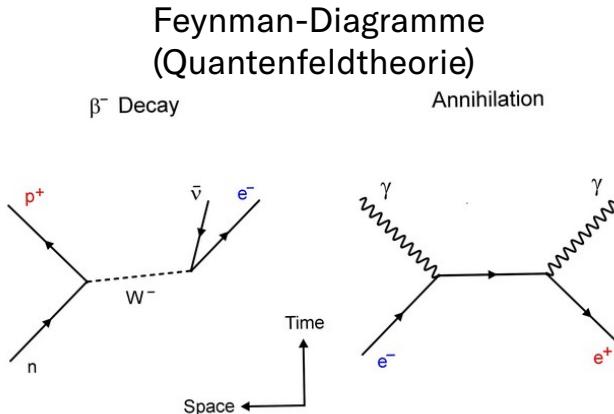
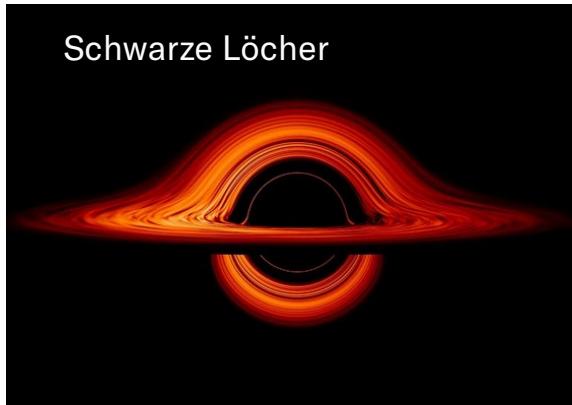


# **Die Zukunft ist Analog – wenn Digitalcomputern die Luft ausgeht**

Dr. Sven Köppel

Night Of Science, 18. Juni 2021  
Goethe-Universität Frankfurt

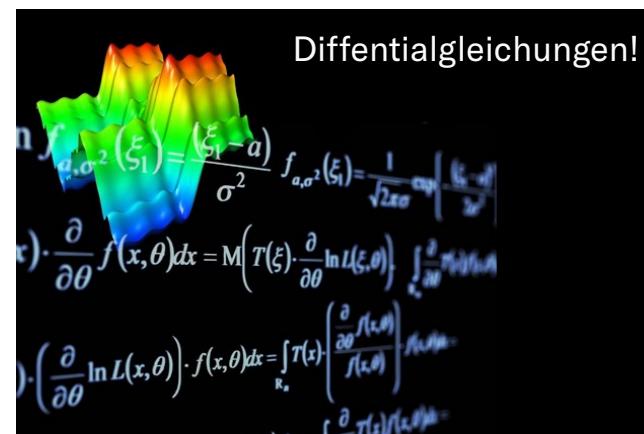
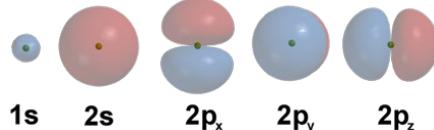
# Was machen eigentlich theoretische Physiker:innen? Zum Beispiel...



Quantenmechanik

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

THE SCHROEDINGER EQUATION



General Relativity

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

curvature of spacetime      expanding universe      all mass and energy in the universe

Einstein tensor      cosmological constant      metric tensor

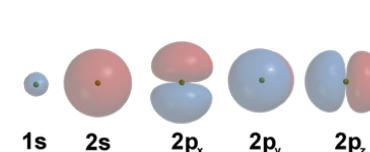
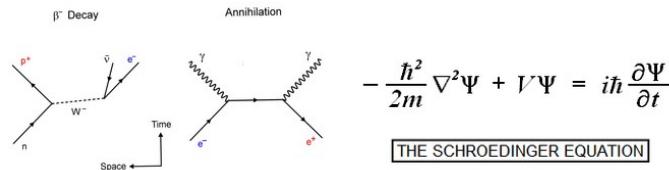
energy-momentum tensor

# Was machen eigentlich theoretische Physiker:innen? Zum Beispiel...

- \* Theoriefindung und mathematische Modelle
- \* Vorhersagen, Visualisierungen

Häufig unter Verwendung von:

- \* Approximationen (Näherungen, Vereinfachungen, Entwicklungen)
- \* Hilfsmitteln (z.B. Computern)



**General Relativity**

curvature expanding universe  
all mass and energy in the universe  
 $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Einstein tensor  
curvature tensor  
energy-momentum tensor

# Computational Physics: Das „Hello World“ aus der Analysis

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

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

2 Umschreibung in Integralgleichung:

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

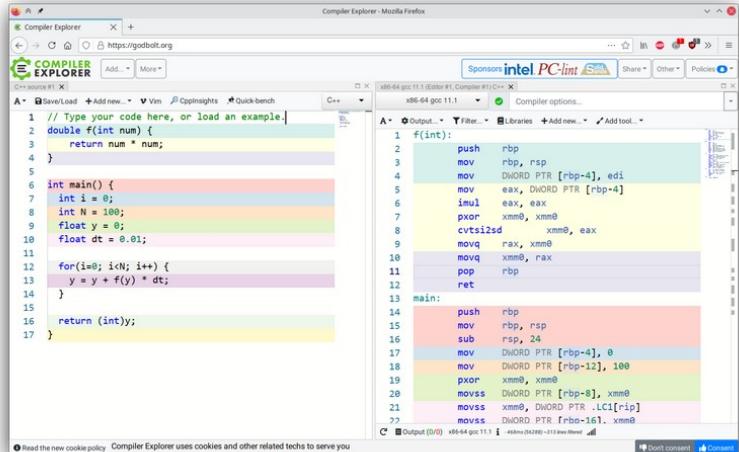
3 Diskretisierung

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

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

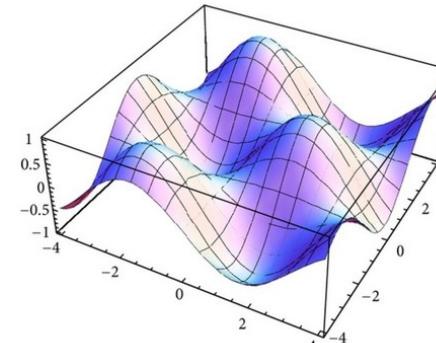


The screenshot shows the Compiler Explorer interface. On the left, a C++ code editor displays a simple program that calculates the sum of squares of integers from 0 to N. On the right, the assembly output window shows the generated assembly code for an x86-64 architecture, including instructions like push rbp, mov rbp, rsp, and various floating-point operations.

```
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 f(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  
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 DWORD PTR [rbp-16], xmm0  
23
```

6 Auswerten



Mathematica

7 Nochmal laufen lassen ;-)



# Warum werden Computer heiss?

Landauer-Prinzip! [R. Landauer 1961]

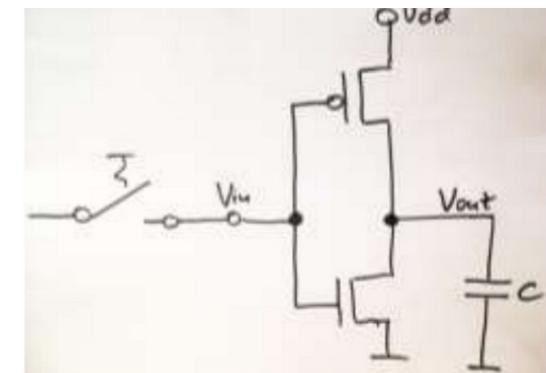
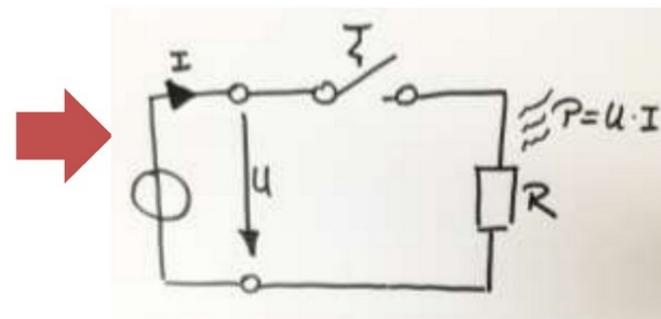
$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Signalverarbeitung}} + E_{\text{Wärme}}$$

Landauer-Limit (bei Raumtemperatur):

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

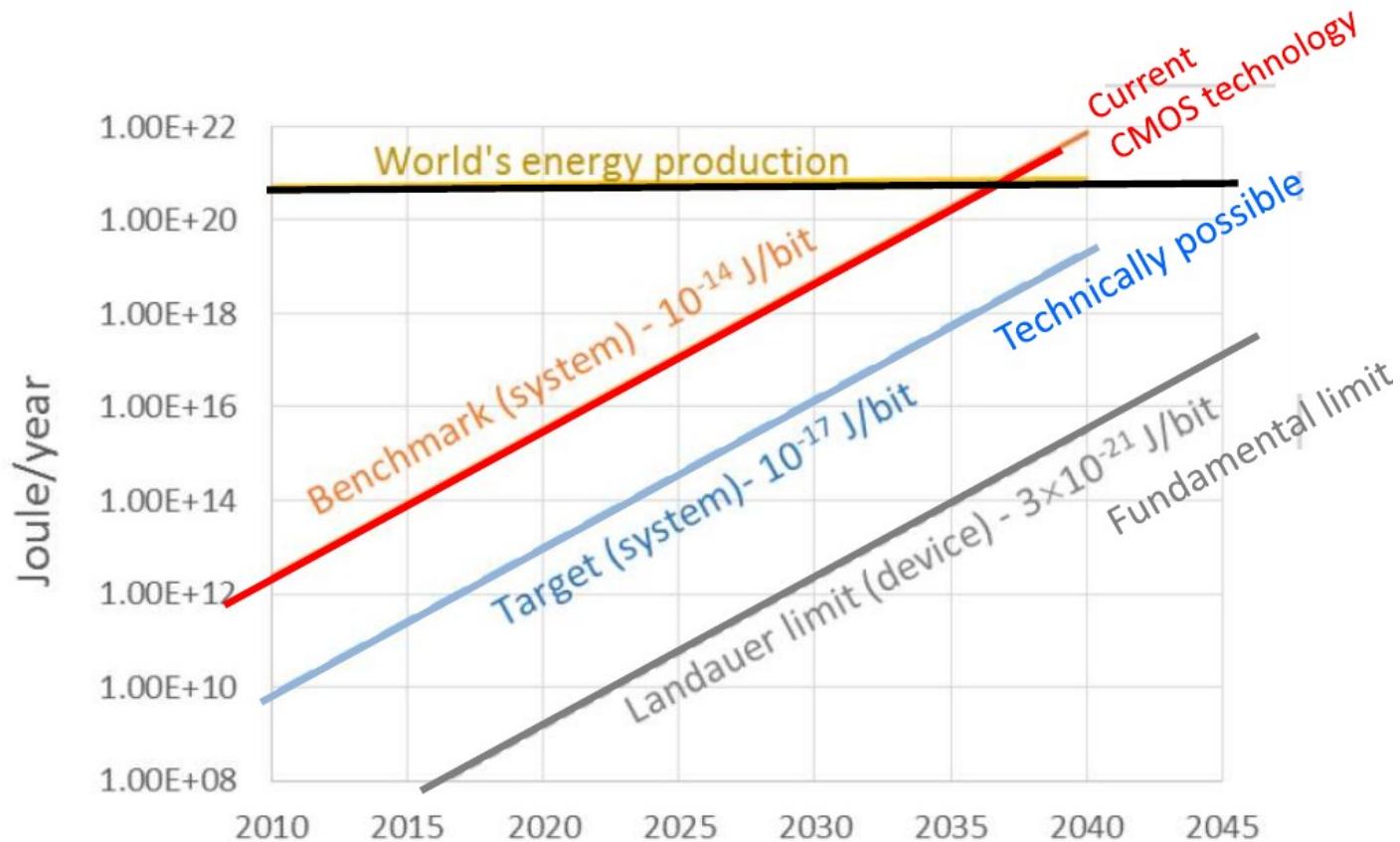


<https://www.lecker.de/wie-macht-man-das-perfekte-spiegelei-71193.html>



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

# Schalten erzeugt Wärme: Und zwar global relevant viel!



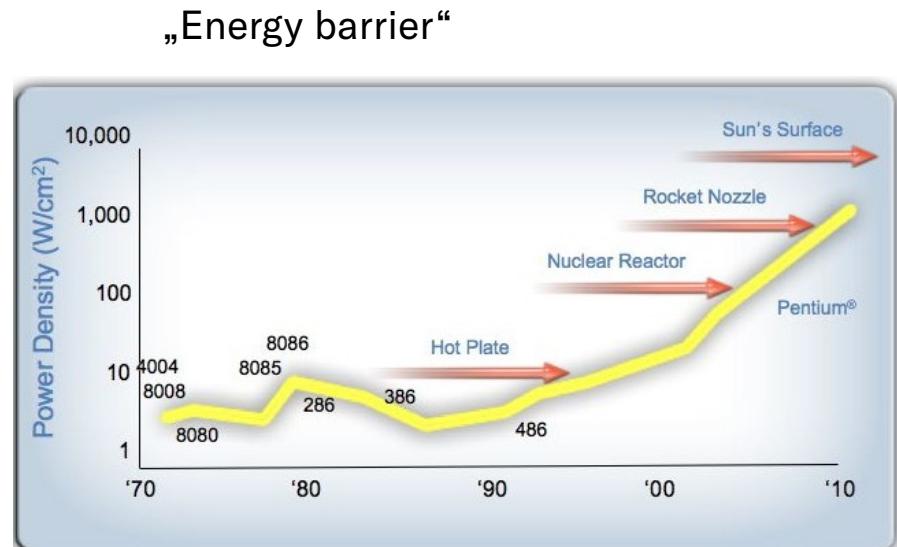
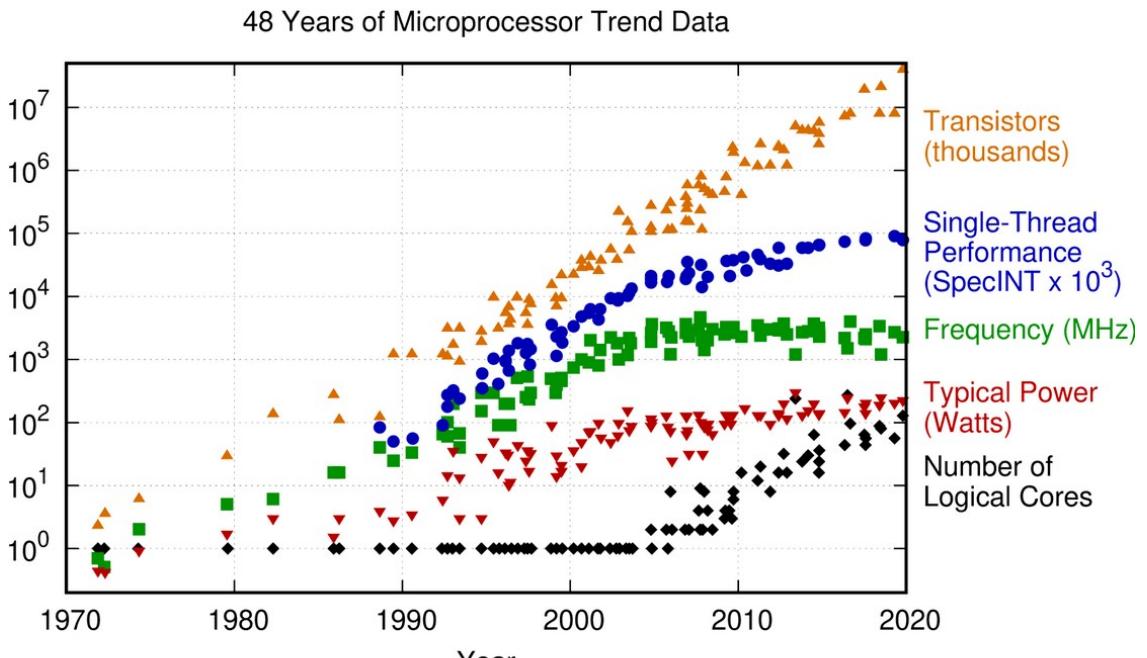
„Informationskatastrophe“

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

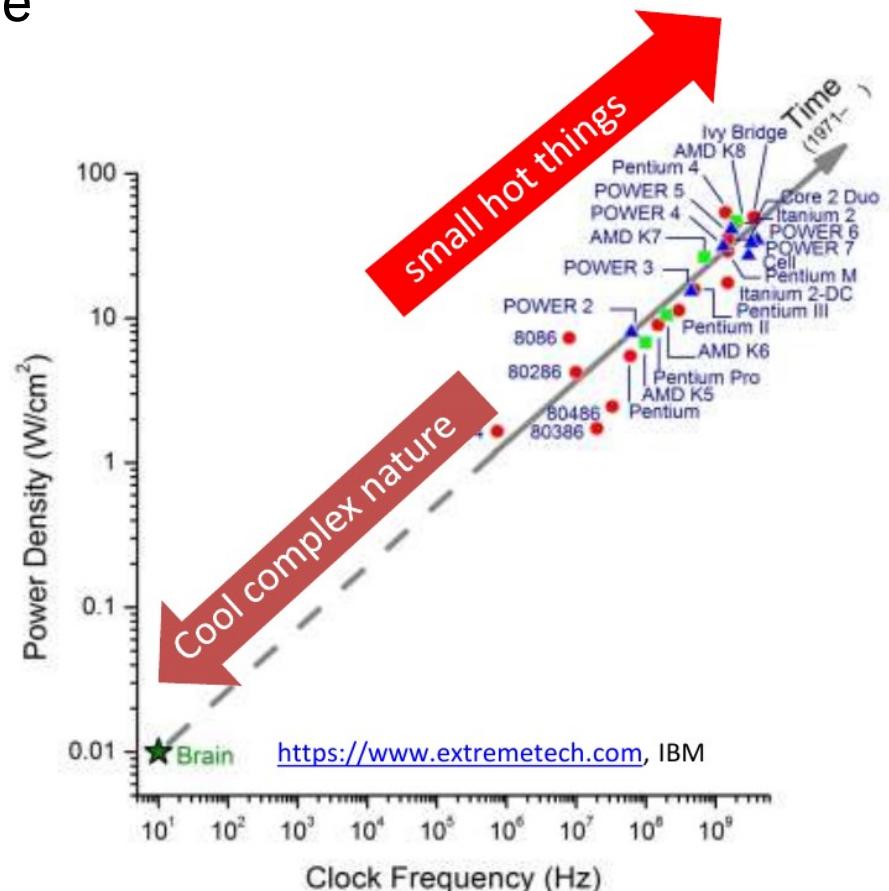
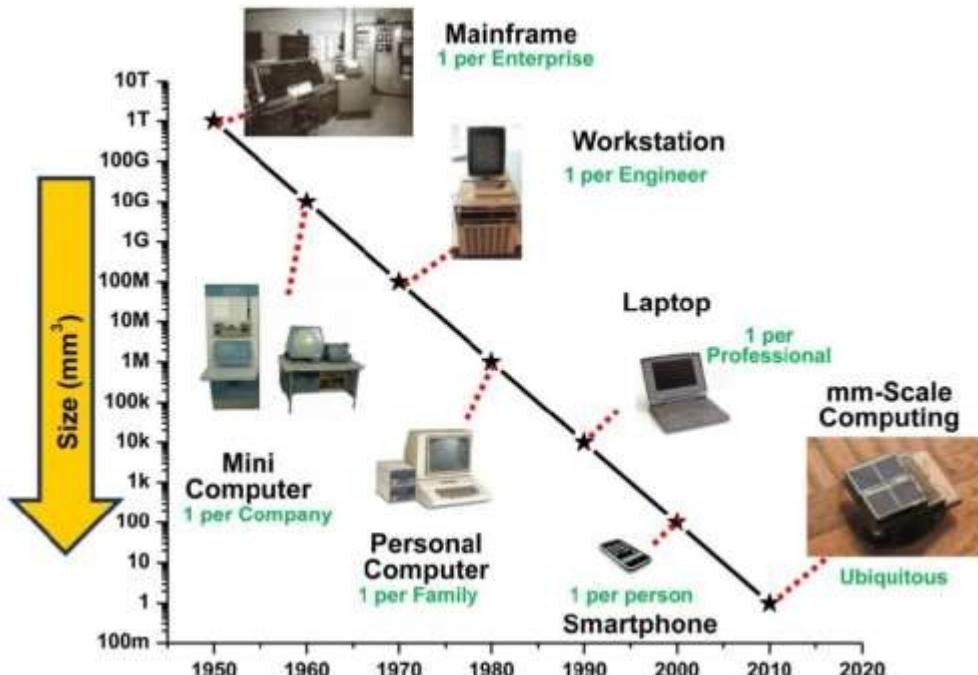
Klimawandel?

# Wärmeentwicklung: Fortschritte und Trends

„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.

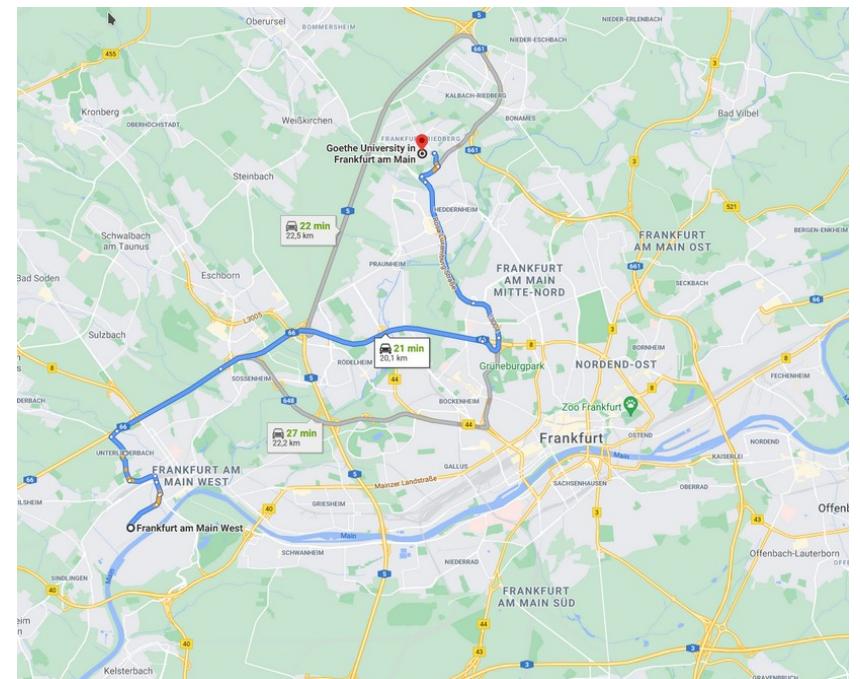
# Wenn nicht schneller, dann mehr davon! Etwa im Industriepark Höchst



Cluster aus 622 Einzelcomputern („Node“)  
Wassergekühlte Schränke  
100-800 GB RAM pro Computer

Center for Scientific Computing an der Uni  
Frankfurt, beheimatet im Institut für  
theoretische Physik.

Loewe-CSC / Goethe-HLR  
2010 Spaltenplatz im „Green 500“

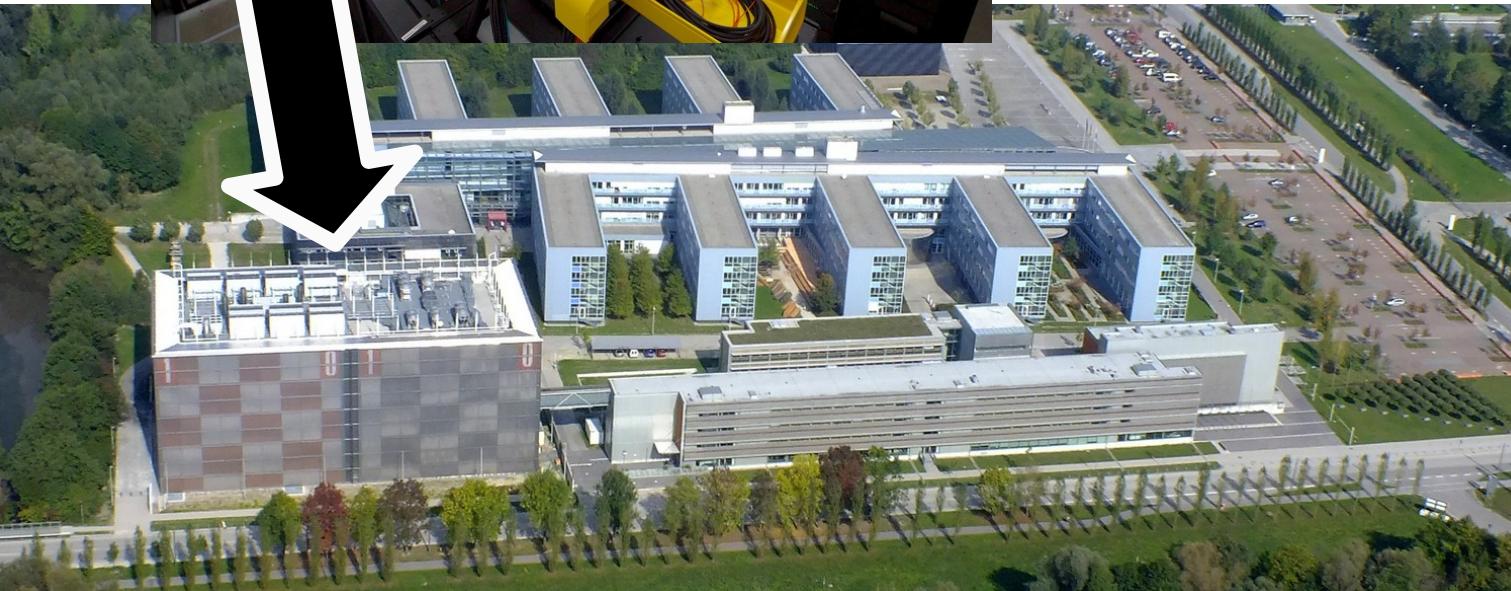


# Noch mehr Rechner! Gauss Centre for Supercomputing



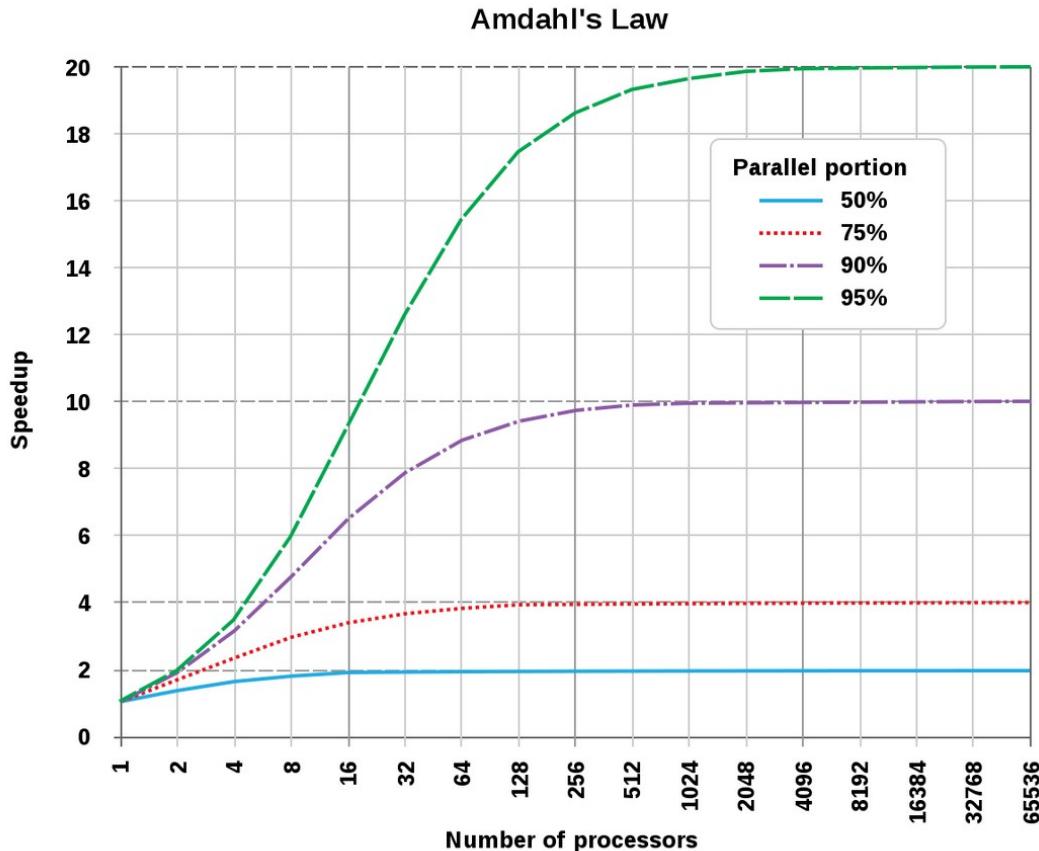
zB. der SuperMUC am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München (TUM/LMU)

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



PARTNERSHIP FOR ADVANCED COMPUTING IN EUROPE

# 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



*„There's plenty of Room at the Bottom“*  
– Richard Feynman

Wo geht die Reise bei der Hochintegration hin?

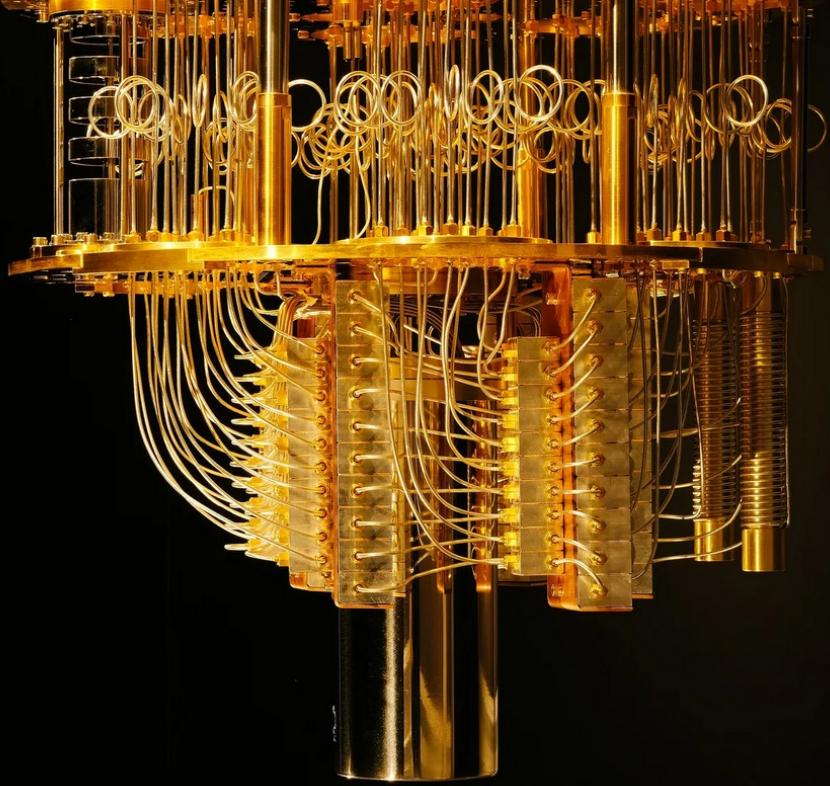
Was ist Forschungsgegenstand?

# Exotic Computing:

## Neues aus der Grundlagenforschung

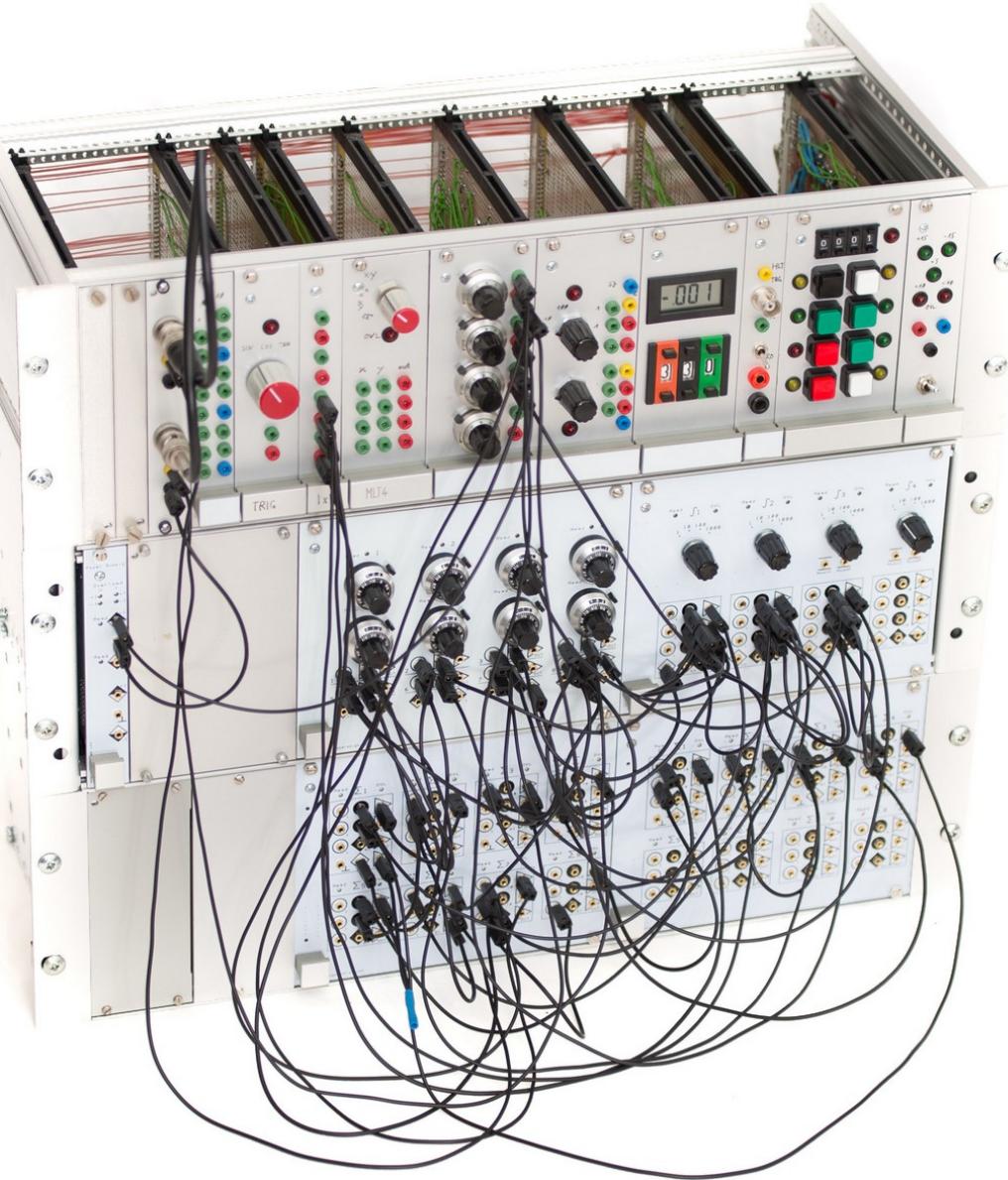
- Spintronik, Photonisches Rechnen
- Quantencomputing
- AI & Neuromorphic Computing
- Memristoren, Computational Memory & Von Neumann Bottleneck
- Analogrechnen

Viel Materialforschung  
Viele interdisziplinäre Verbindungen



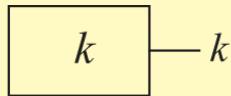
IBM Q System One

# Die Rückkehr des Analogrechners

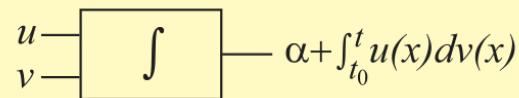


- Namensgebend ist die Analogiebildung mit **elektrischen Schaltkreisen**.
- Intrinsic parallel **Datenflussverarbeitung** statt sequentieller Algorithmen.
- Extrem **energieeffizient**: Jedes Elektron zählt.
- Kontinuierliche Werte und **kontinuierliche Zeit**: Kein Takt.

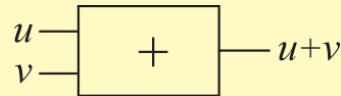
# Bausteine des Analogrechners! The General Purpose Analog Computer



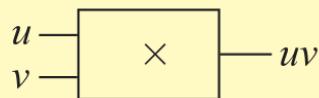
A constant unit associated to



An integrator unit



An adder unit



A multiplier unit

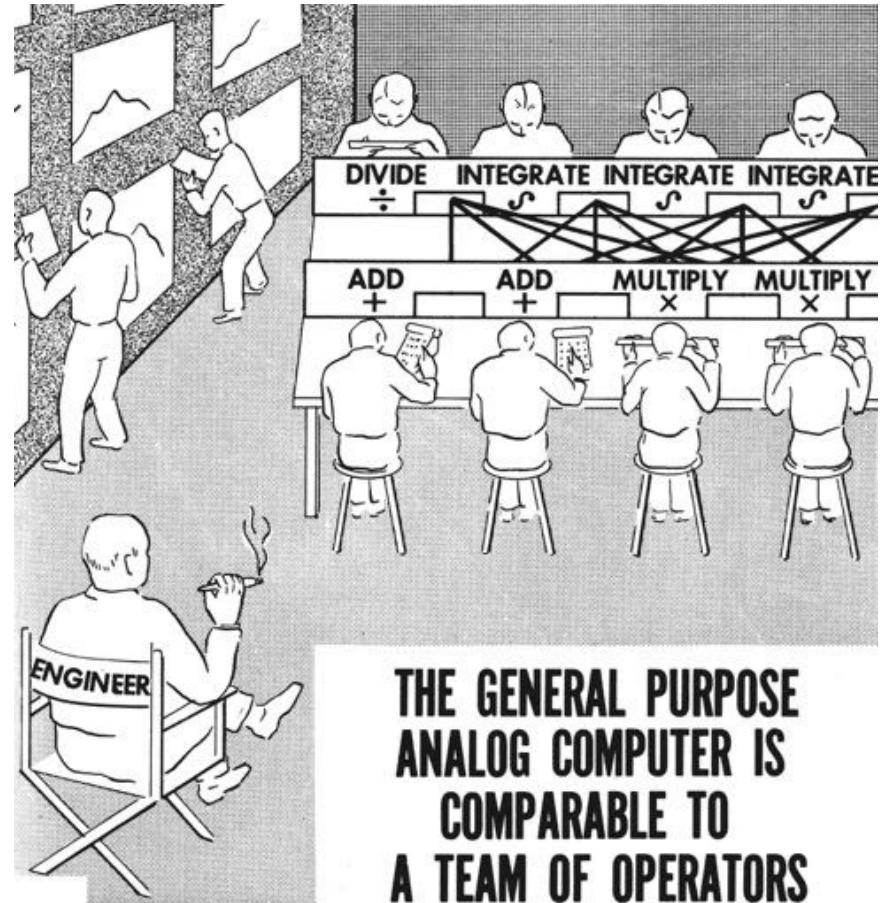
Claude Shannon [1941] hat für Analogrechner gemacht, was Turing für Digitalrechner gemacht hat.

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

**A DIGITAL COMPUTER** is equivalent to a very reliable,  
highly paid, exceptionally fast

(300 to 10,000  
operations/second)

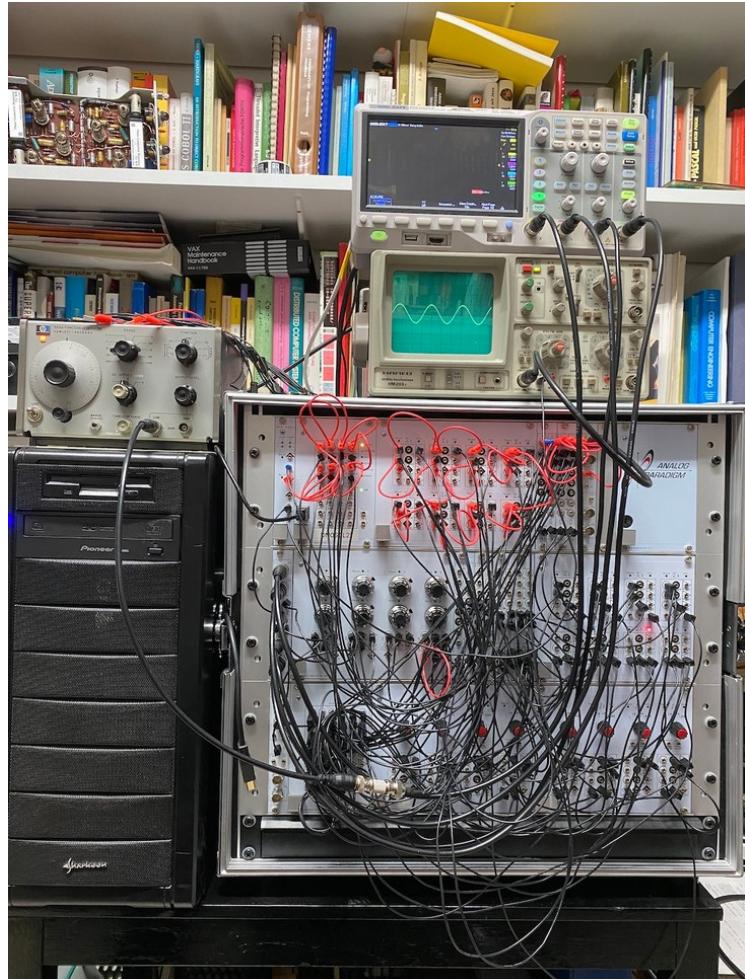
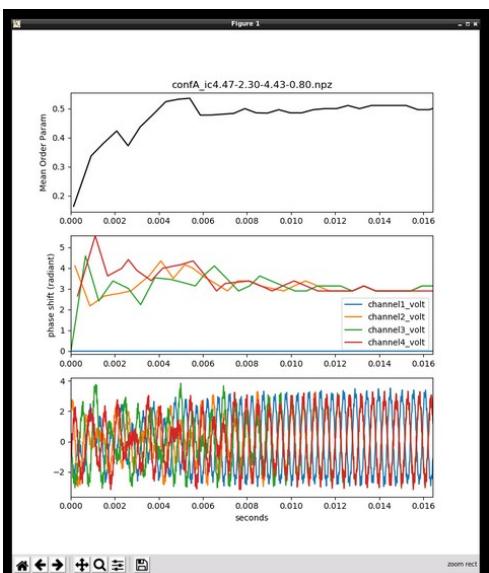
## DESK CALCULATOR OPERATOR



**THE GENERAL PURPOSE  
ANALOG COMPUTER IS  
COMPARABLE TO  
A TEAM OF OPERATORS**

# 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



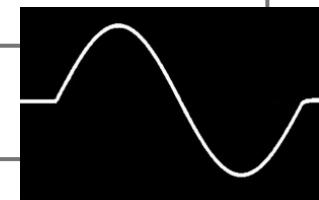
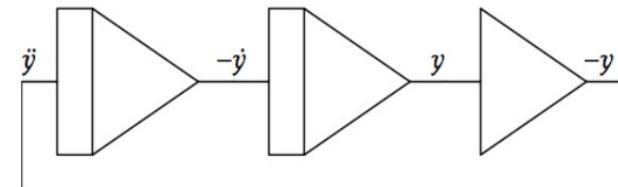
# Analogrechnen: Ein Beispielprogramm

Harmonischer Oszillatior:

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

Umschreiben zu:

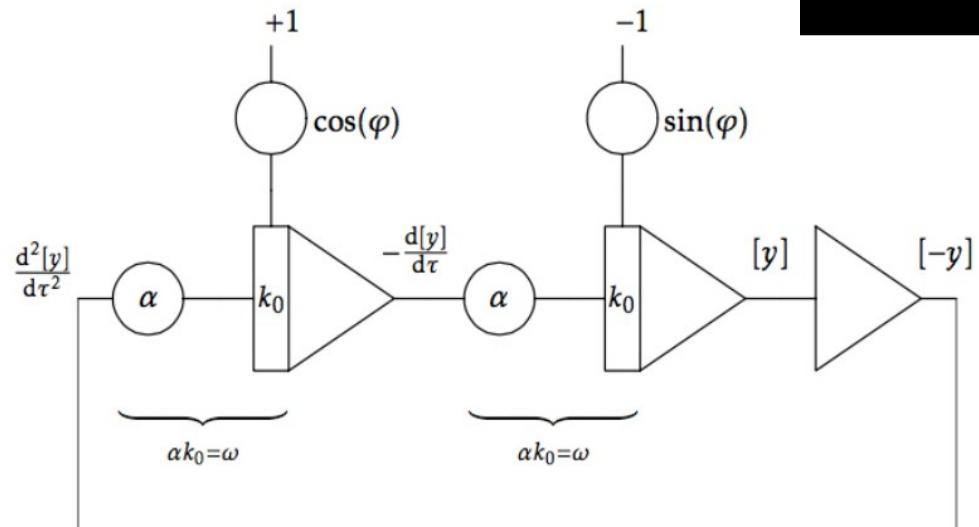
$$\ddot{y} = -y \quad (\text{mit } \omega = 1)$$



Mit Anfangswerten und Allgemein:

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

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



# 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

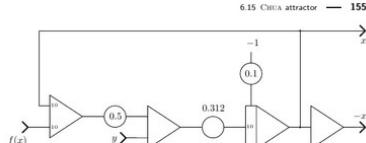
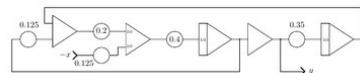


Fig. 6.50. Partial computer setup for equations (6.40, 6.41, 6.42, 6.43)



**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)

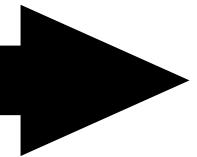
f1 = abs(sum(mult(0.7143, x), 0.2857))
f2 = abs(sum(mult(0.7143, x), -0.2857))
f3 = neg(sum(f1, neg(f2)))
fx = sum(mult(0.714, x), mult(0.3003, f3))

dt = const(0.001)
```

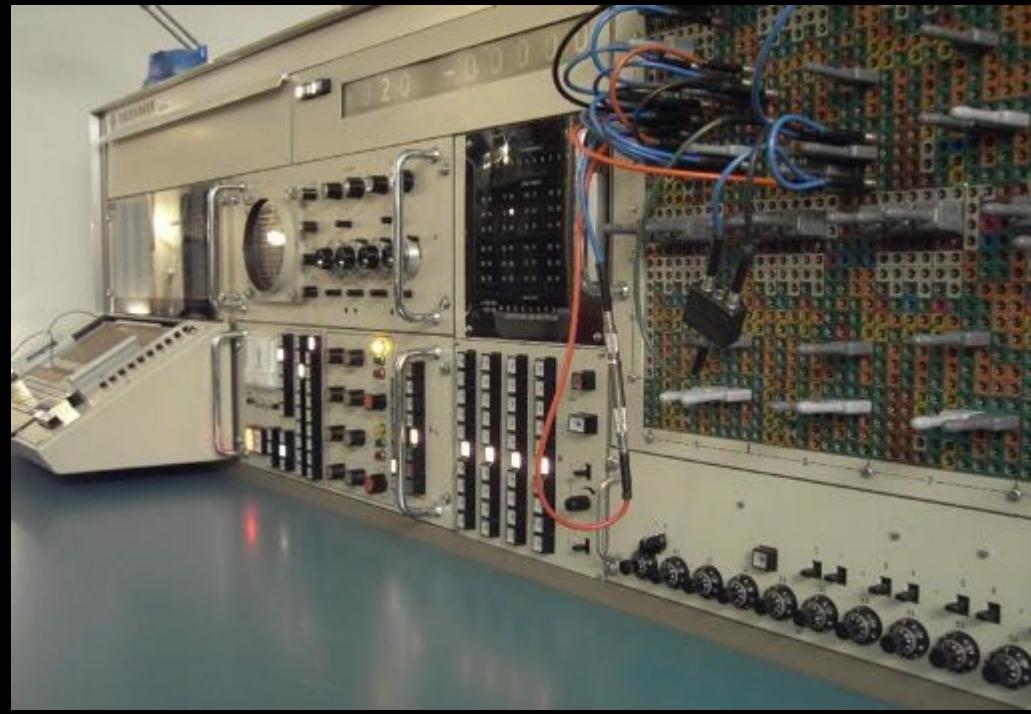
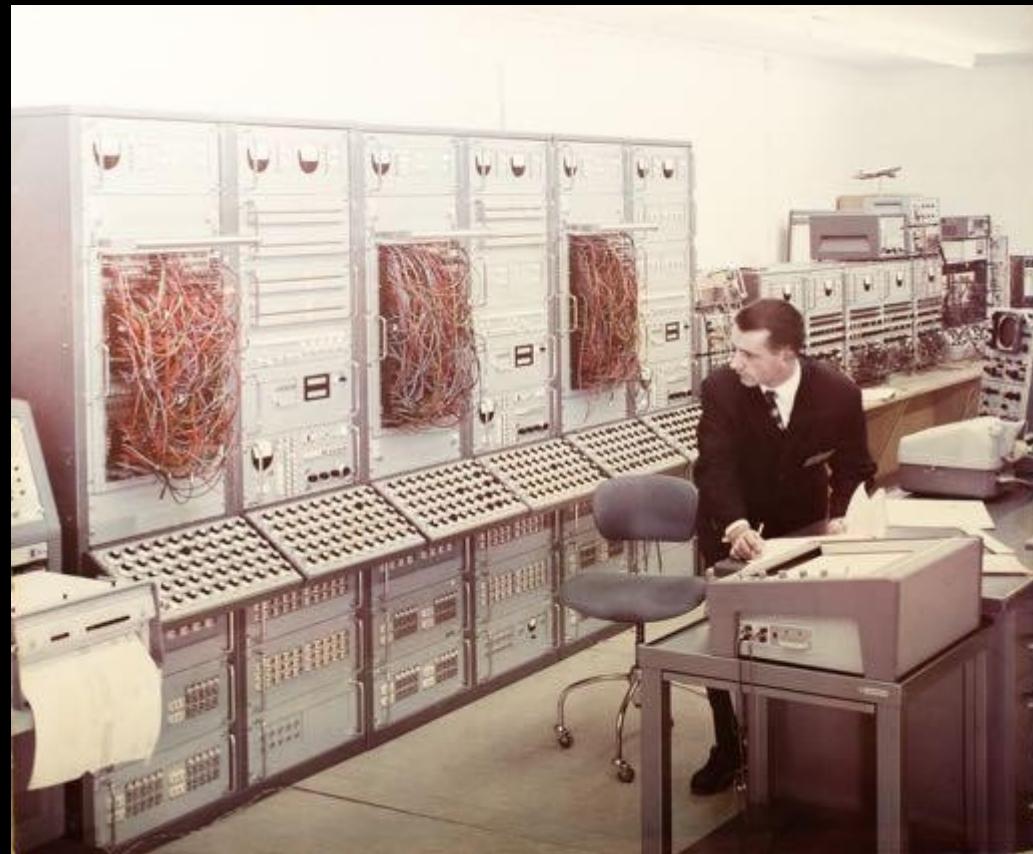
**5**

Laufen + Auswerten

Viele viele Fragestellungen auf dem Weg...



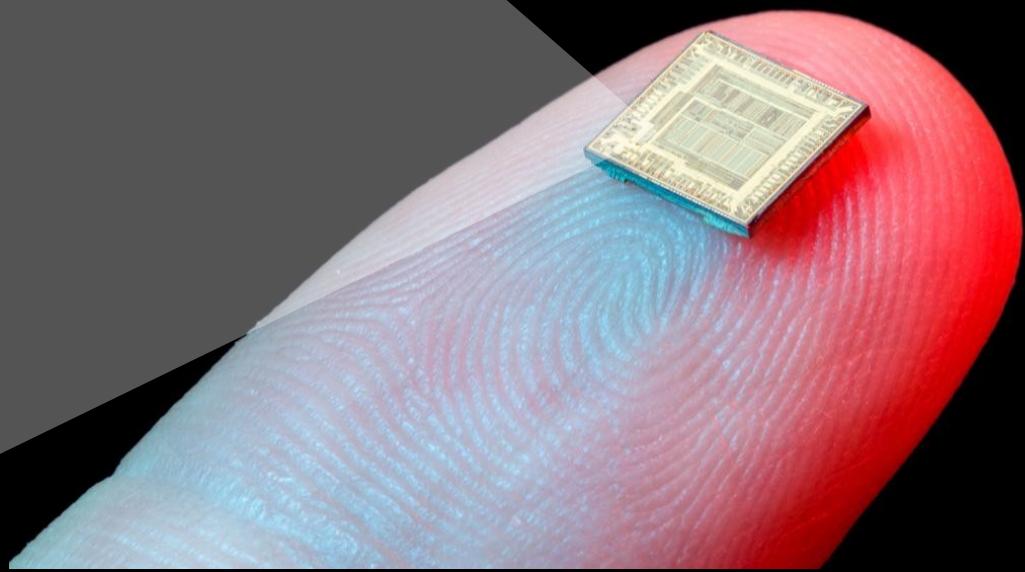
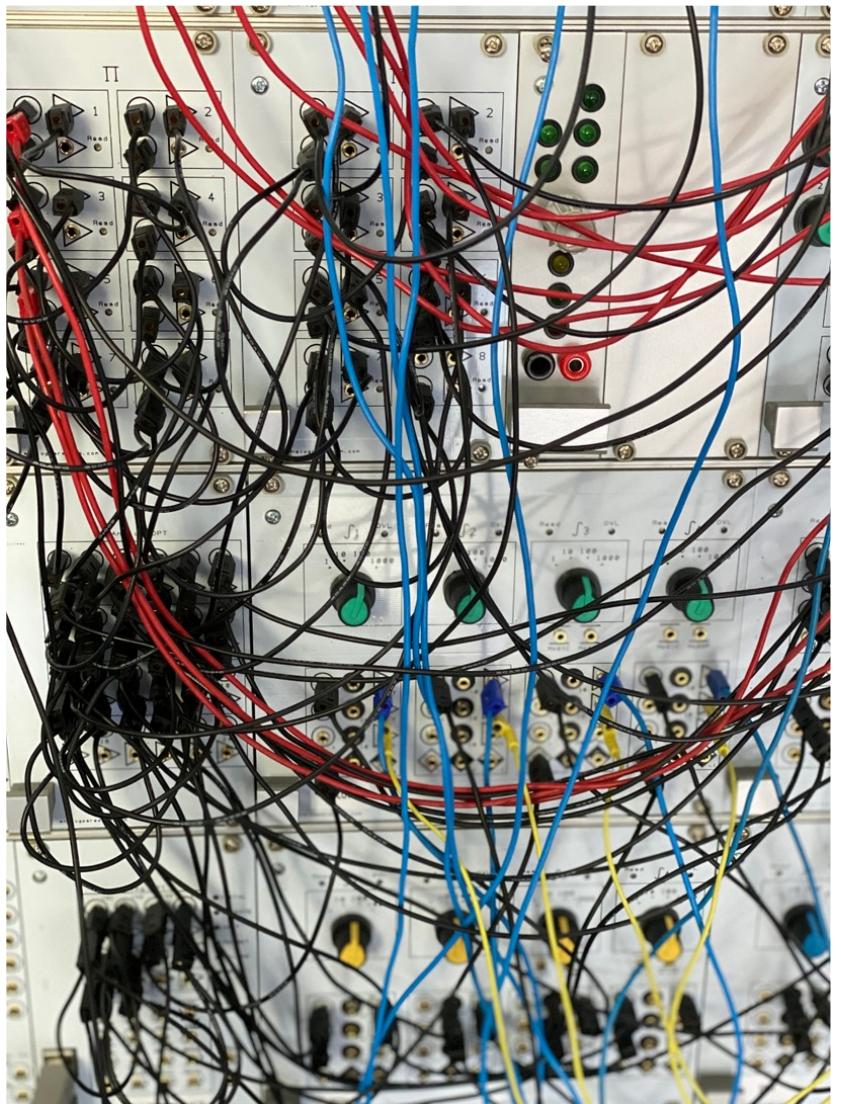
# Historische Analogrechner



Telefunken-Analogrechner aus den 1960ern → [www.analogcomputermuseum.org](http://www.analogcomputermuseum.org)

# Unsere Vision

Integration eines Analogrechners  
auf einen Mikrochip in 2 Jahren.



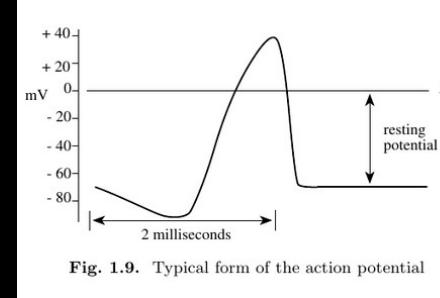
**What for?**

# Anwendungen

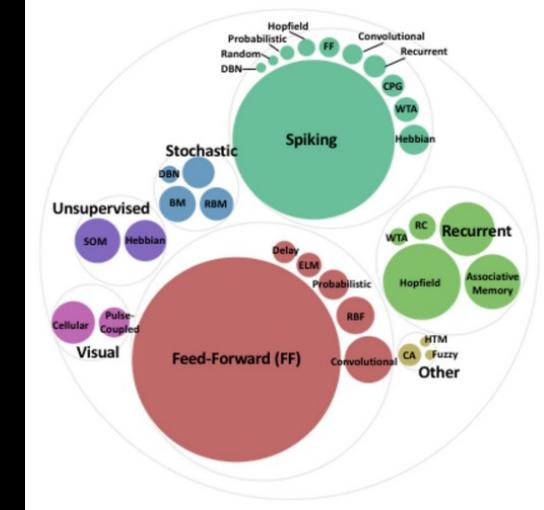
## Artificial Intelligence



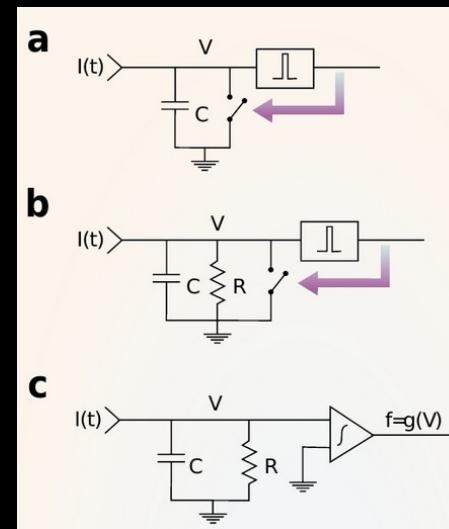
Neuronen sind Analogrechner,  
und analoge CMOS-Technologie  
ist die beste (vorhandene!)  
verfügbare Technologie sie zu  
simulieren.



Rojas: Neural Networks (Springer 1996)



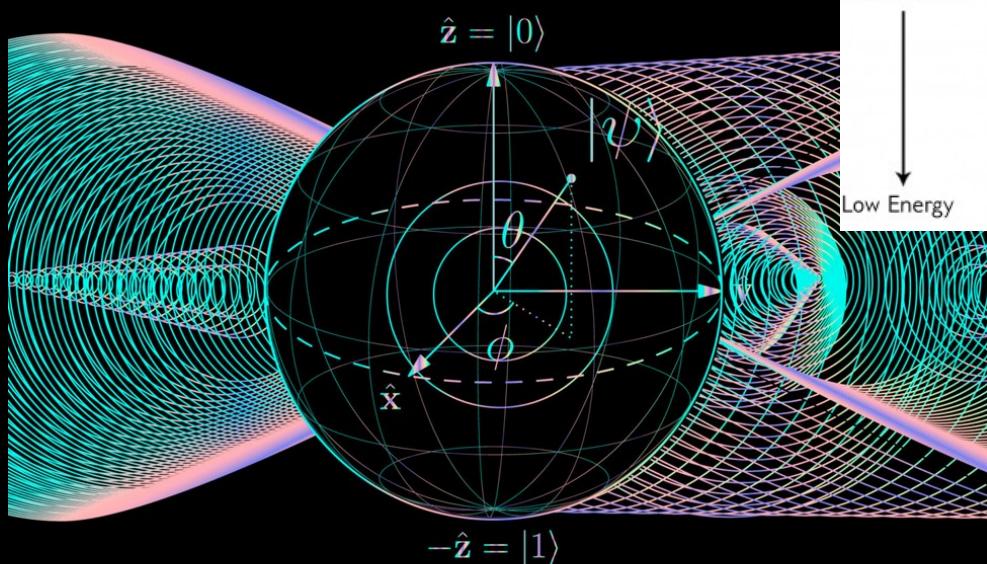
A survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware, [arXiV:1705.06963]



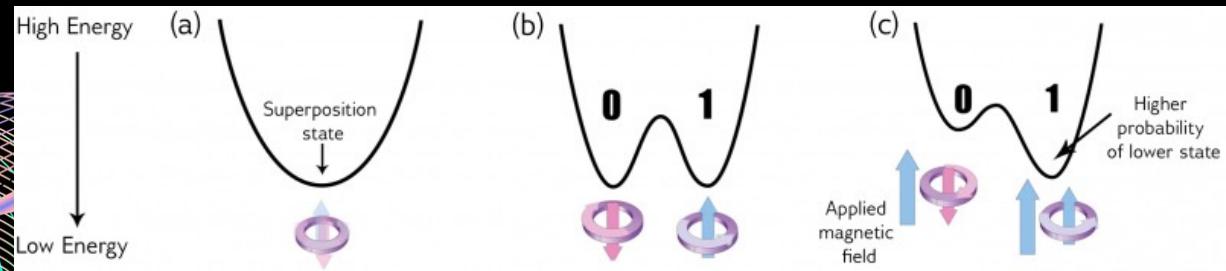
Koch, Segev: The role of single neurons in information processing (Nature neuroscience, vol. 3, 2000)

# Anwendungen

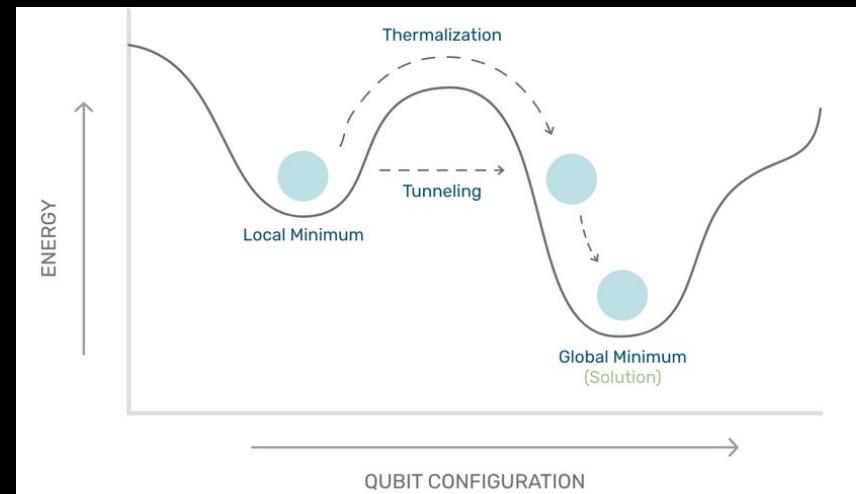
## Quantum Computing



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**.



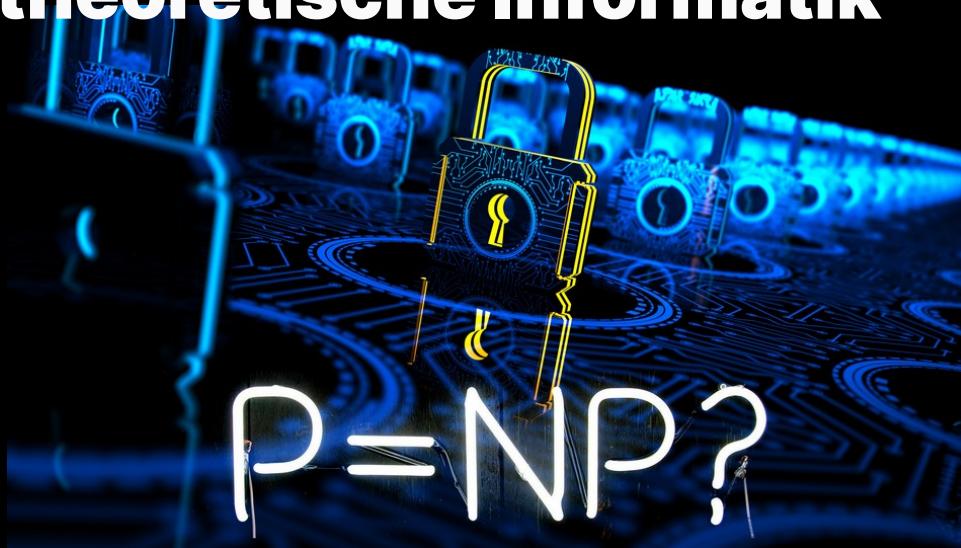
Quanten-Annealer [Bildquelle: DWAVE / blog.aimultiple.com]



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

## Anwendungen

# Verschlüsselung und theoretische Informatik

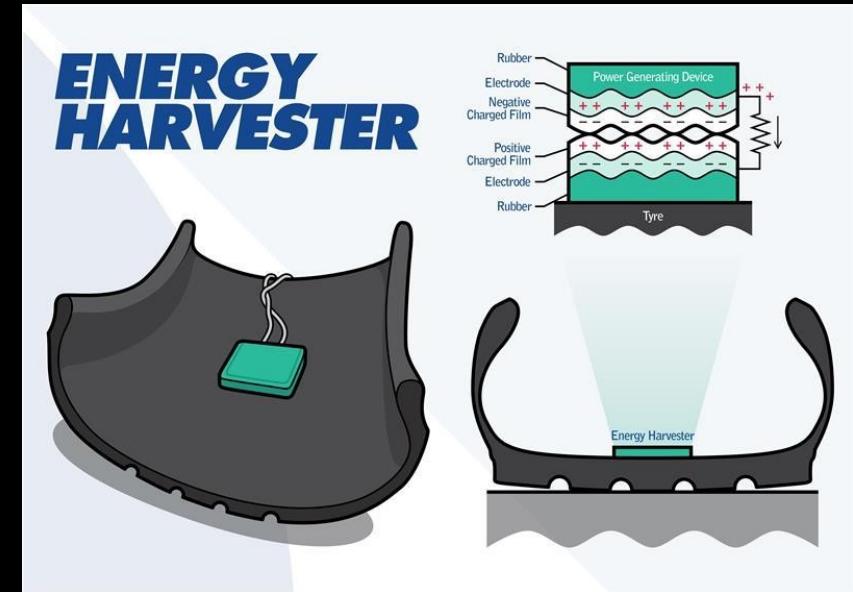
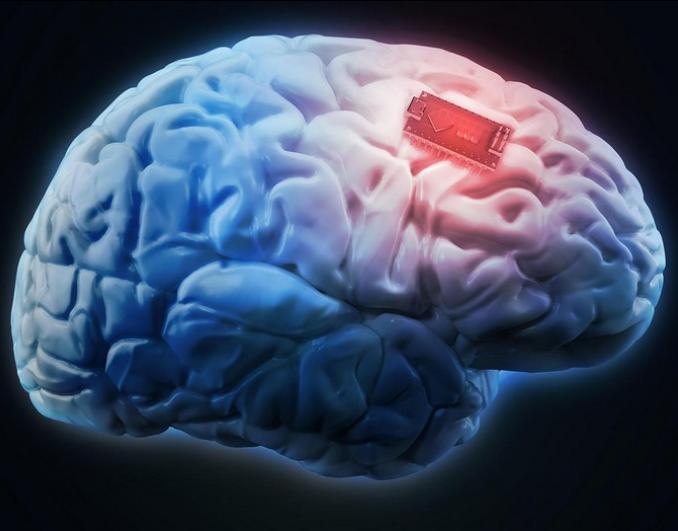


Analgorechner sind Beyond-Turing-Rechner. Sie könnten effizient **kombinatorische Probleme lösen** und Pre-Quantum Verschlüsselung knacken.

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

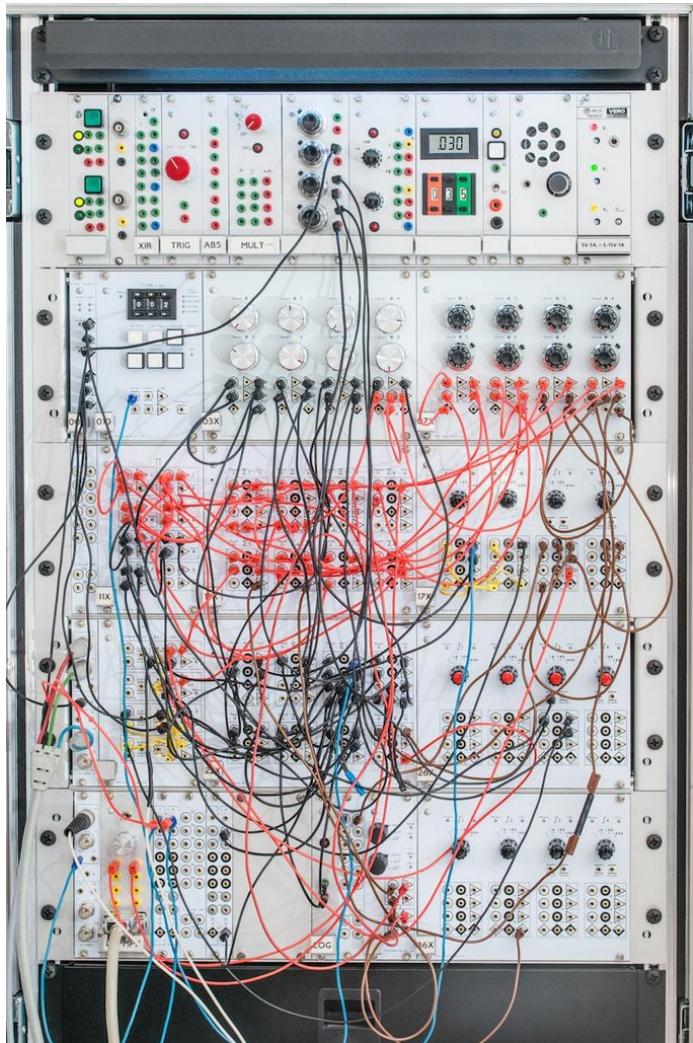
# Anwendungen

## Wearables und Implantate

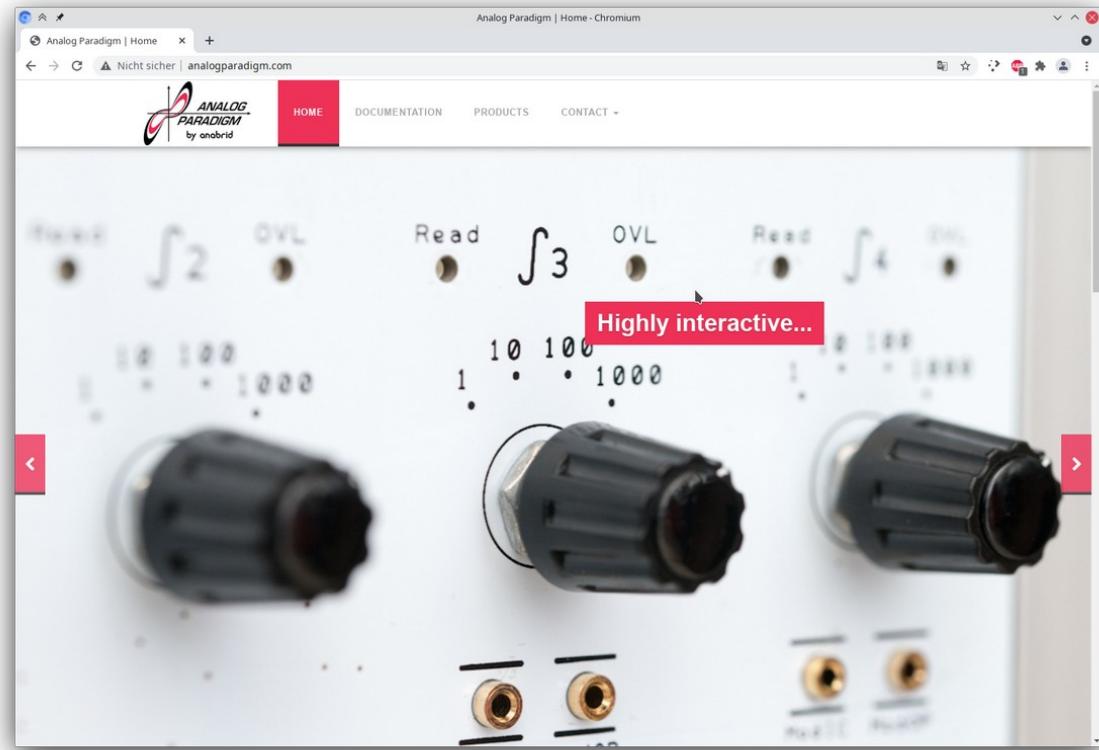


[Bildquelle: markallengroup.com]

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 - Chromium

THE ANALOG THING the-analog-thing.com

anabrid

IMPRINT

**ANALOG PARADIGM**

presents

**THE ANALOG THING**

analog computing of the future  
portable - affordable - eye-opening

available soon

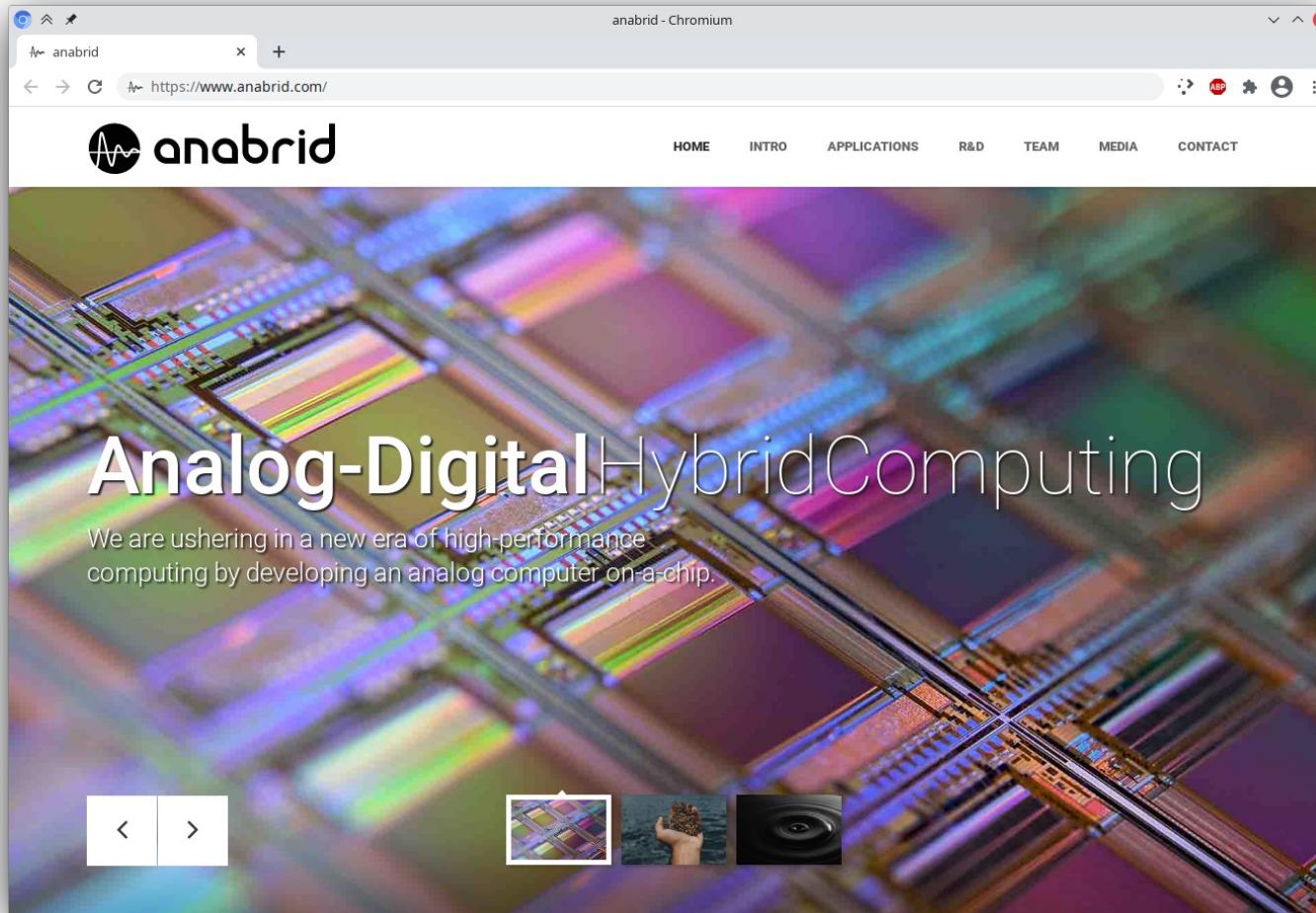
SUBSCRIBE FOR UPDATES

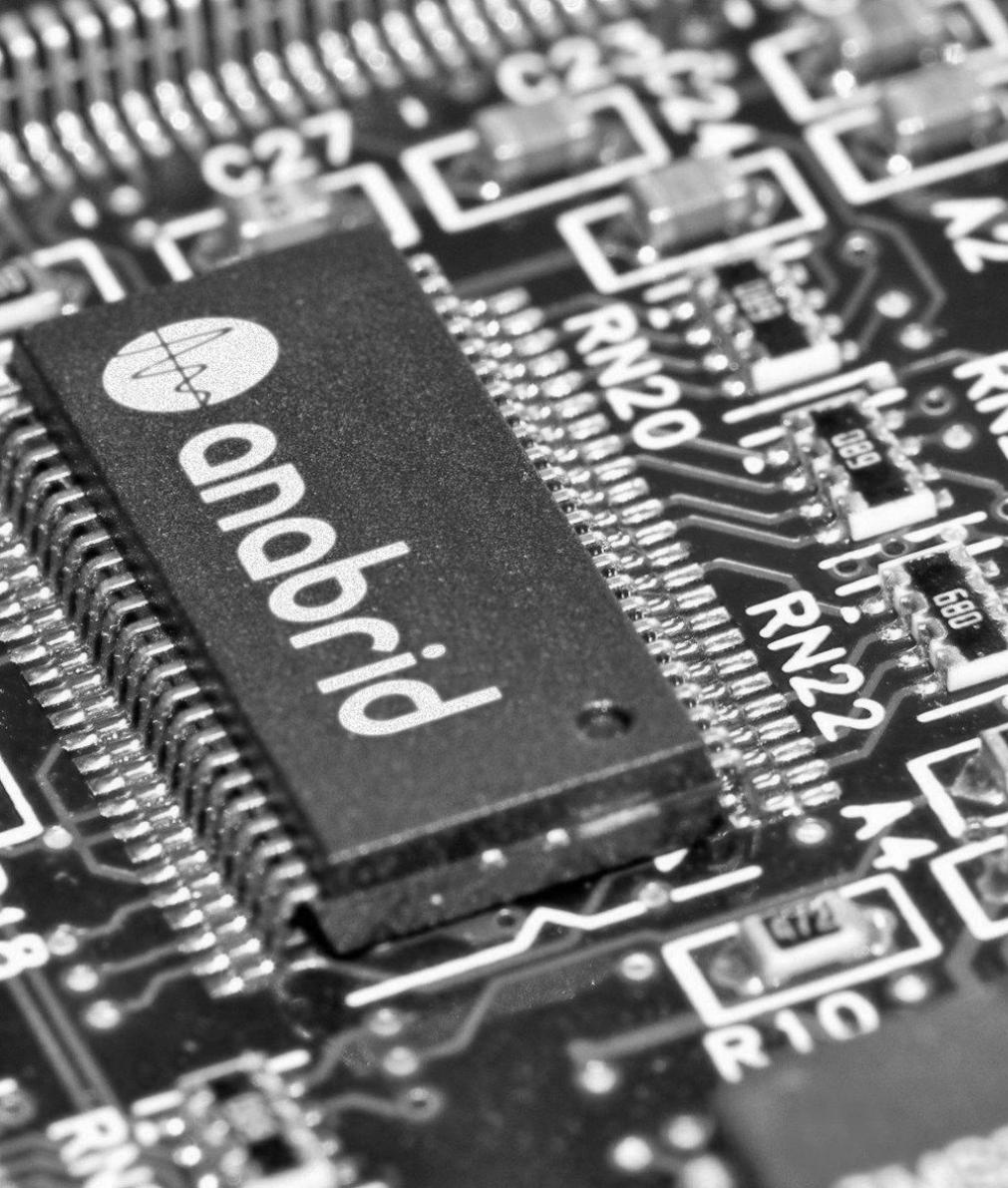
THE ANALOG THING

design concept - product appearance may vary slightly

[www.the-analog-thing.com](http://www.the-analog-thing.com)

# Analogcomputer on a Chip: [www.anabrid.com](https://www.anabrid.com)





# **Die Zukunft ist Analog – wenn Digitalcomputern die Luft ausgeht**

Dr. Sven Köppel  
[koeppel@anabrid.com](mailto:koeppel@anabrid.com)

**Vielen Dank für eure  
Aufmerksamkeit!  
Schaut mal vorbei auf:  
[www.anabrid.com](http://www.anabrid.com)  
[www.analog-paradigm.com](http://www.analog-paradigm.com)**

Night Of Science, 18. Juni 2021  
Goethe-Universität Frankfurt