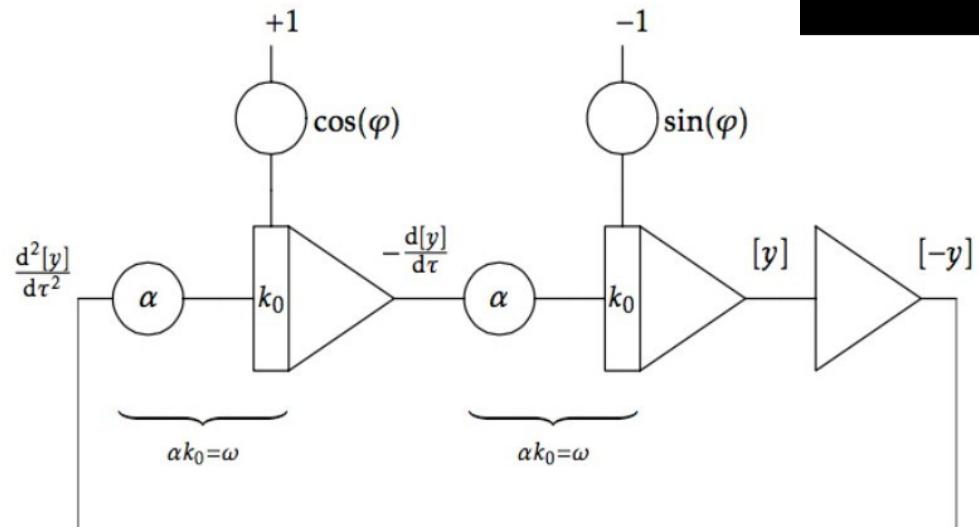
$$\ddot{y} = -y \quad (\text{mit } \omega = 1)$$



Mit Anfangswerten und Allgemein:

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

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



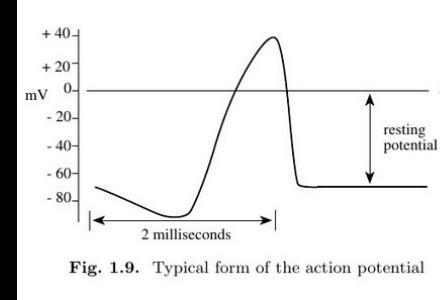
**Anwendungen**  
die von Analogrechnern profitieren würden

# Anwendungen

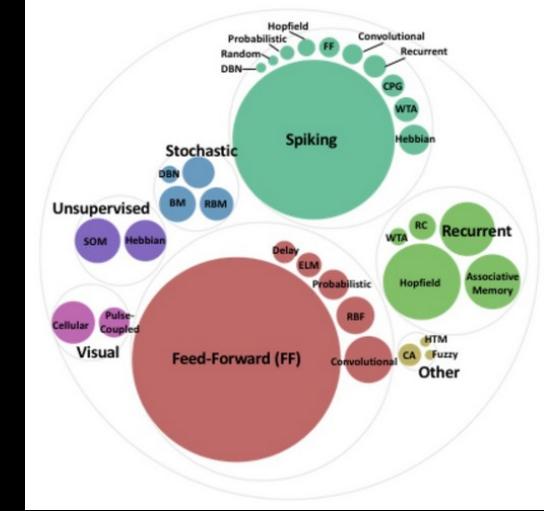
## Artificial Intelligence



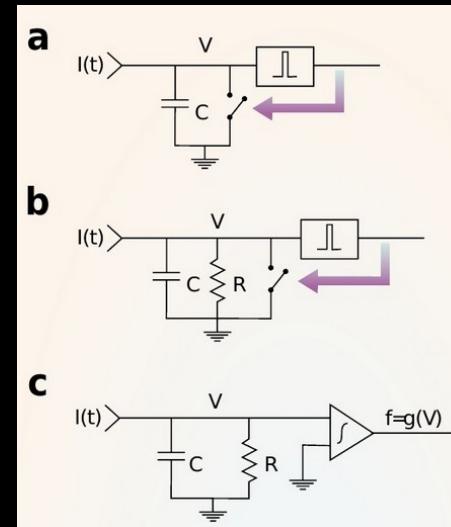
Neuronen sind Analogrechner,  
und analoge CMOS-Technologie  
ist die beste (vorhandene!)  
verfügbare Technologie sie zu  
simulieren.



Rojas: Neural Networks (Springer 1996)



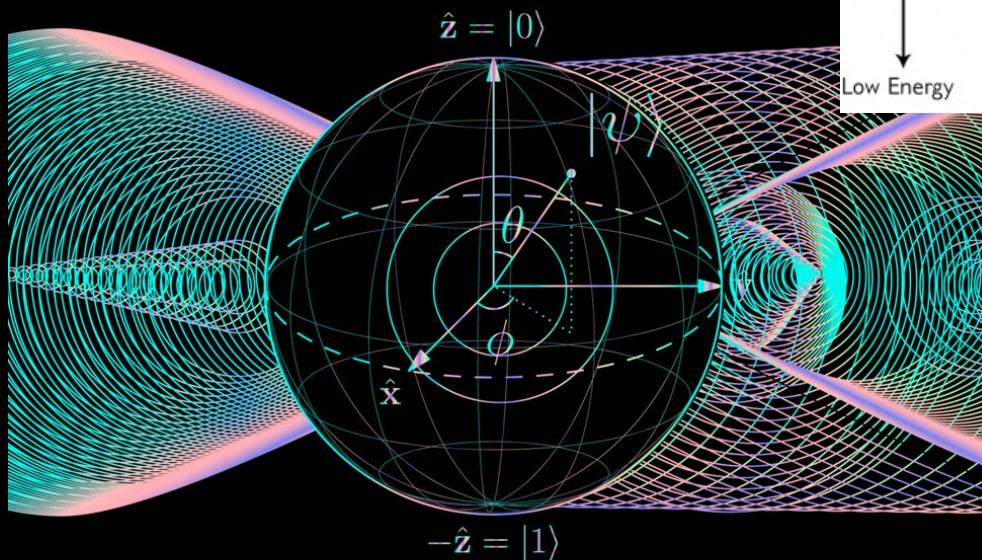
A survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware, [arXiV:1705.06963]



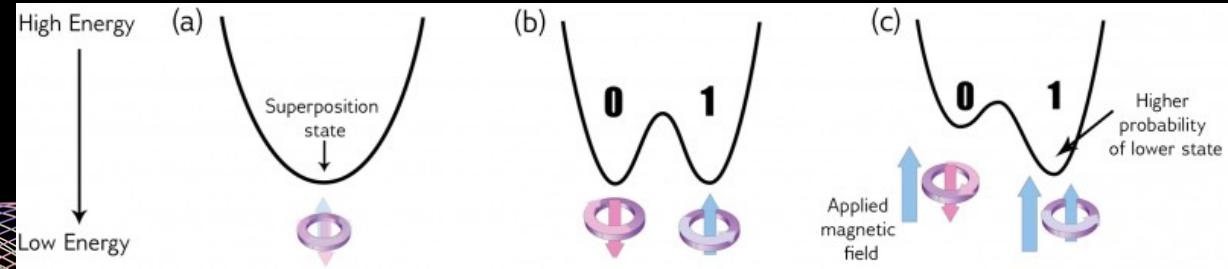
Koch, Segev: The role of single neurons in information processing (Nature neuroscience, vol. 3, 2000)

# Anwendungen

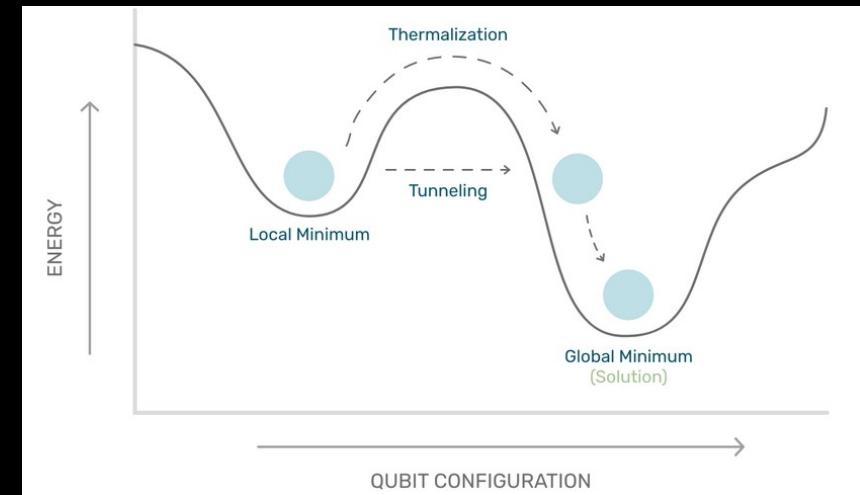
## Quantum Computing



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]

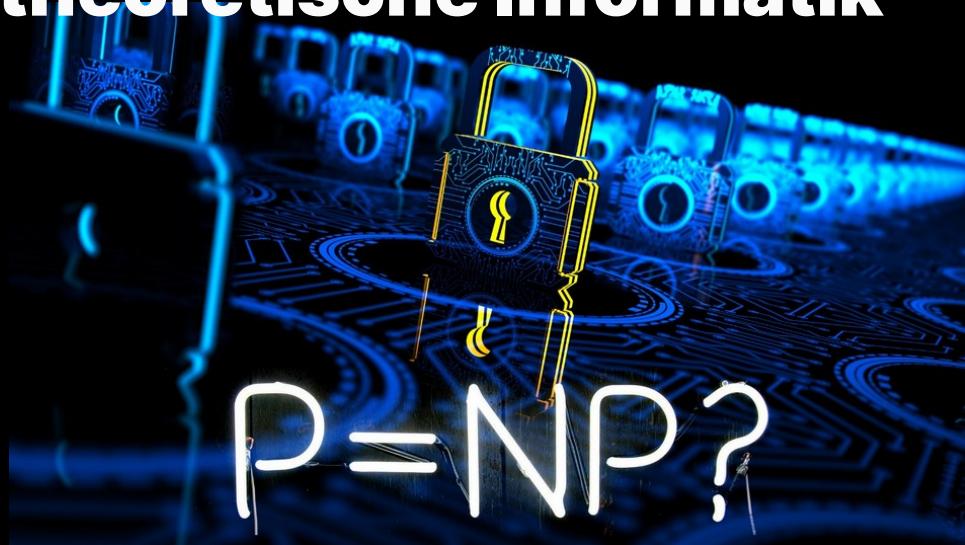


Quanten-Annealer [Bildquelle: miro.medium.com/max]

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

## Anwendungen

# Verschlüsselung und theoretische Informatik

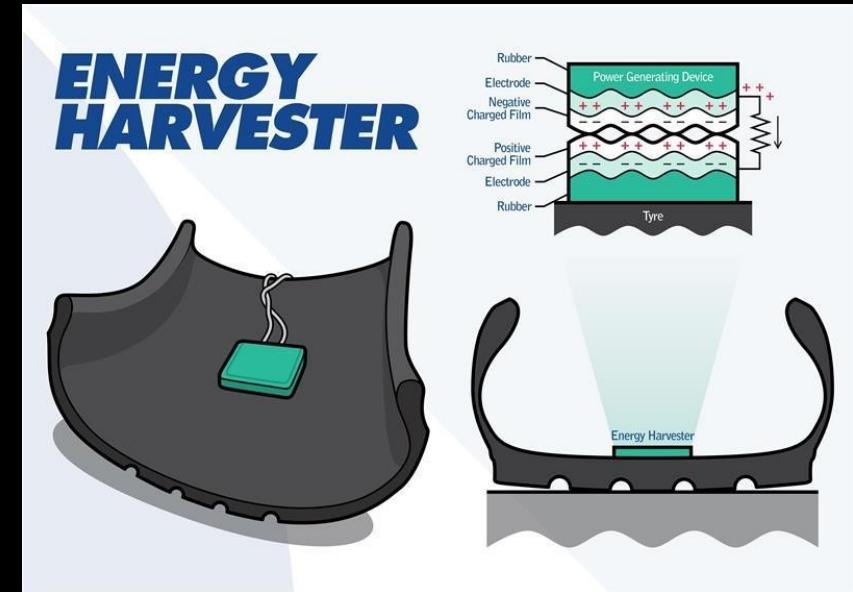
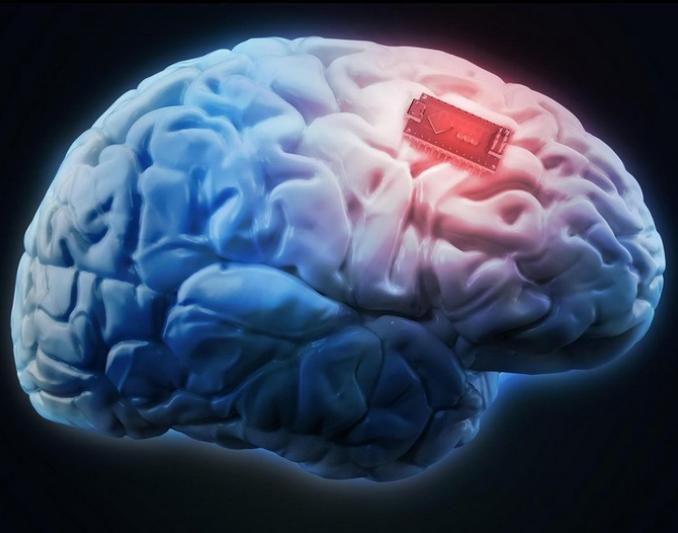


Analgorechner können möglicherweise effizient **kombinatorische Probleme** lösen und Pre-Quantum **Verschlüsselung** knacken.

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

# Anwendungen

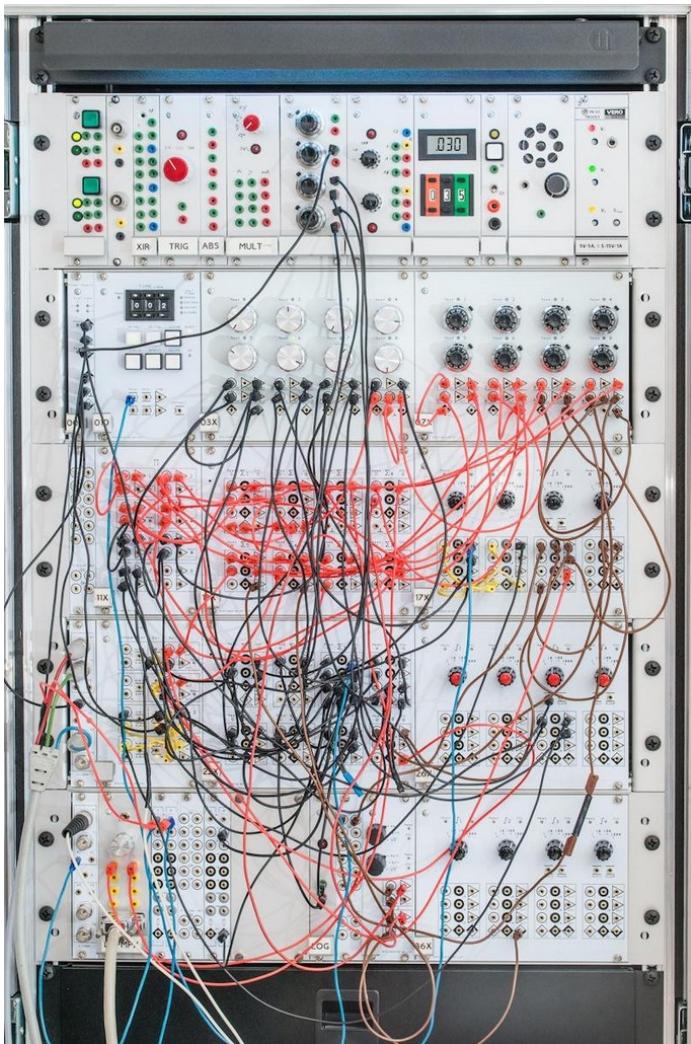
## Wearables und Implantate



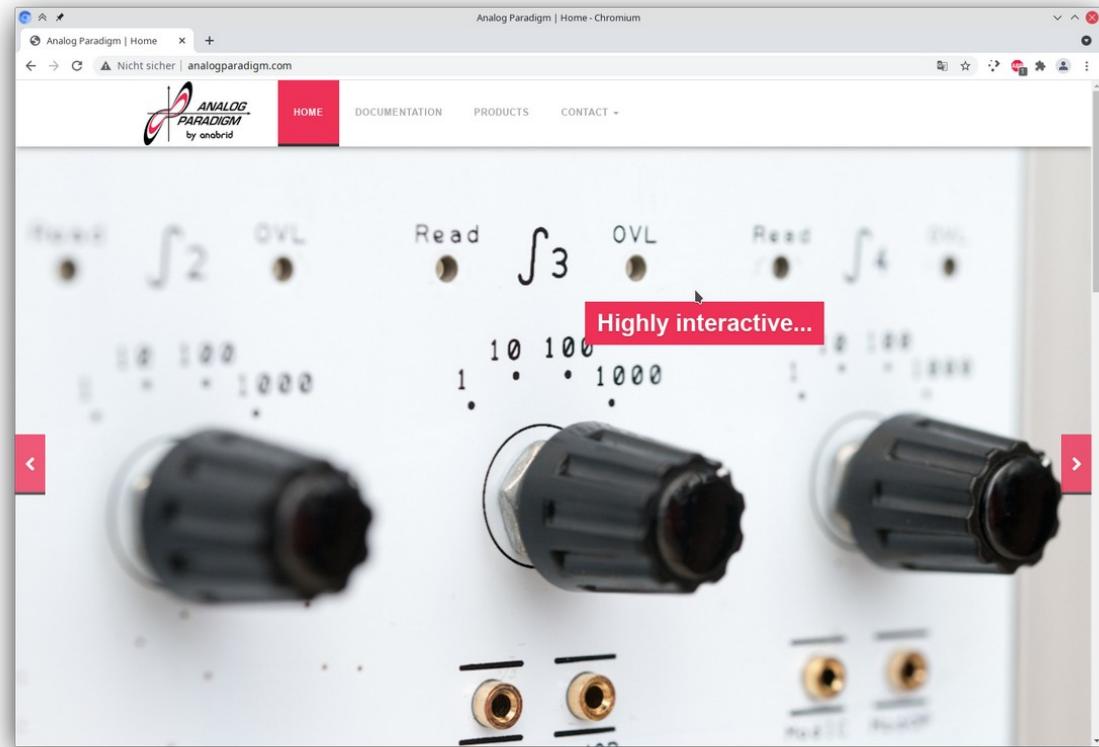
[Bildquelle: markallengroup.com]

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





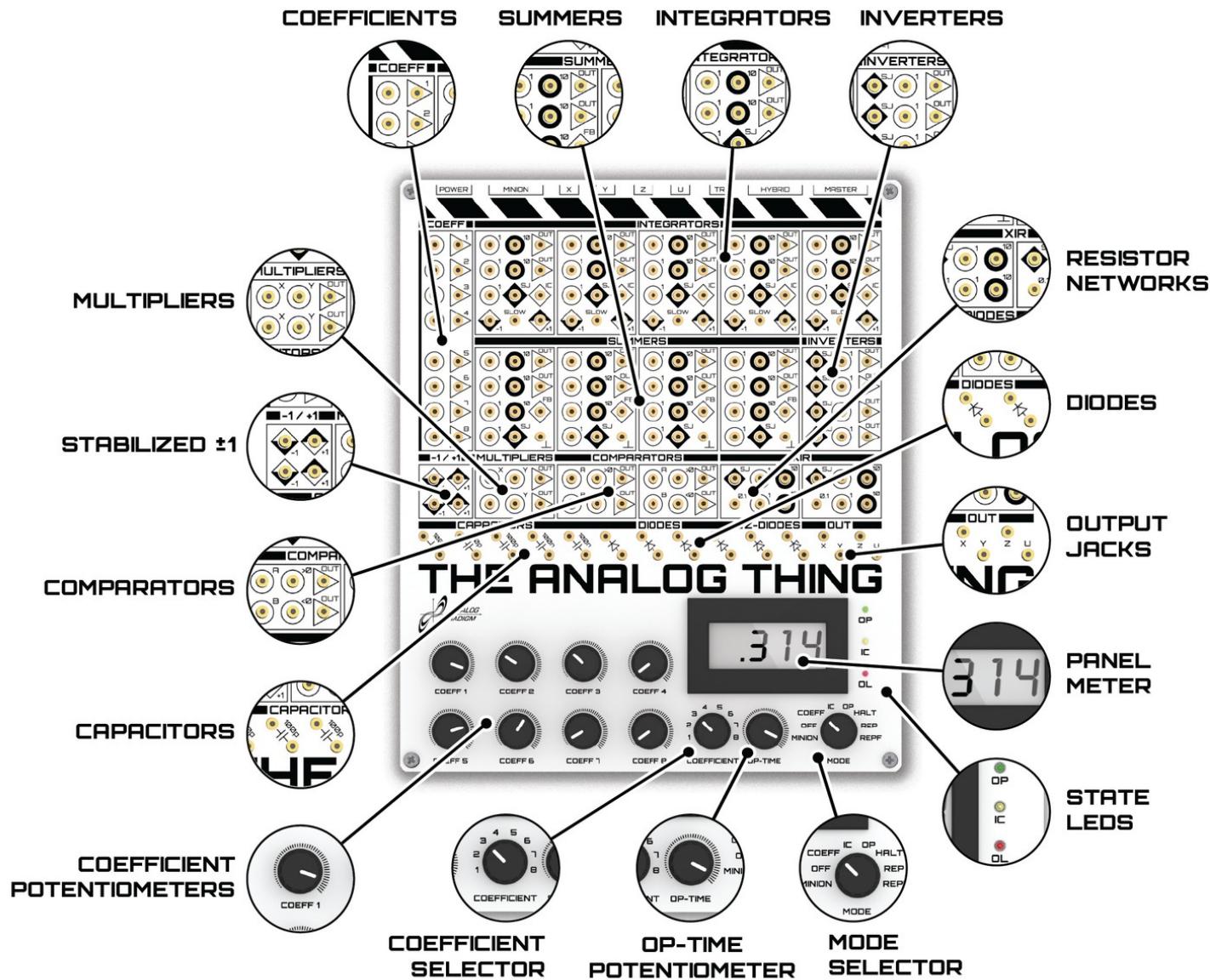
Über uns: [www.analogparadigm.com](http://www.analogparadigm.com)



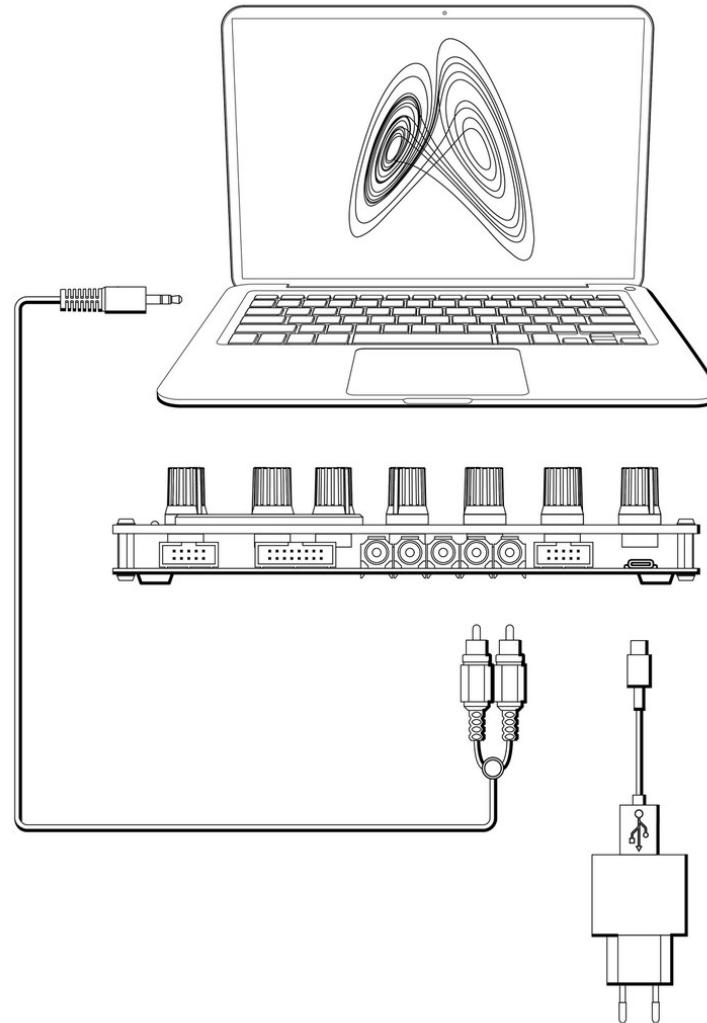
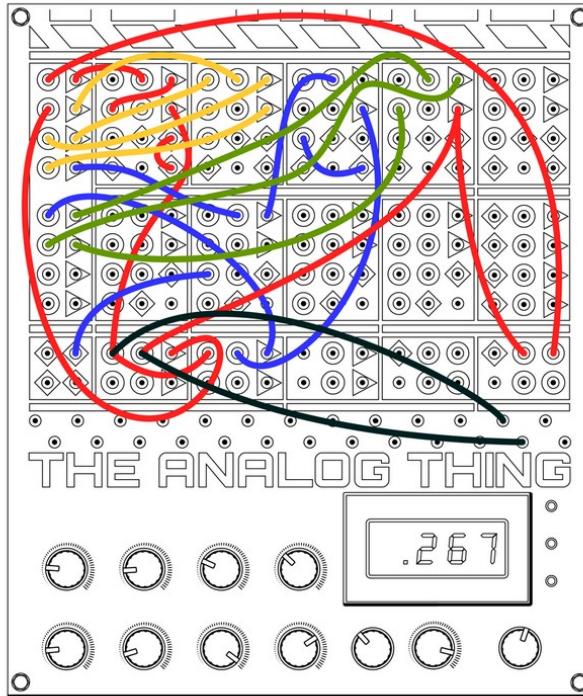
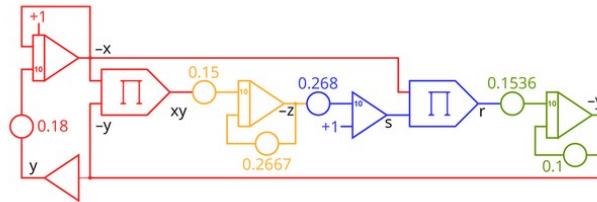
# The Analog Thing



- 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)

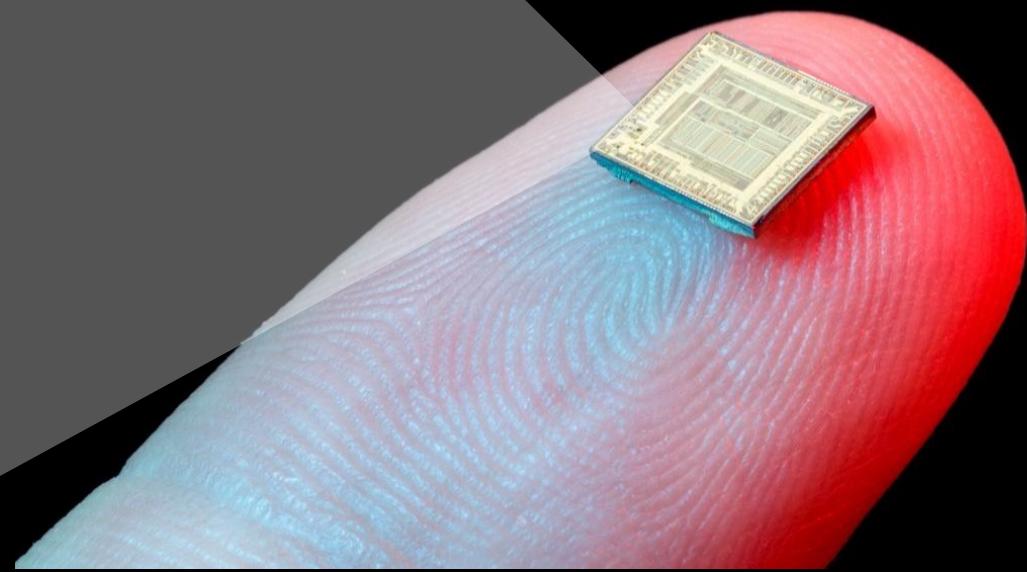
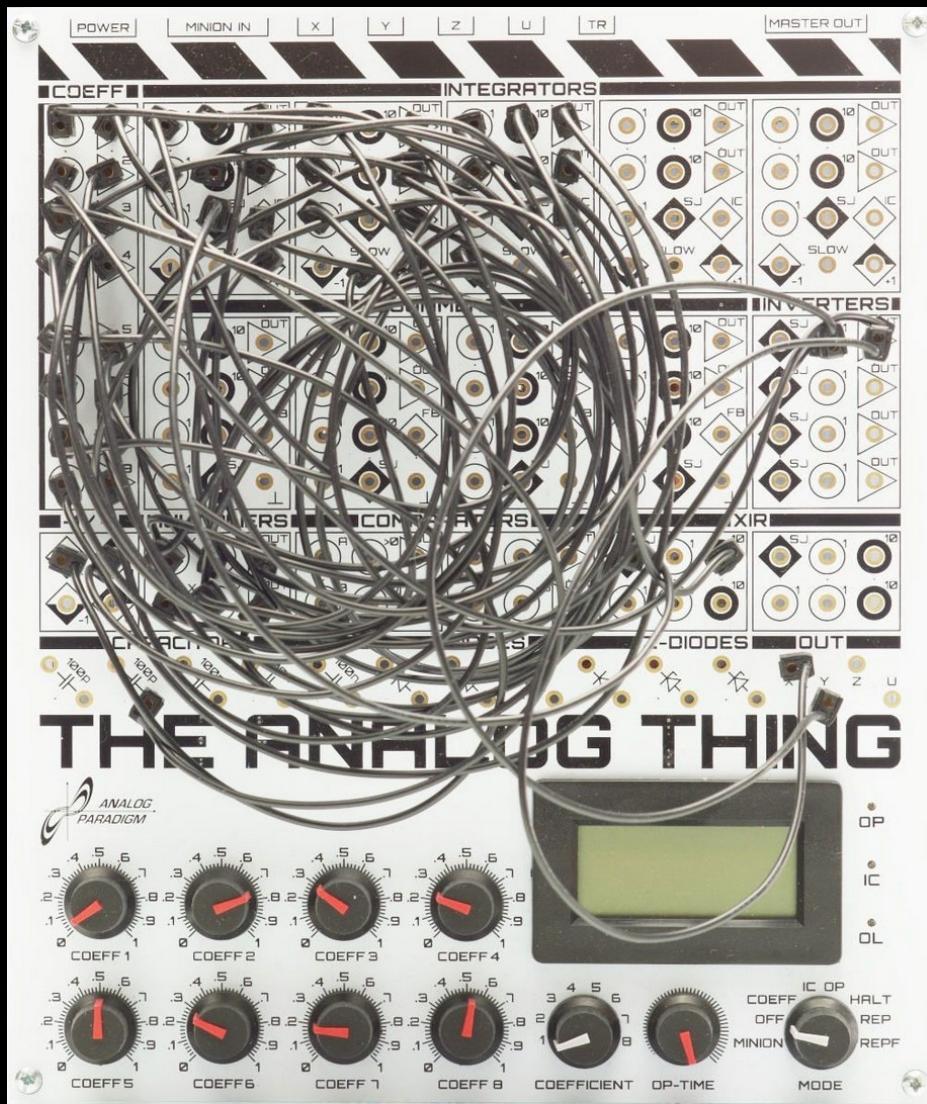


$$\begin{aligned}
 -x &= -\int 1.8y - x \, dt + C \\
 -z &= -\int 1.5xy - 0.2667z \, dt \\
 s &= -(1 - 2.68z) \\
 r &= -xs \\
 -y &= -\int 1.536r - 0.1y \, dt
 \end{aligned}$$

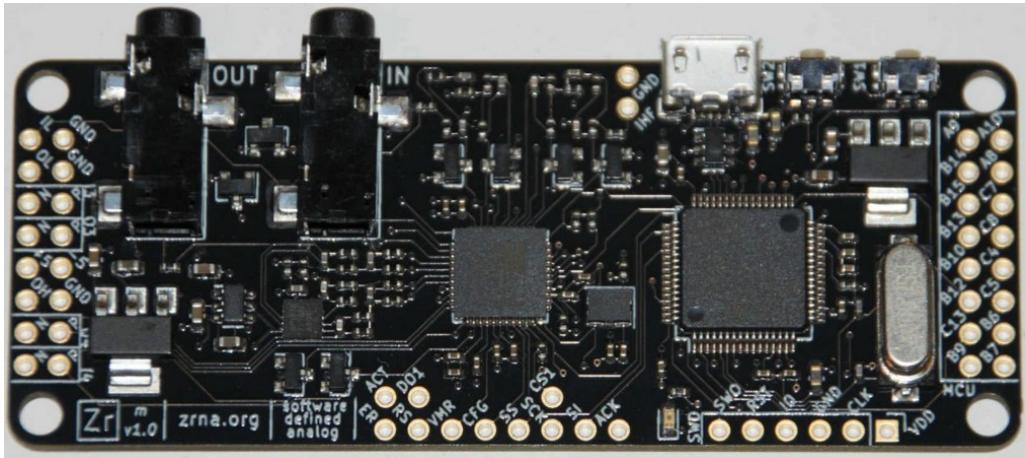


# Unsere Vision

Integration eines  
Analogrechners auf  
einen Mikrochip.

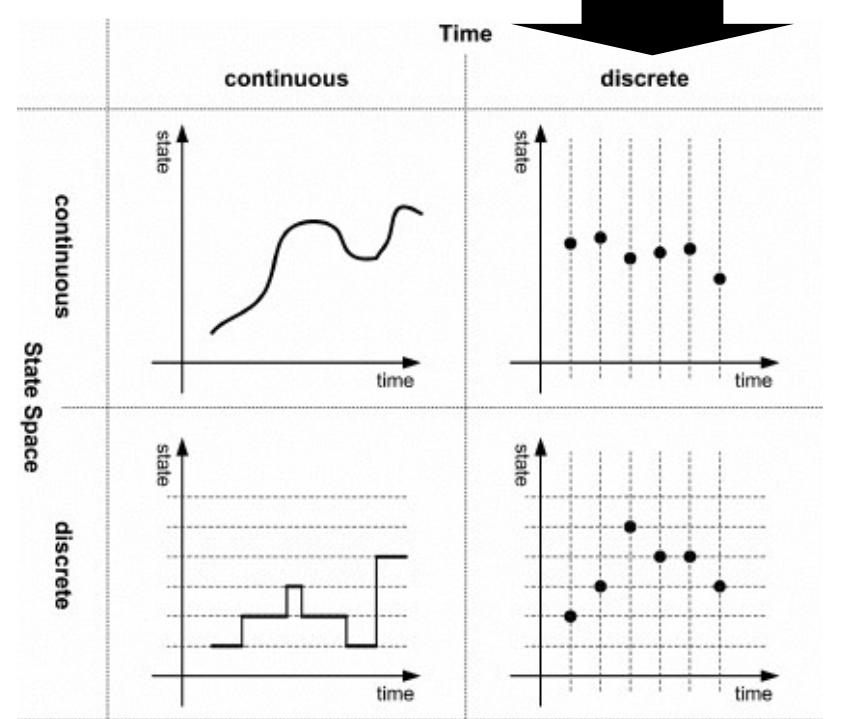


# Field Programmable Analog Arrays zB. Der ZRNA (nutzt Anadigm Inc.)



[<http://zrna.org>]

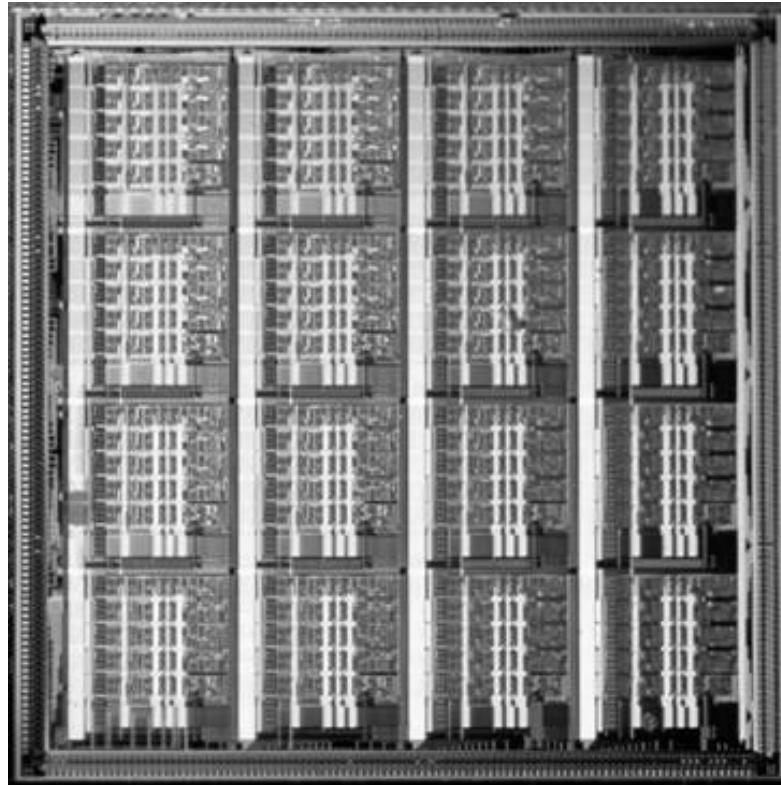
Switched capacitor configurable  
analog blocks (CABs)



[10.14279/tuj.eceasst.27.385]

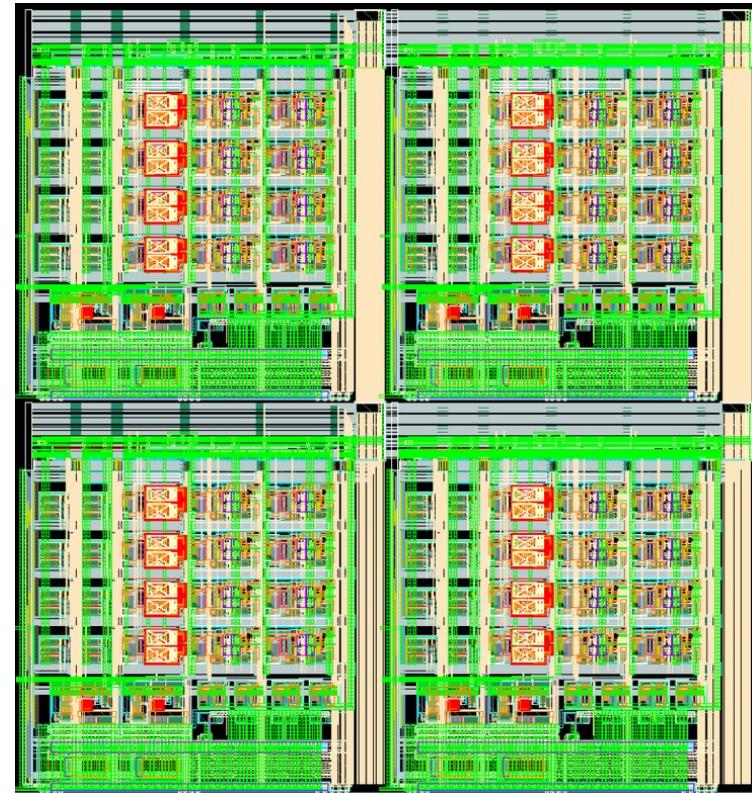
# Die ersten Analogrechner-on-Chip

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

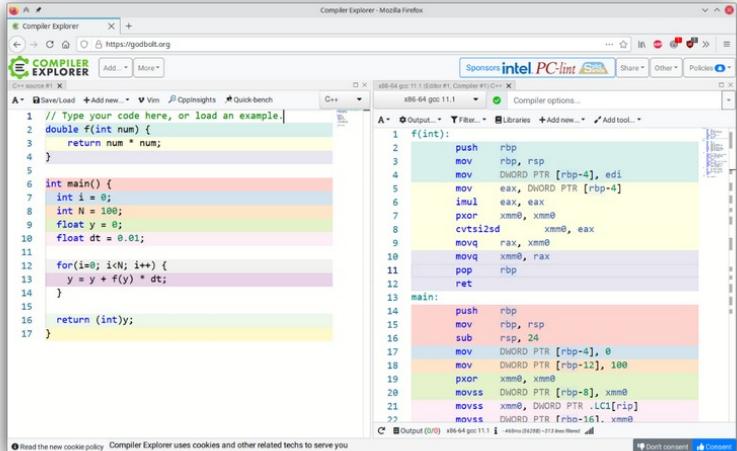
(Energy-Efficient Hybrid A/D Approx Comp. In Continuous Time, IEEE Journal of Solid-State-Circuits)

# Digitalrechner: Das „Hello World“ aus der Numerik

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

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

**5** Kompilieren und laufen lassen



The screenshot shows the Compiler Explorer interface. On the left, a C++ code editor displays a simple program that calculates the sum of integers from 0 to N. On the right, the assembly output window shows the generated assembly code for an x86-64 architecture using GCC 11.1. The assembly code includes standard prologue and epilogue instructions, memory operations (MOV, IMUL, PXOR), and floating-point operations (CVTSL2SD, MOVQ).

```
1 // Type your code here, or load an example.
2 double f(int num) {
3     return num * num;
4 }
5
6 int main() {
7     int i = 0;
8     int N = 100;
9     float y = 0;
10    float dt = 0.01;
11
12    for(i=0; i<N; i++) {
13        y = y + f(y) * dt;
14    }
15
16    return (int)y;
17 }
```

```
1 #int:
2     push    rbp
3     mov     rbp, rsp
4     mov     DWORD PTR [rbp-4], edi
5     mov     eax, DWORD PTR [rbp-4]
6     imul   eax, eax
7     pxor   xmm0, xmm0, eax
8     cvtsi2sd    xmm0, eax
9     movq   rax, xmm0
10    movq   xmm0, rax
11    pop    rbp
12    ret
13 main:
14     push    rbp
15     mov     rbp, rsp
16     sub    rsp, 24
17     mov     DWORD PTR [rbp-4], 0
18     mov     DWORD PTR [rbp-12], 100
19     pxor   xmm0, xmm0
20     movss  DWORD PTR [rbp-8], xmm0
21     movss  xmm0, DWORD PTR .LC1[rip]
22     movss  xmm0, DWORD PTR [rbp-16].xmm0
```

**2** Umschreibung in Integralgleichung:

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

**3** Diskretisierung

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

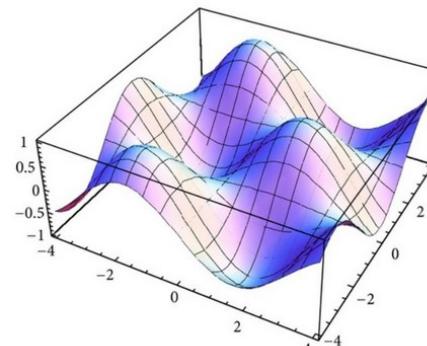
**4** Programmierung

```
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);
}
```

**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

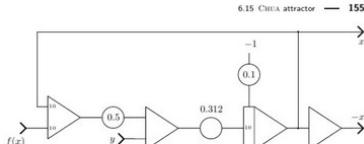
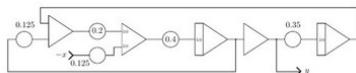


Fig. 6.50. Partial computer setup for equations (6.40, 6.41, 6.42, 6.43)



**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)))

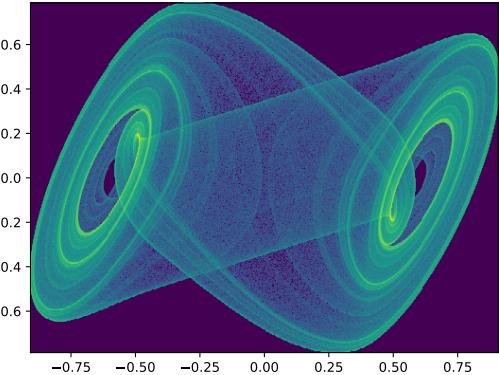
z = int(mult(3.5, y, dt, 0))

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))

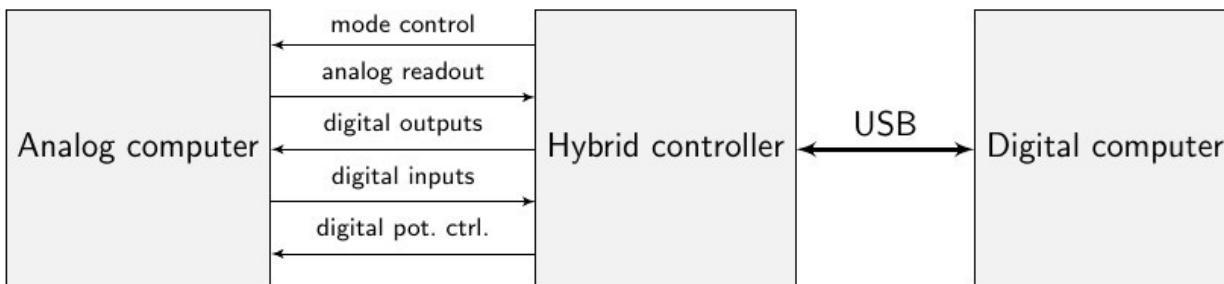
dt = const(0.001)
```

**5**

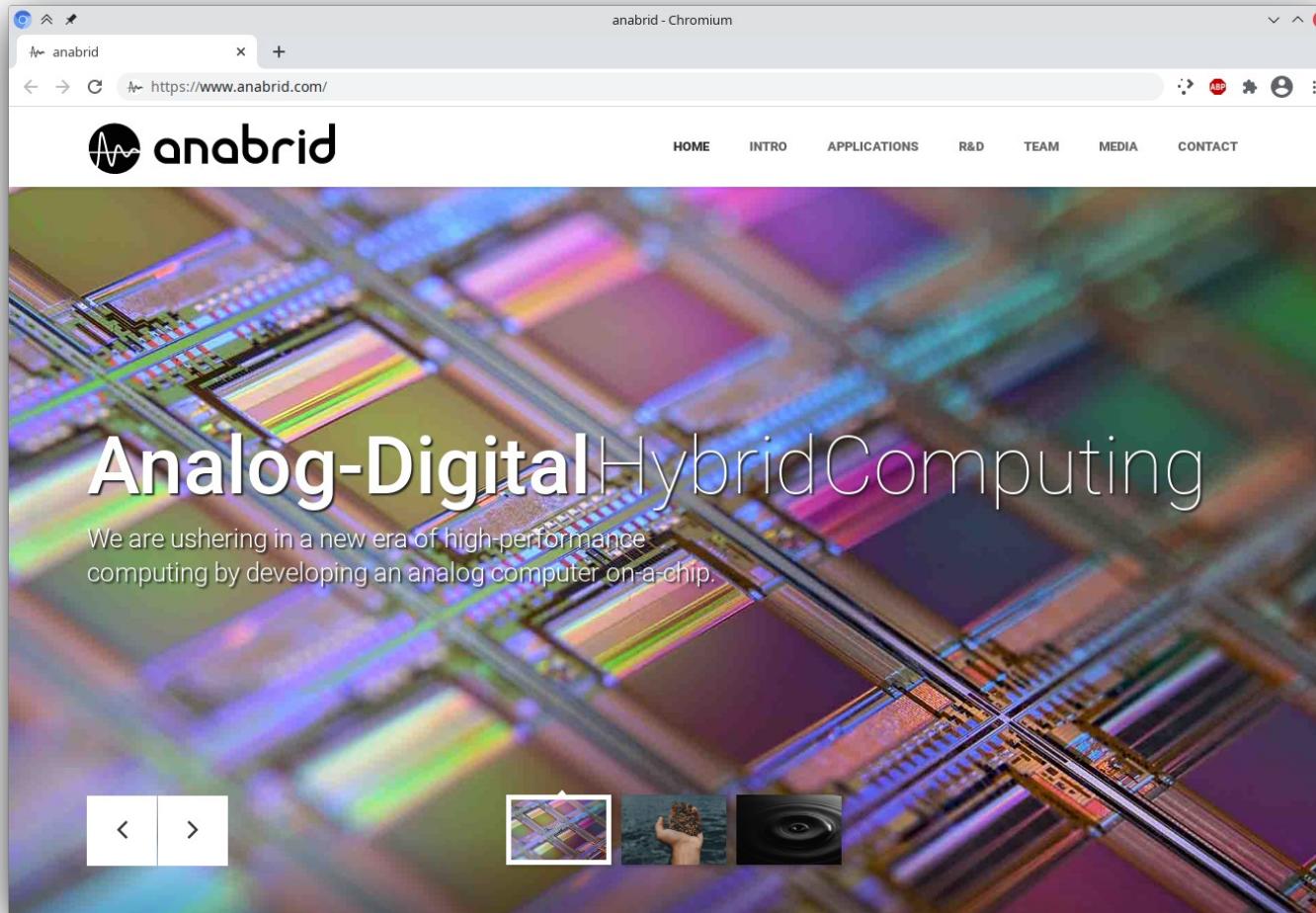
Laufen + Auswerten



Hieran arbeiten wir.



# Analogcomputer on a Chip: [www.anabrid.com](https://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](http://the-analog-thing.org)

