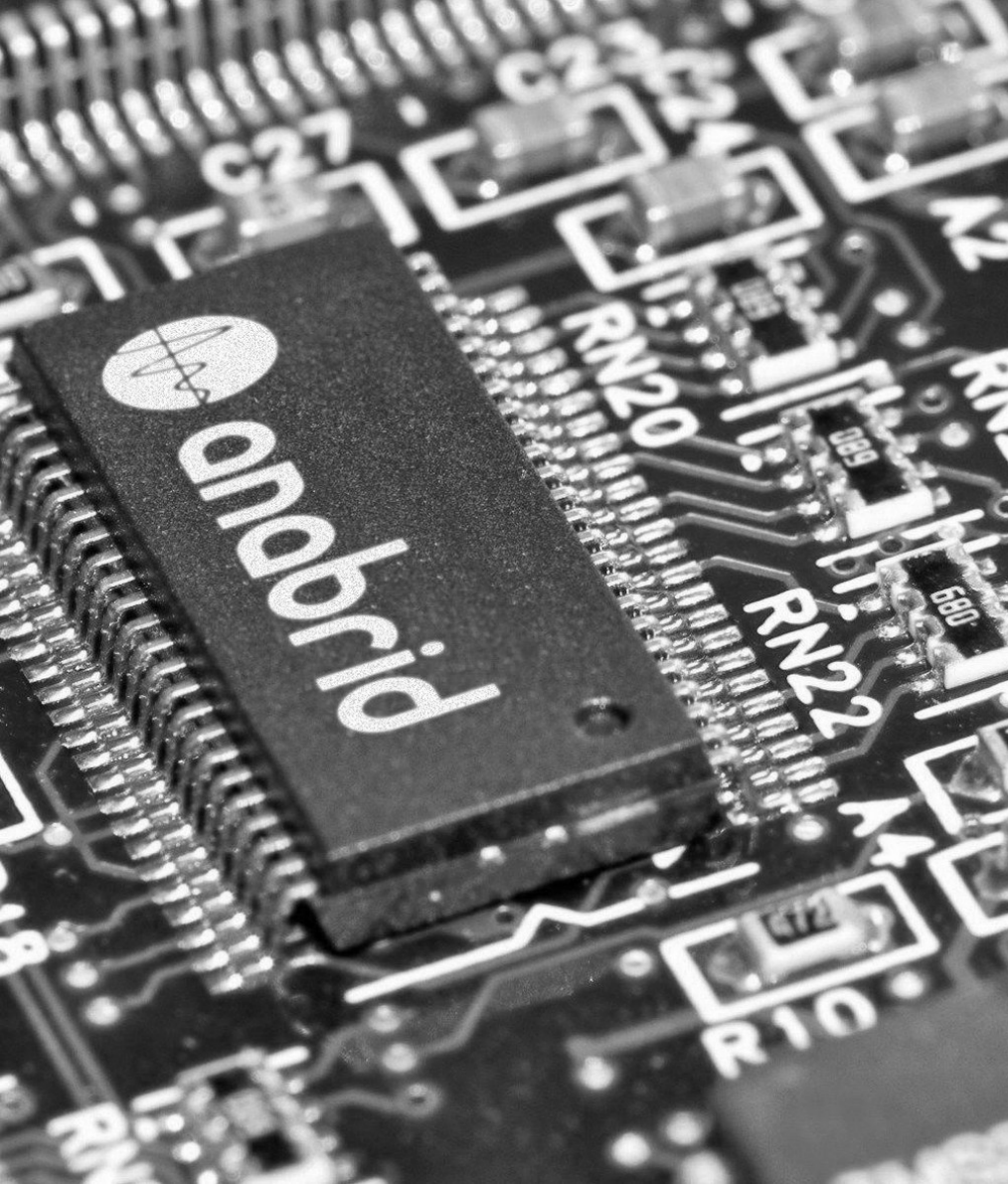




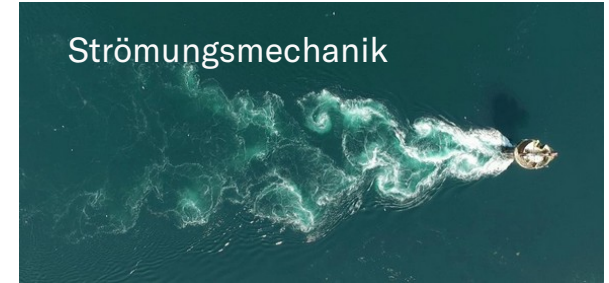
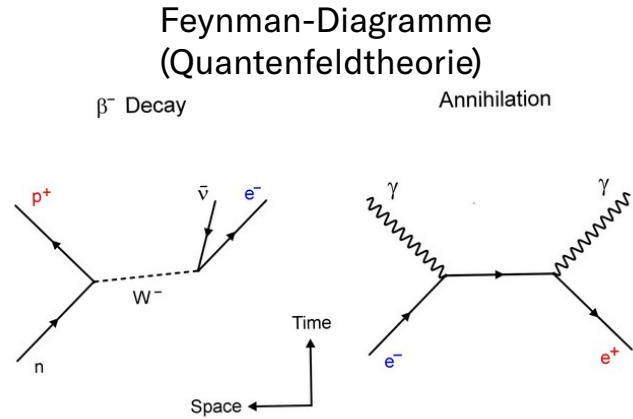
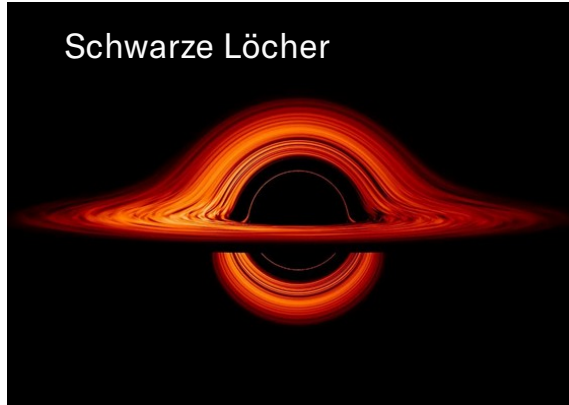
Die Zukunft ist Analog – wenn Digitalcomputern die Luft ausgeht

Dr. Sven Köppel

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

NIGHT
OF
2021
SCIENCE

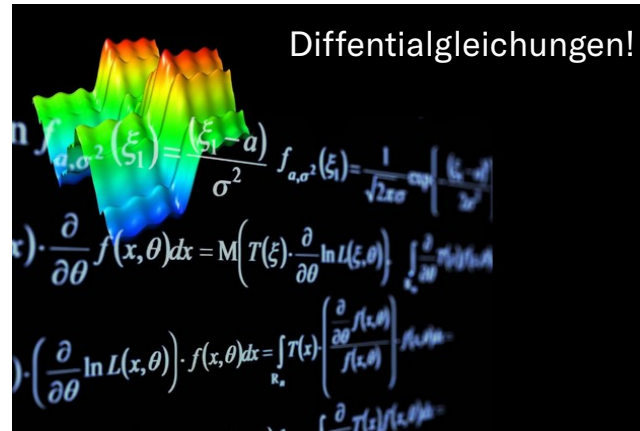
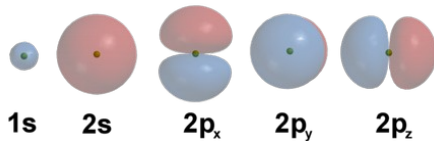
Was machen eigentlich theoretische Physiker:innen? Zum Beispiel...



Quantenmechanik

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

THE SCHROEDINGER EQUATION



General Relativity

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

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

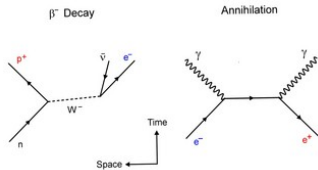
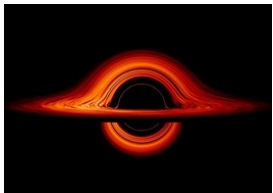
Einstein tensor cosmological constant metric tensor energy-momentum tensor

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

- * Theoriefindung und mathematische Modelle
- * Vorhersagen, Visualisierungen

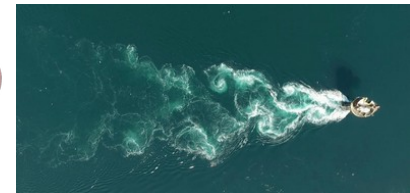
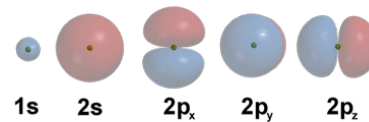
Häufig unter Verwendung von:

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



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

THE SCHRÖDINGER EQUATION



General Relativity

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

all mass and energy in the universe
expanding universe
cosmological constant
Einstein 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:

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

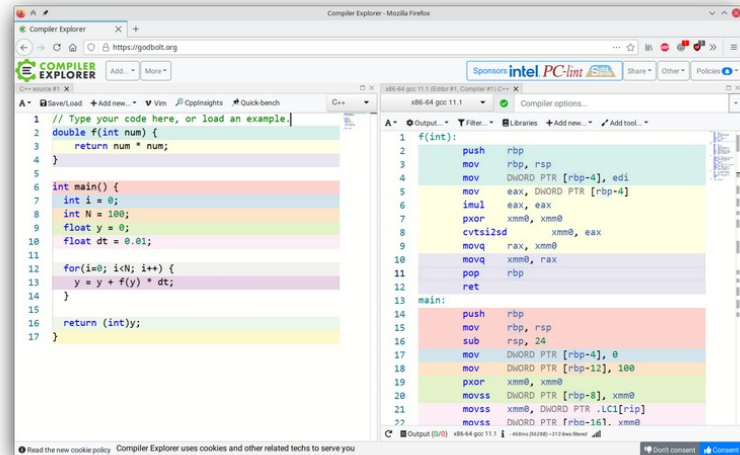
- 3** Diskretisierung

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

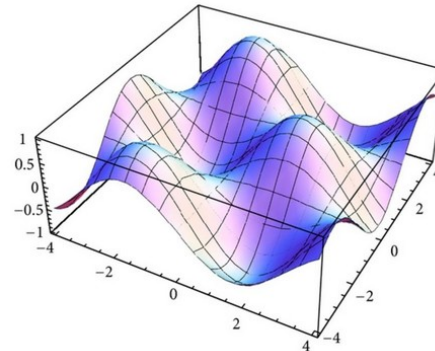
- 4** Programmierung

```
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



- 6** Auswerten



- 7** Nochmal laufen lassen ;-)



Warum werden Computer heiss?

Landauer-Prinzip! [R. Landauer 1961]

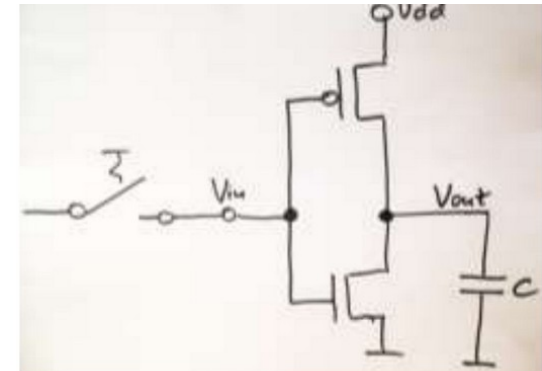
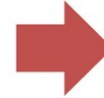
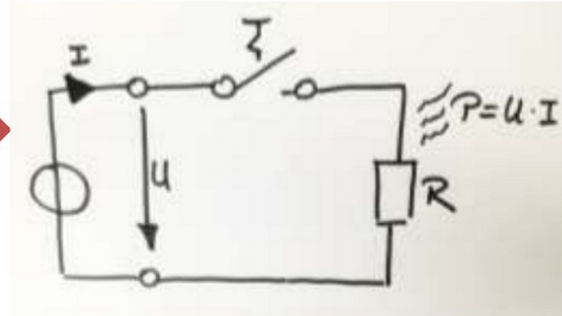
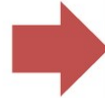
$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Signalverarbeitung}} + E_{\text{Wärme}}$$

Landauer-Limit (bei Raumtemperatur):

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

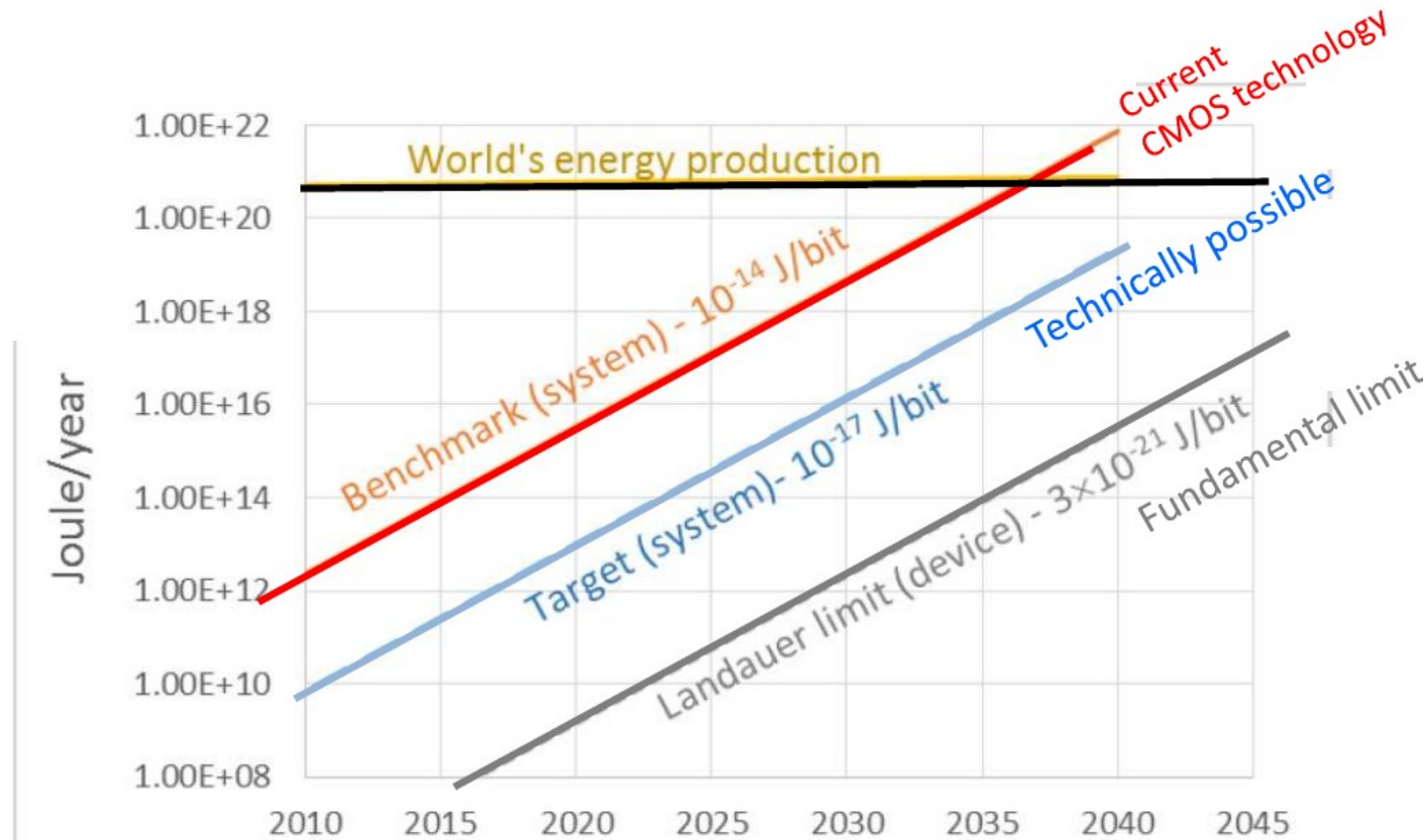


<https://www.lecker.de/wie-macht-man-das-perfekte-spiegelei-71193.html>



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

Schalten erzeugt Wärme: Und zwar global relevant viel!



„Informations-
katastrophe“

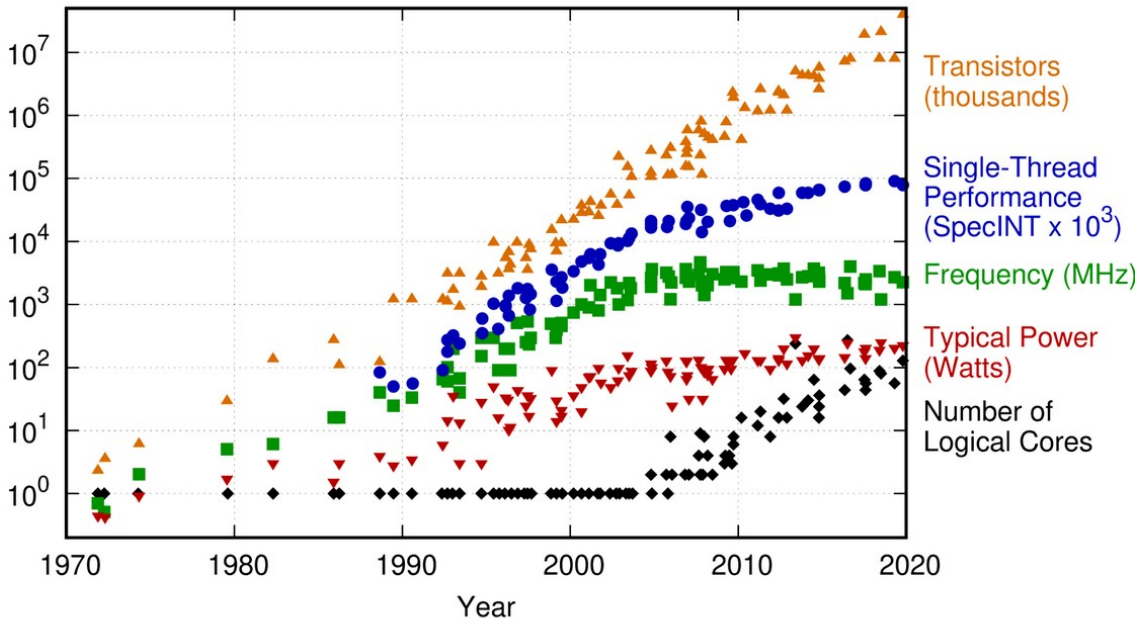
Schon heute **7% der
globalen Energie** für
Informationssektor.

Klimawandel?

Wärmeentwicklung: Fortschritte und Trends

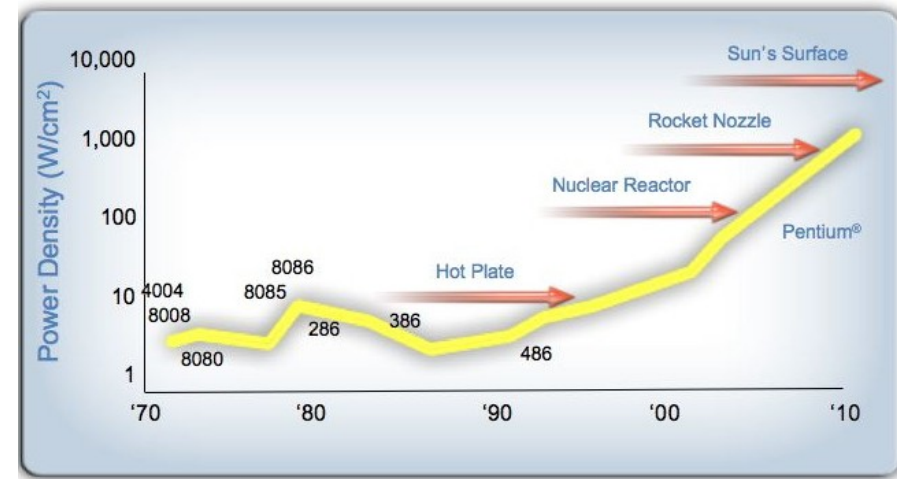
„Moore’s Law“: Fortschritte nur noch bei Parallelisierung, nicht mehr Takt.

48 Years of Microprocessor Trend Data

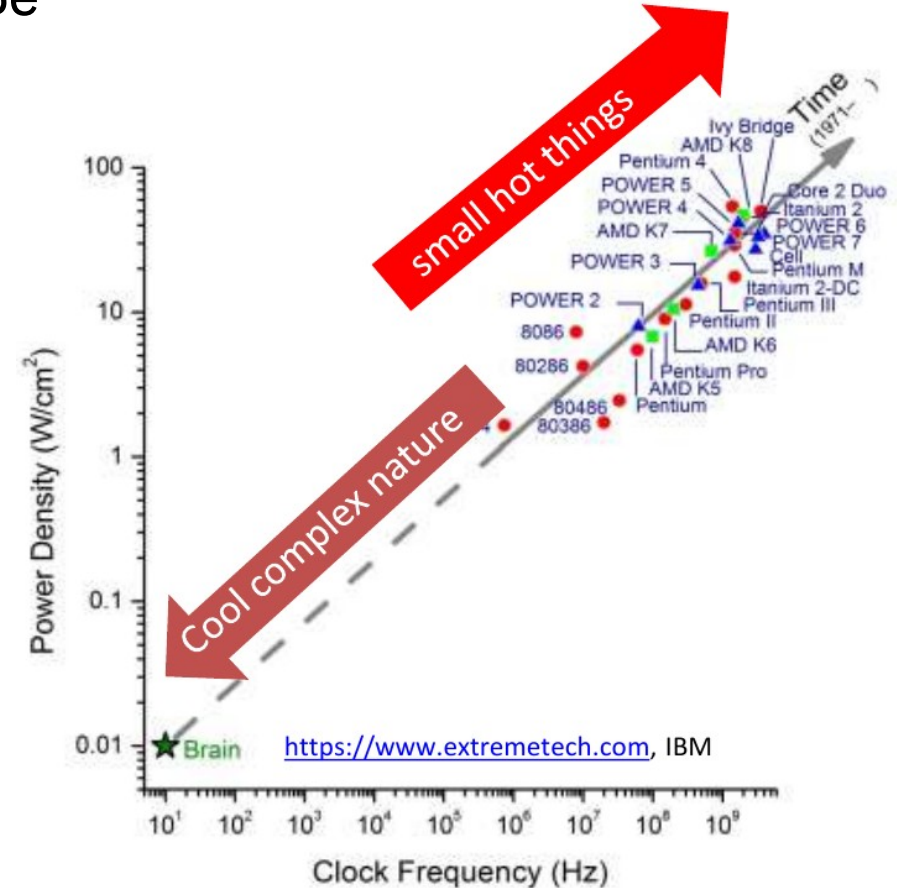
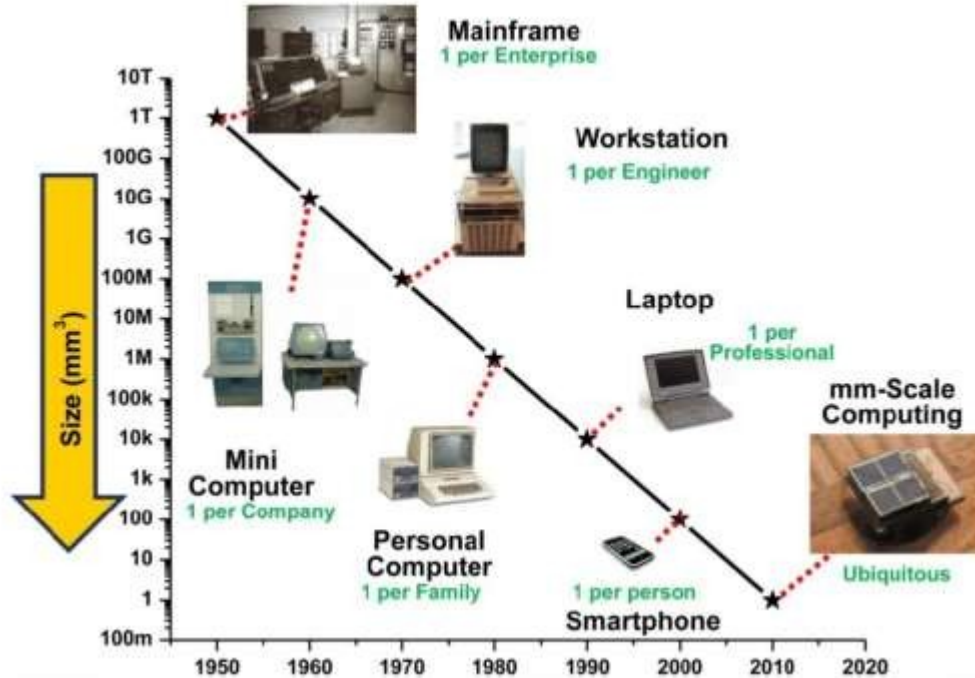


Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2019 by K. Rupp

„Energy barrier“



Wärmeentwicklung: Energie und Baugröße



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

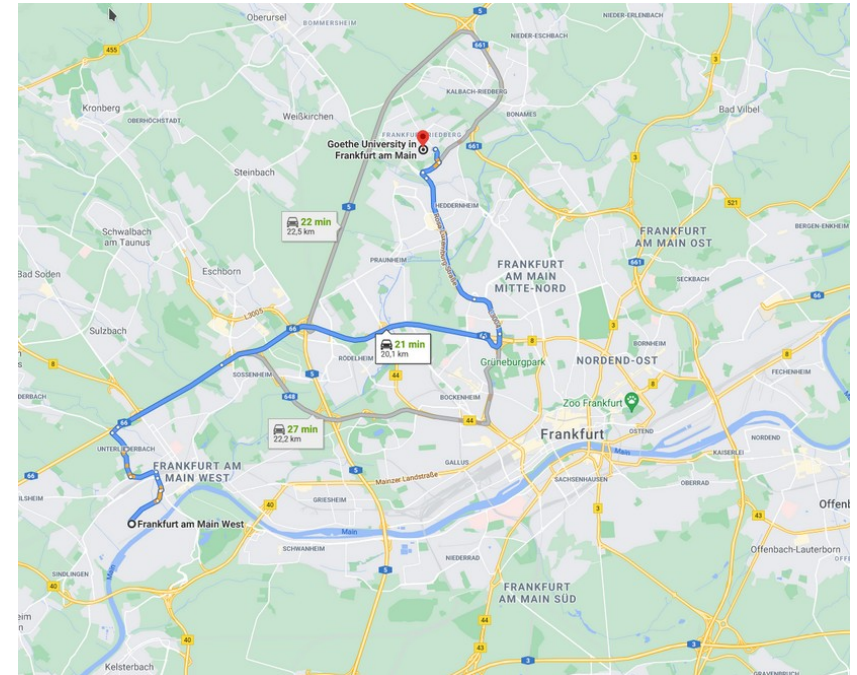
Wenn nicht schneller, dann mehr davon! Etwa im Industriepark Höchst



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 Spitzenplatz im „Green 500“

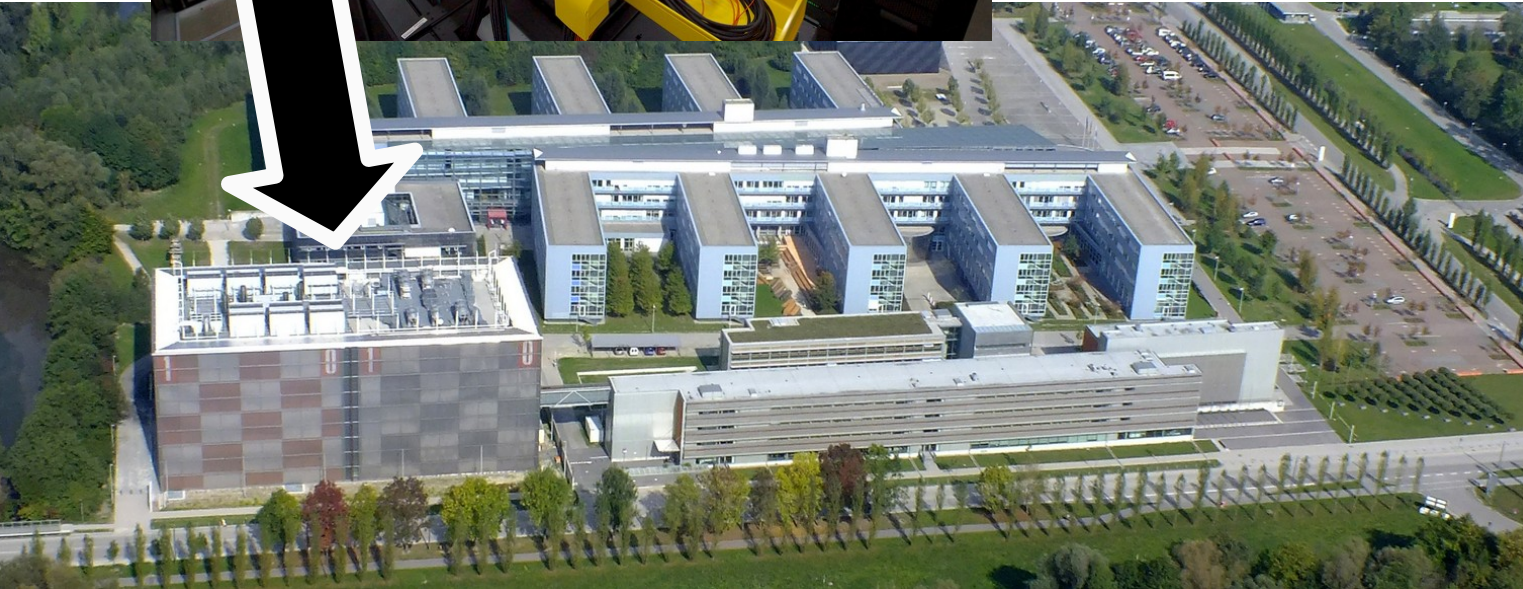


Noch mehr Rechner! Gauss Centre for Supercomputing

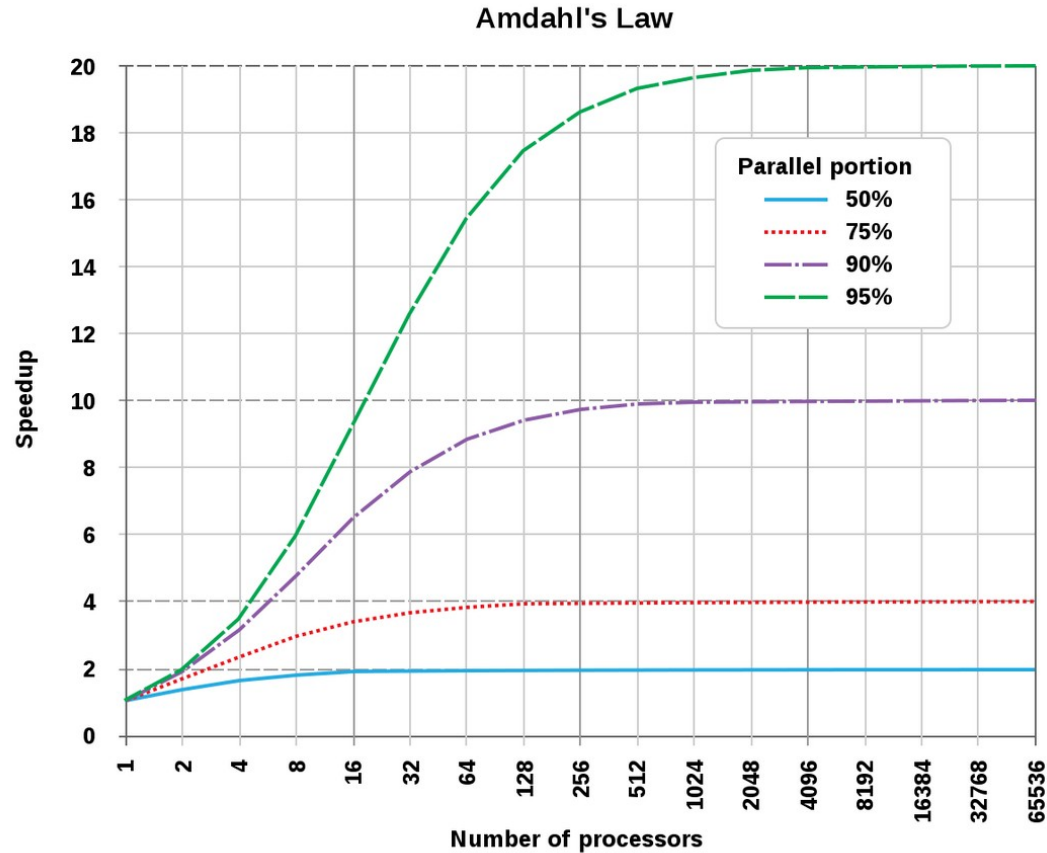


zB. der SuperMUC am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München (TUM/LMU)

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



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 Forschungs-
gegenstand?

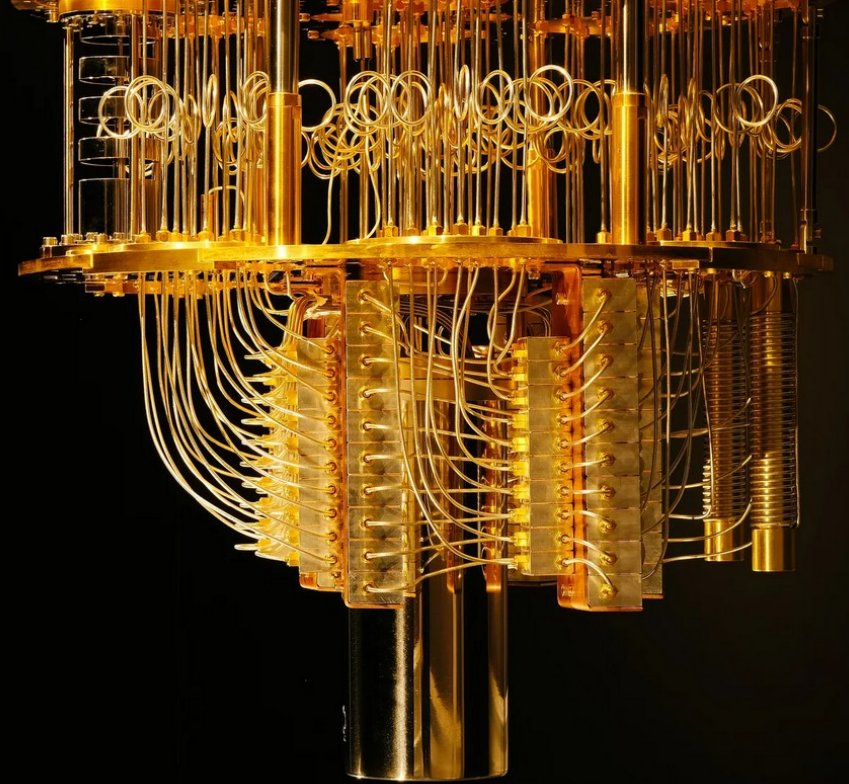
Exotic Computing:

Neues aus der Grundlagenforschung

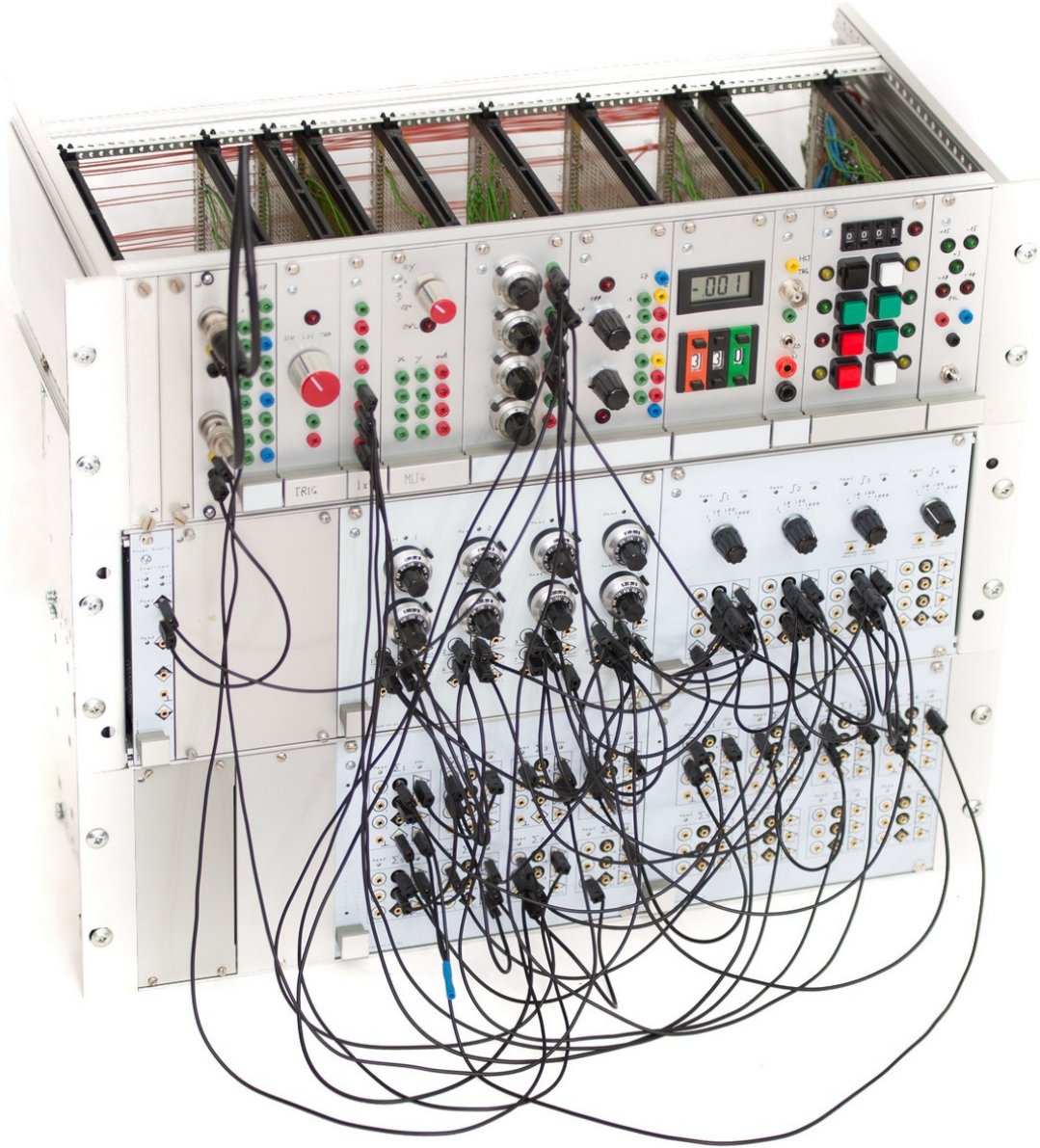
- Spintronik, Photonisches Rechnen
- Quantencomputing
- AI & Neuromorphic Computing
- Memristoren, Computational Memory & Von Neumann Bottleneck
- Analogrechnen

Viel Materialforschung

Viele interdisziplinäre Verbindungen



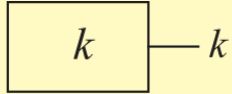
IBM Q System One



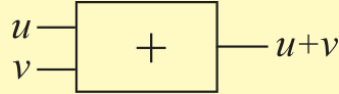
Die Rückkehr des Analogrechners

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

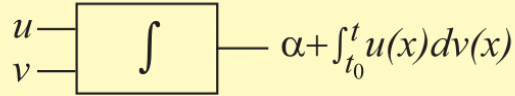
Bausteine des Analogrechners! The General Purpose Analog Computer



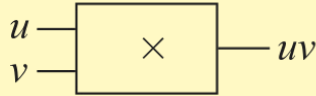
A constant unit associated to



An adder unit



An integrator unit



A multiplier unit

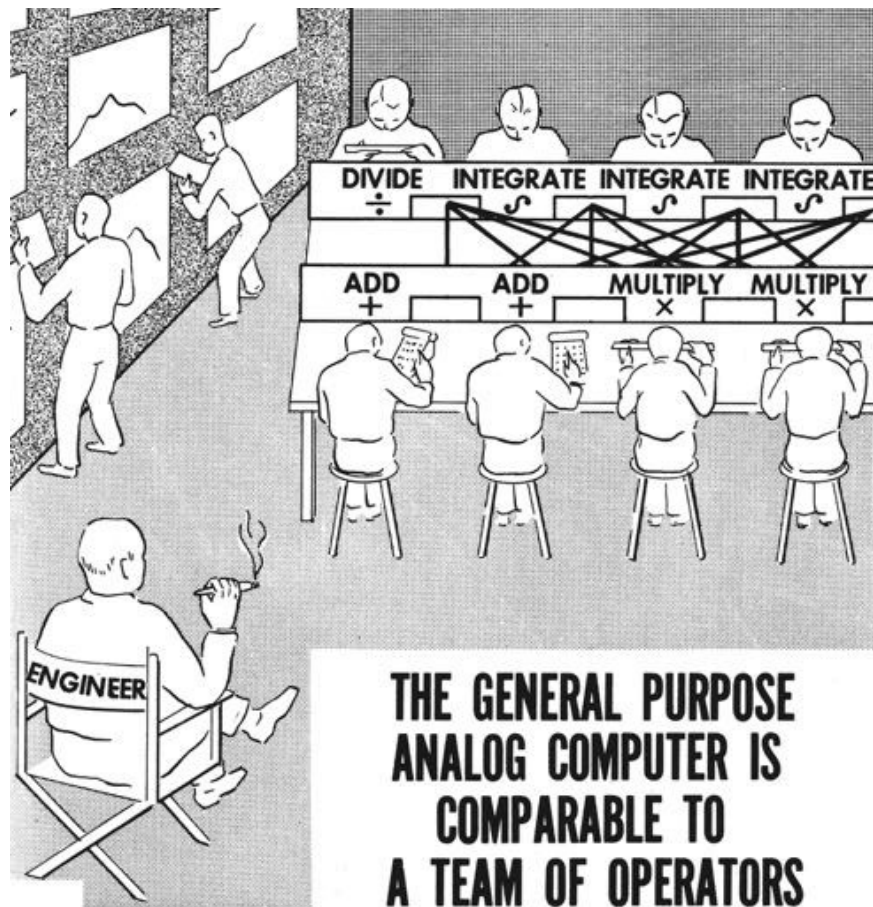
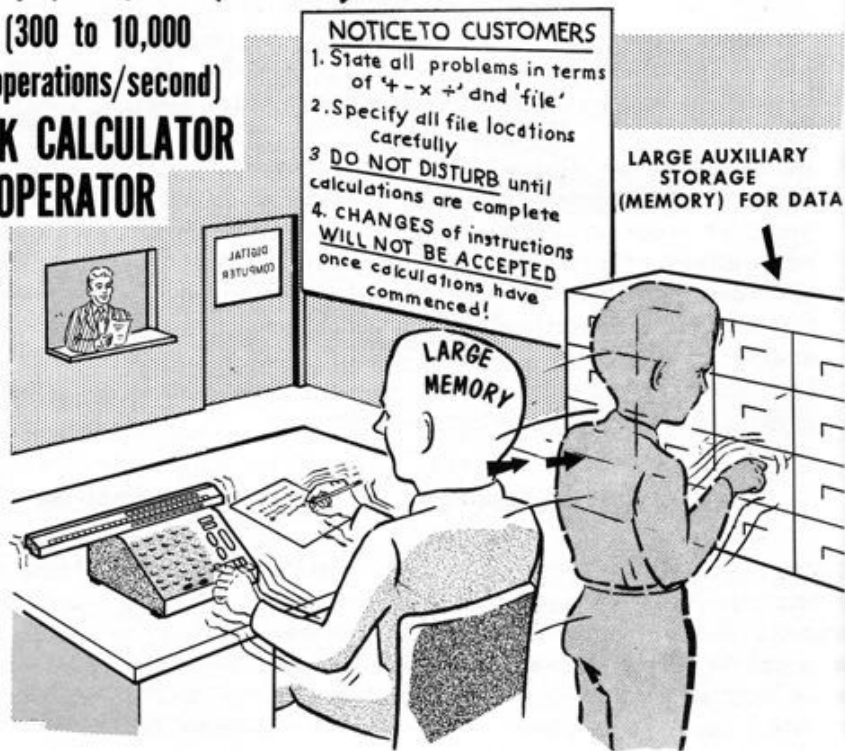
Claude Shannon [1941] hat für Analogrechner gemacht, was Turing für Digitalrechner gemacht hat.

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

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

(300 to 10,000
operations/second)

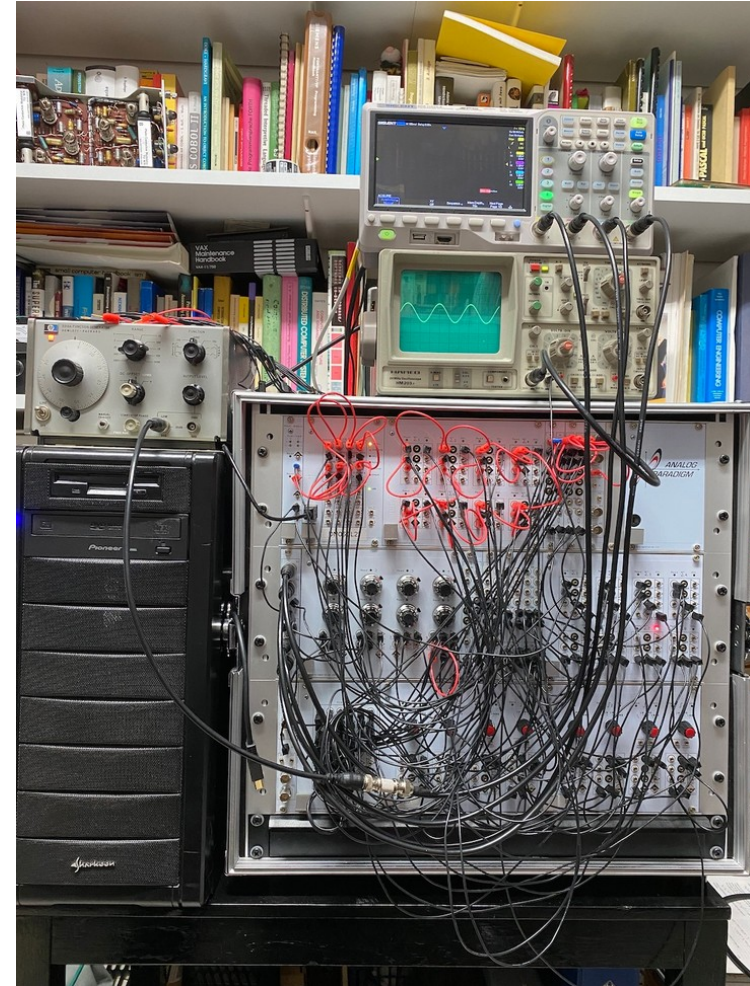
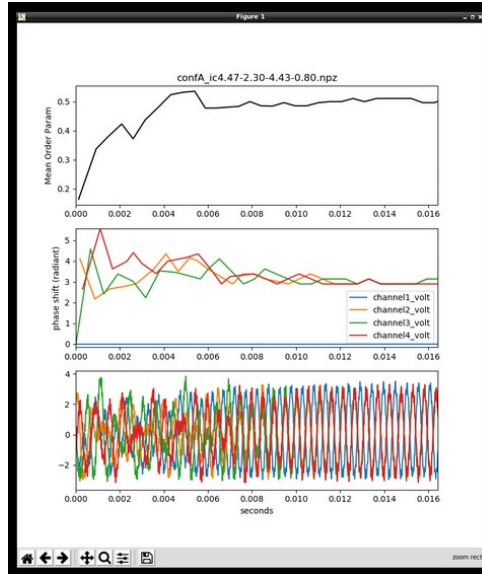
**DESK CALCULATOR
OPERATOR**



**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



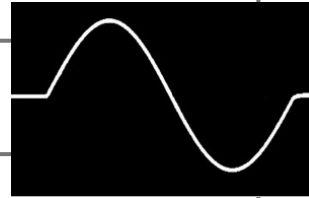
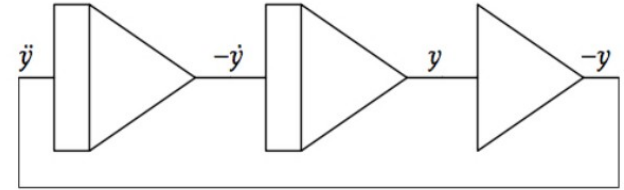
Analogrechnen: Ein Beispielprogramm

Harmonischer Oszillator:

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

Umschreiben zu:

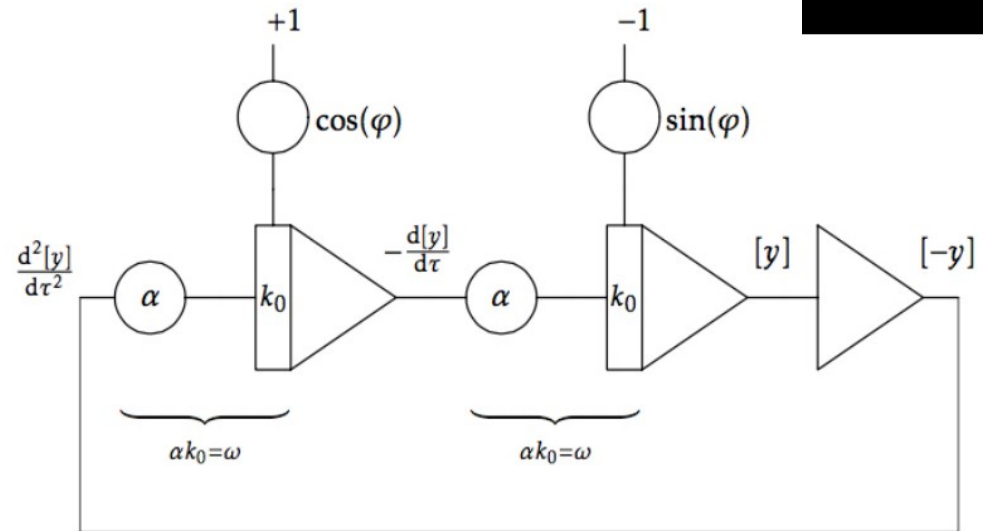
$$\ddot{y} = -y \quad (\text{mit } \omega = 1)$$



Mit Anfangswerten und Allgemein:

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

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



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

1

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

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

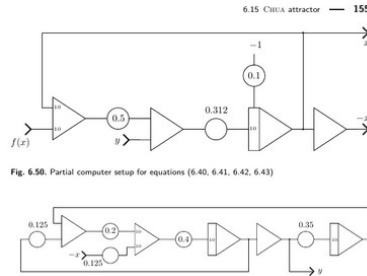
2

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))

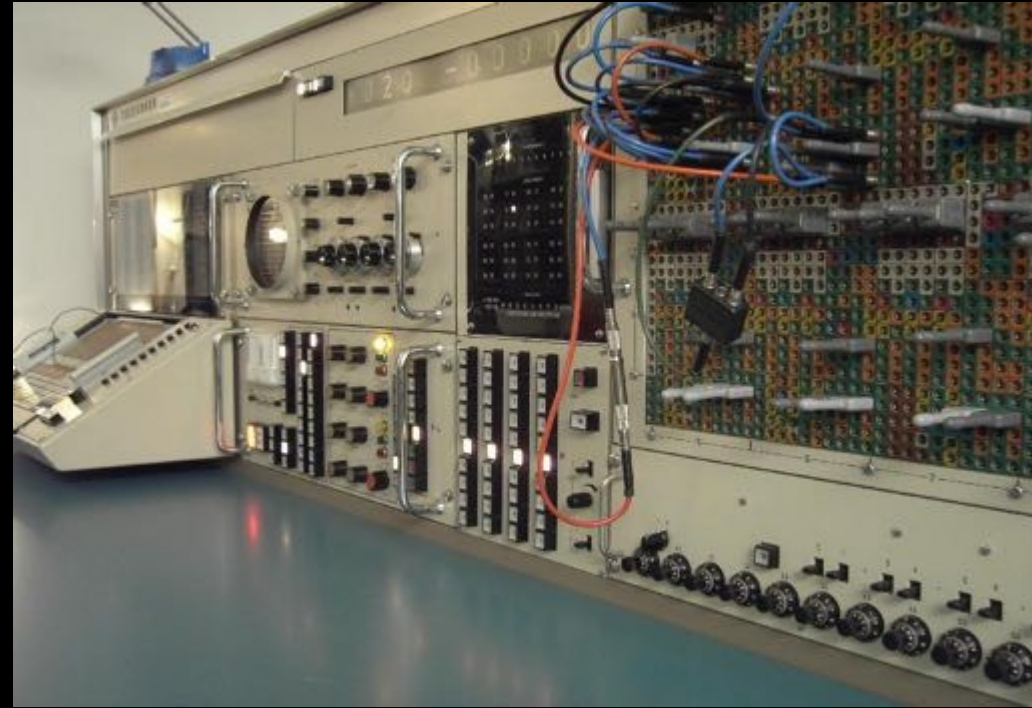
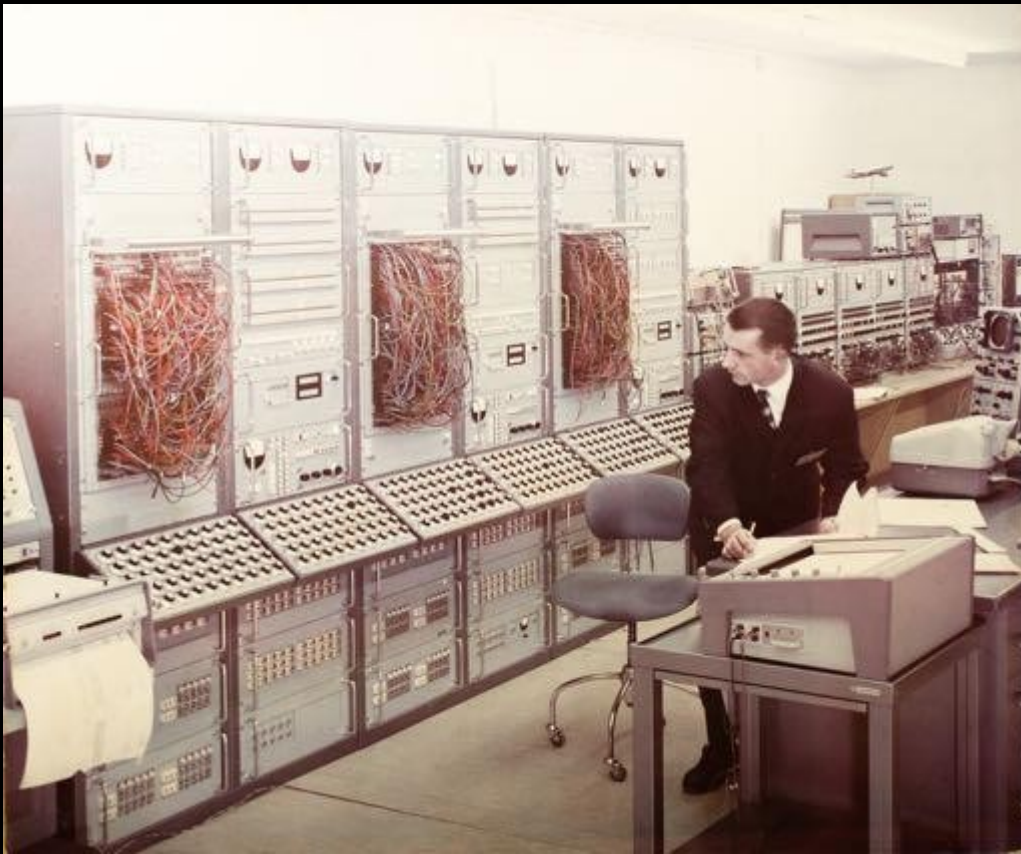
dt = const(0.001)
```

5

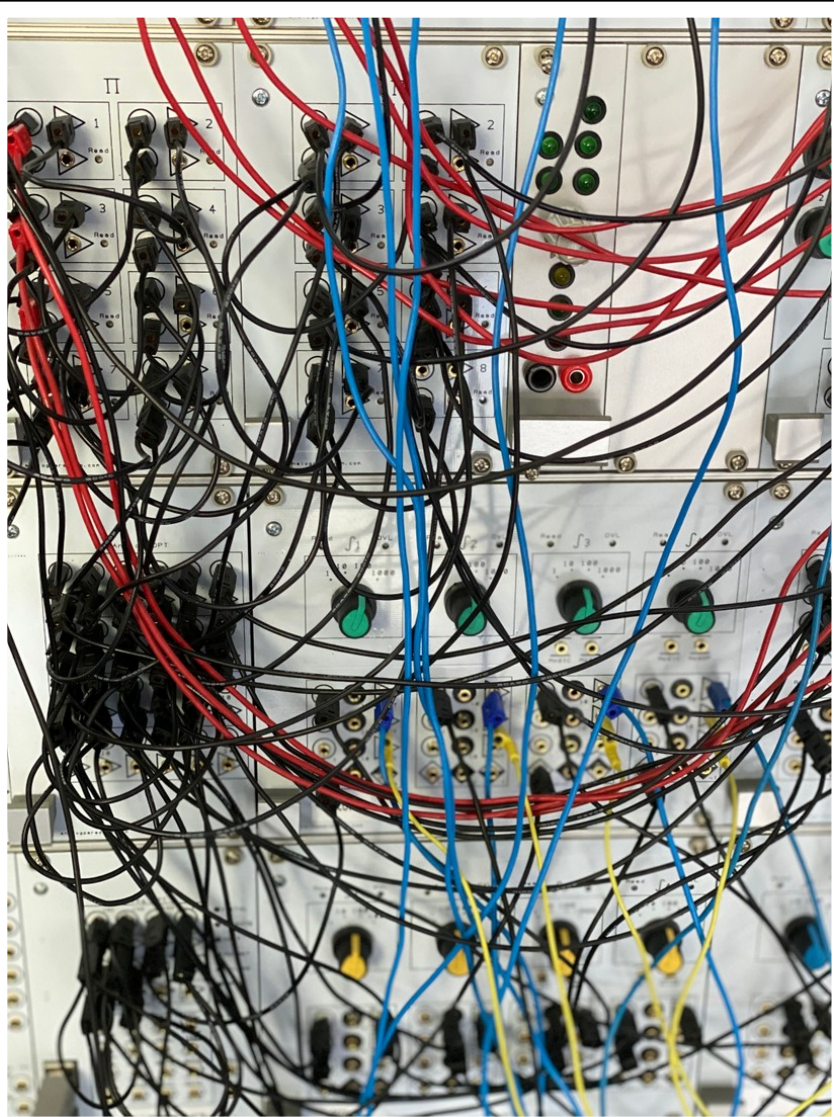
Laufen + Auswerten

Viele viele Fragestellungen auf dem Weg...

Historische Analogrechner

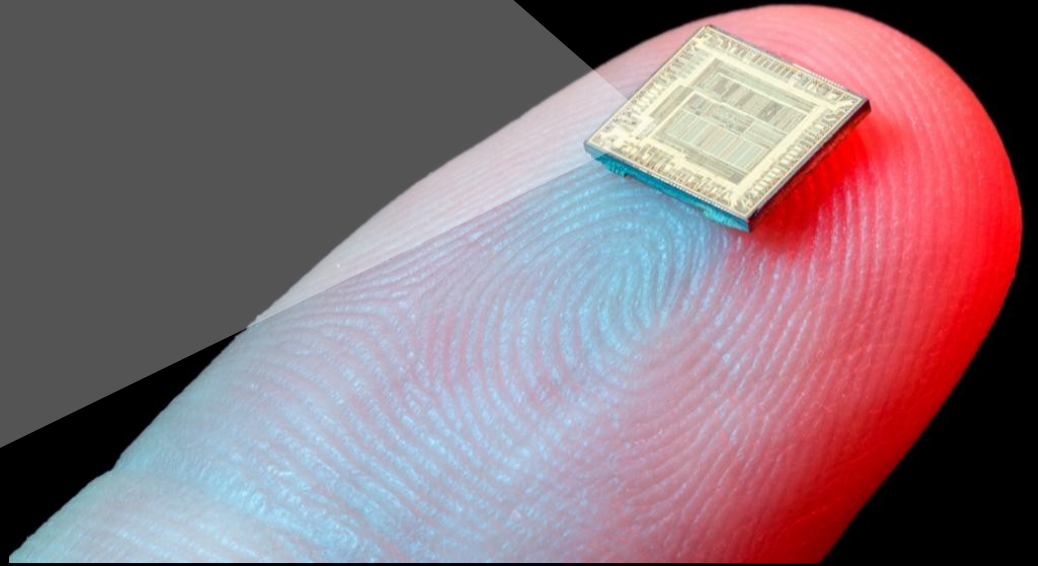


Telefunken-Analogrechner aus den 1960ern → www.analogcomputermuseum.org



Unsere Vision

Integration eines Analogrechners
auf einen Mikrochip in 2 Jahren.

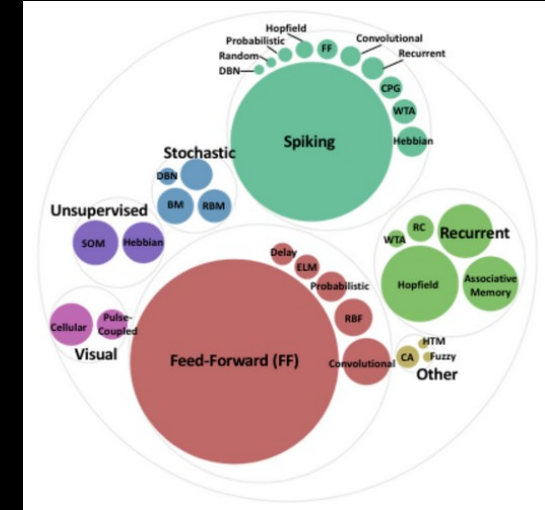
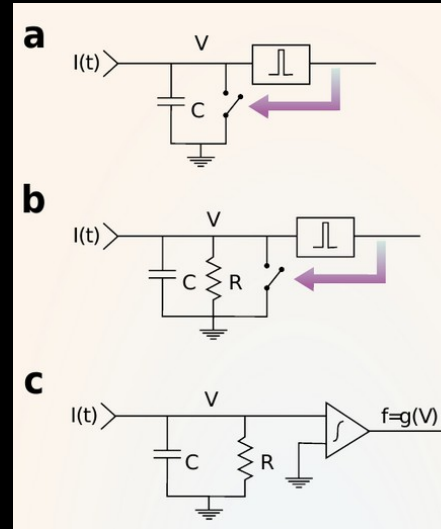
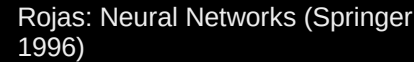


What for?

Artificial Intelligence



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

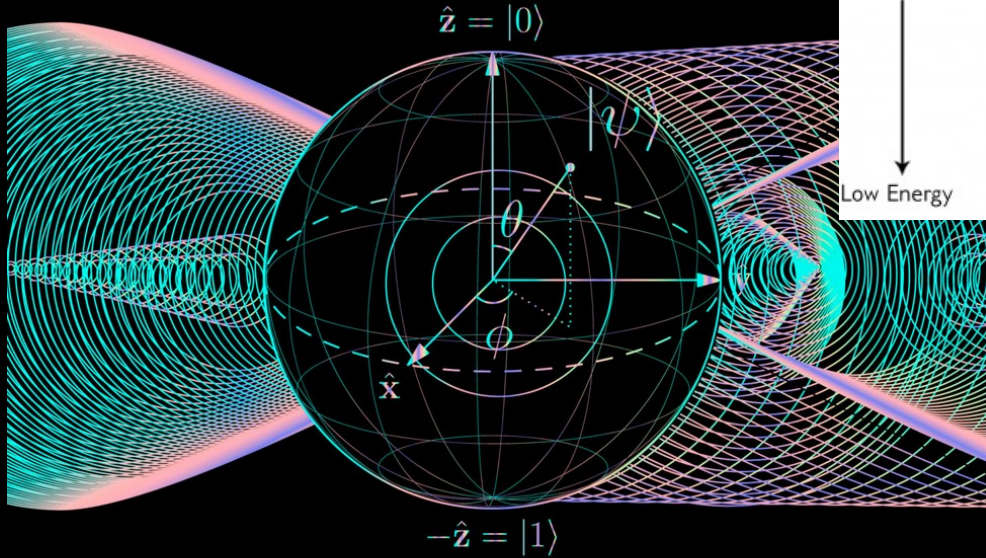


A survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware, [arXiv:1705.06963]

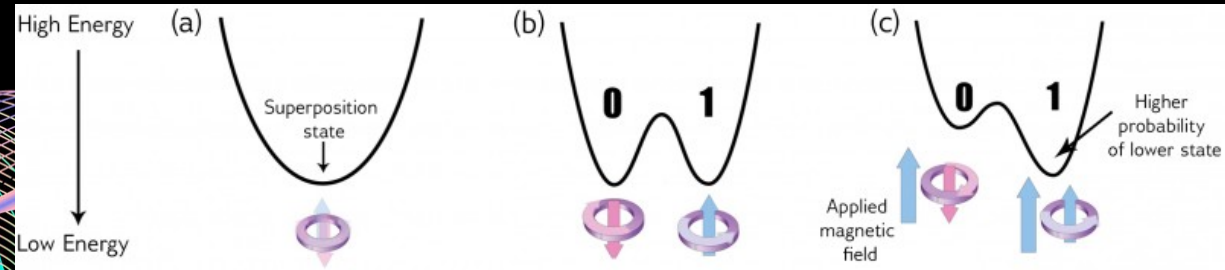
Koch, Segev: The role of single neurons in information processing (Nature neuroscience, vol. 3, 2000)

Anwendungen

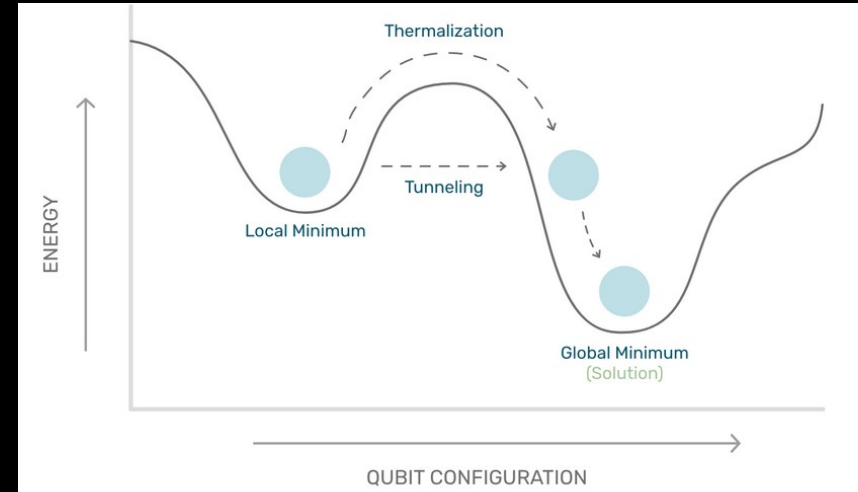
Quantum Computing



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**.



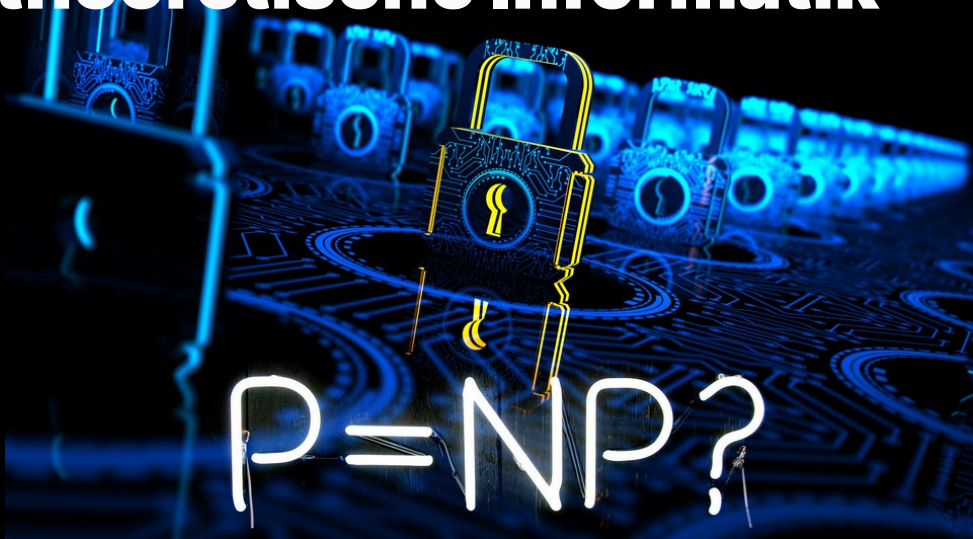
Quanten-Annealer [Bildquelle: DWAVE / blog.aimultiple.com]



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

Anwendungen

Verschlüsselung und theoretische Informatik

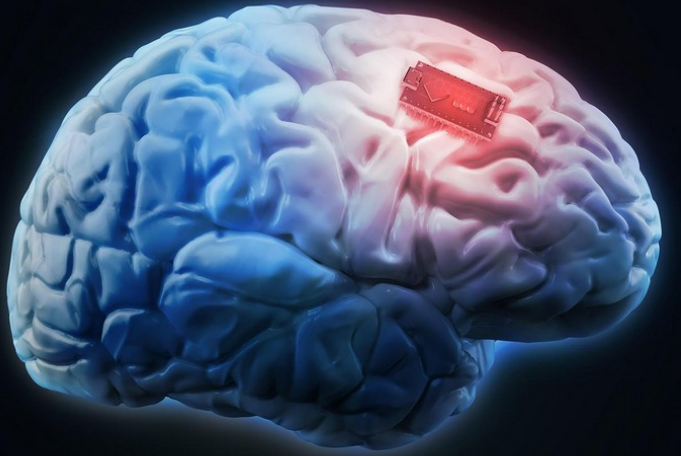


Analogrechner sind Beyond-Turing-Rechner. Sie könnten effizient **kombinatorische Probleme lösen** und Pre-Quantum **Verschlüsselung** knacken.

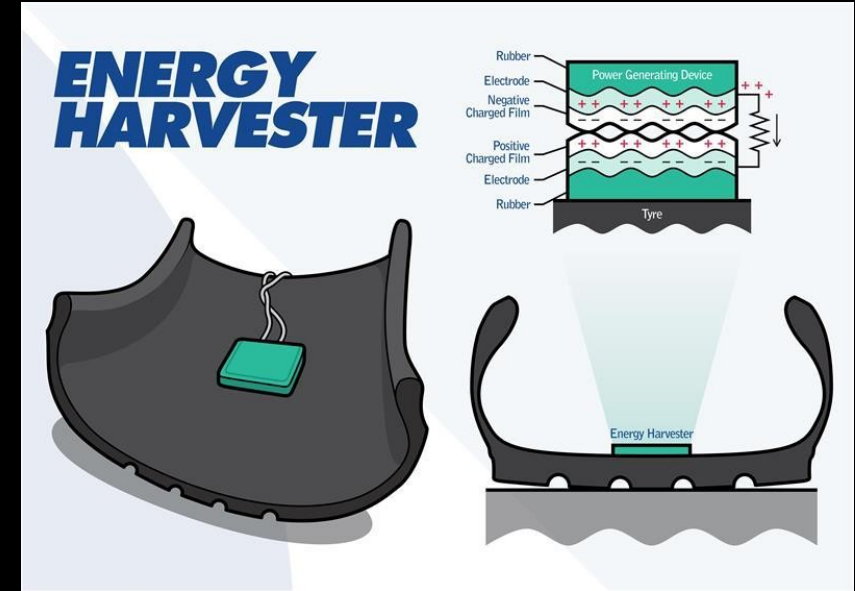
→ Hava Siegelmann: Computation beyond the Turing Limit (Science 1995)

Anwendungen

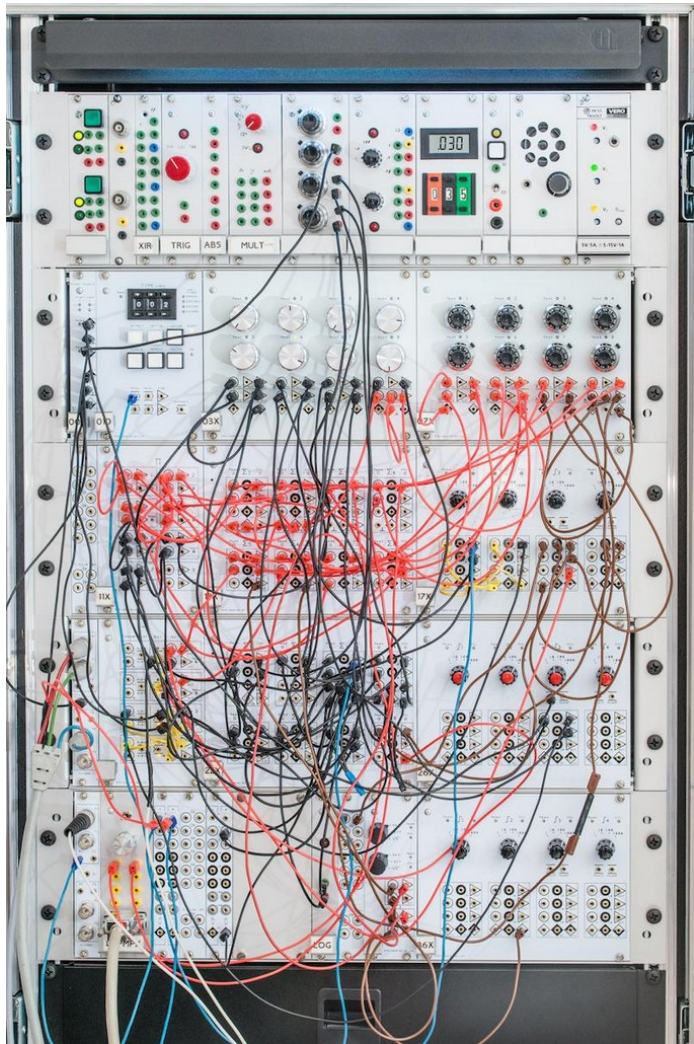
Wearables und Implantate



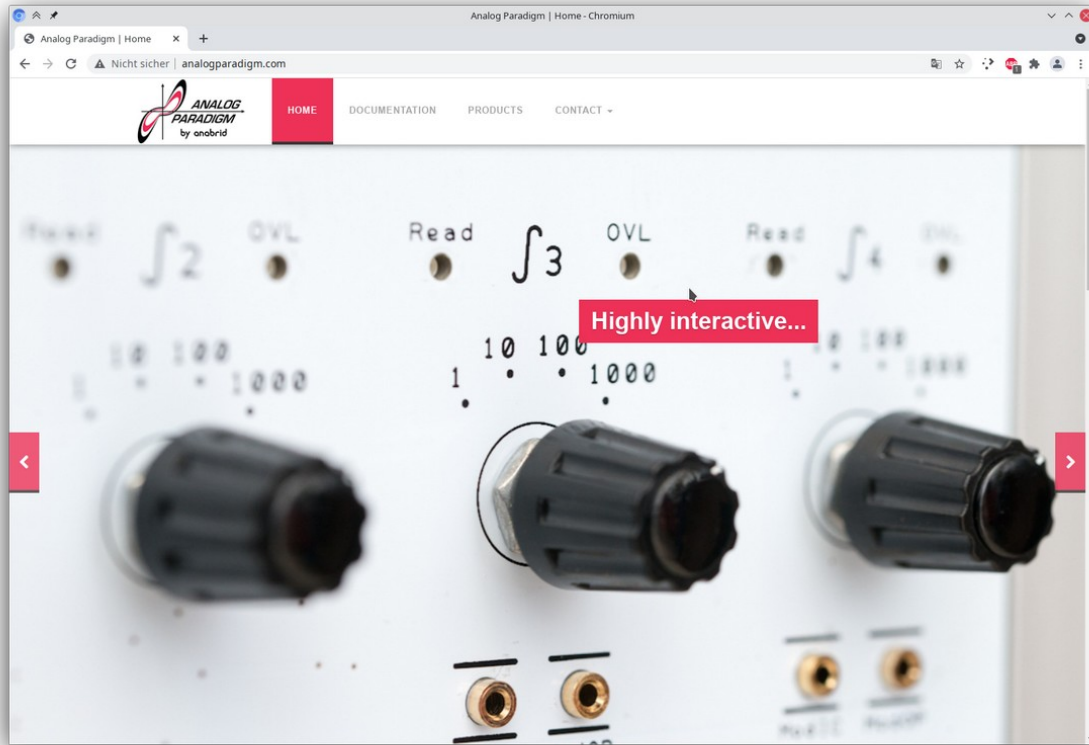
Analogrechner eignen sich für **herausfordernde** oder **schnelle Rechnungen** bei **wenig Energieverbrauch** benötigt werden. Analogrechner werden hier einen nachhaltigen Einfluss haben.

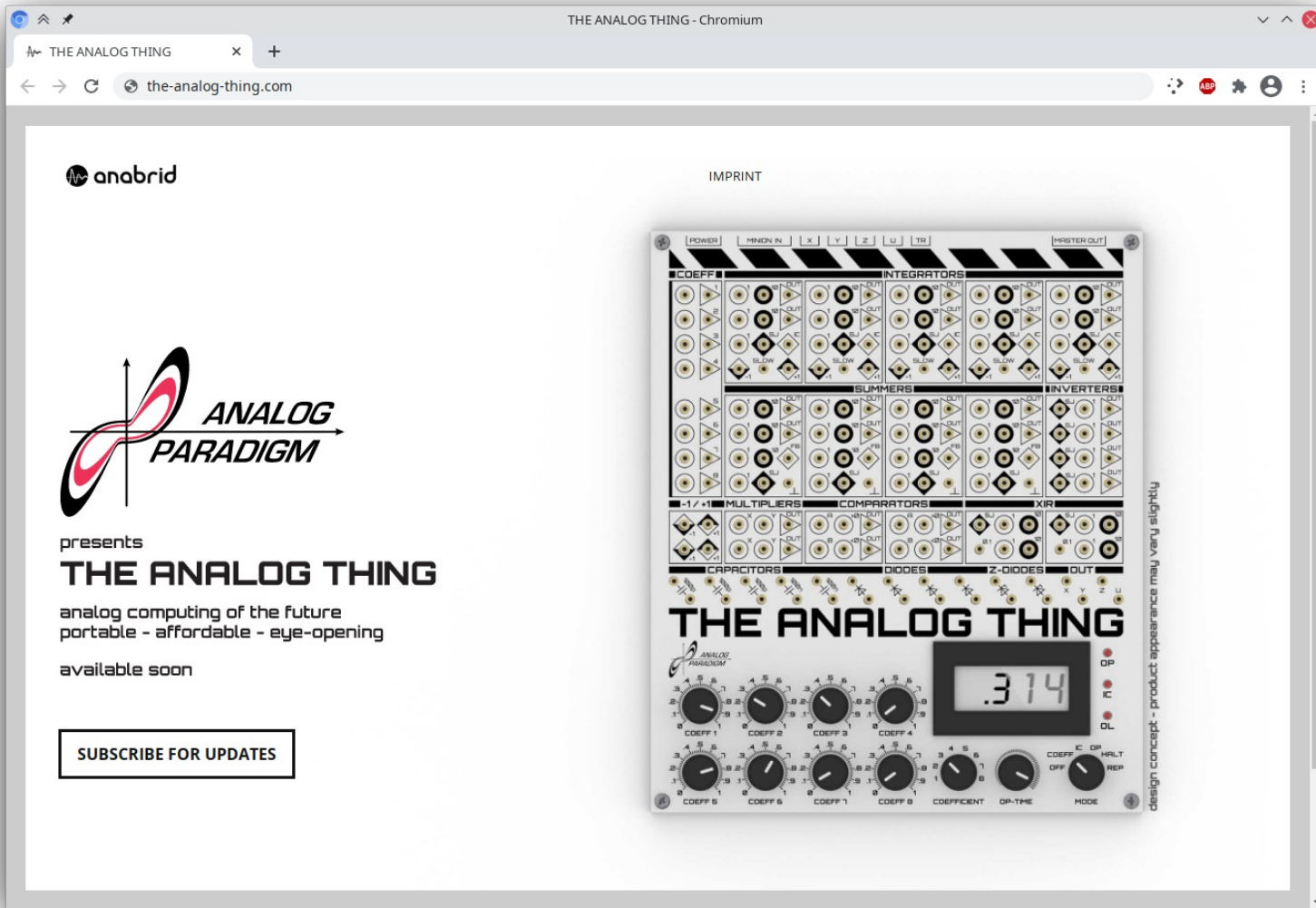


[Bildquelle: markallengroup.com]



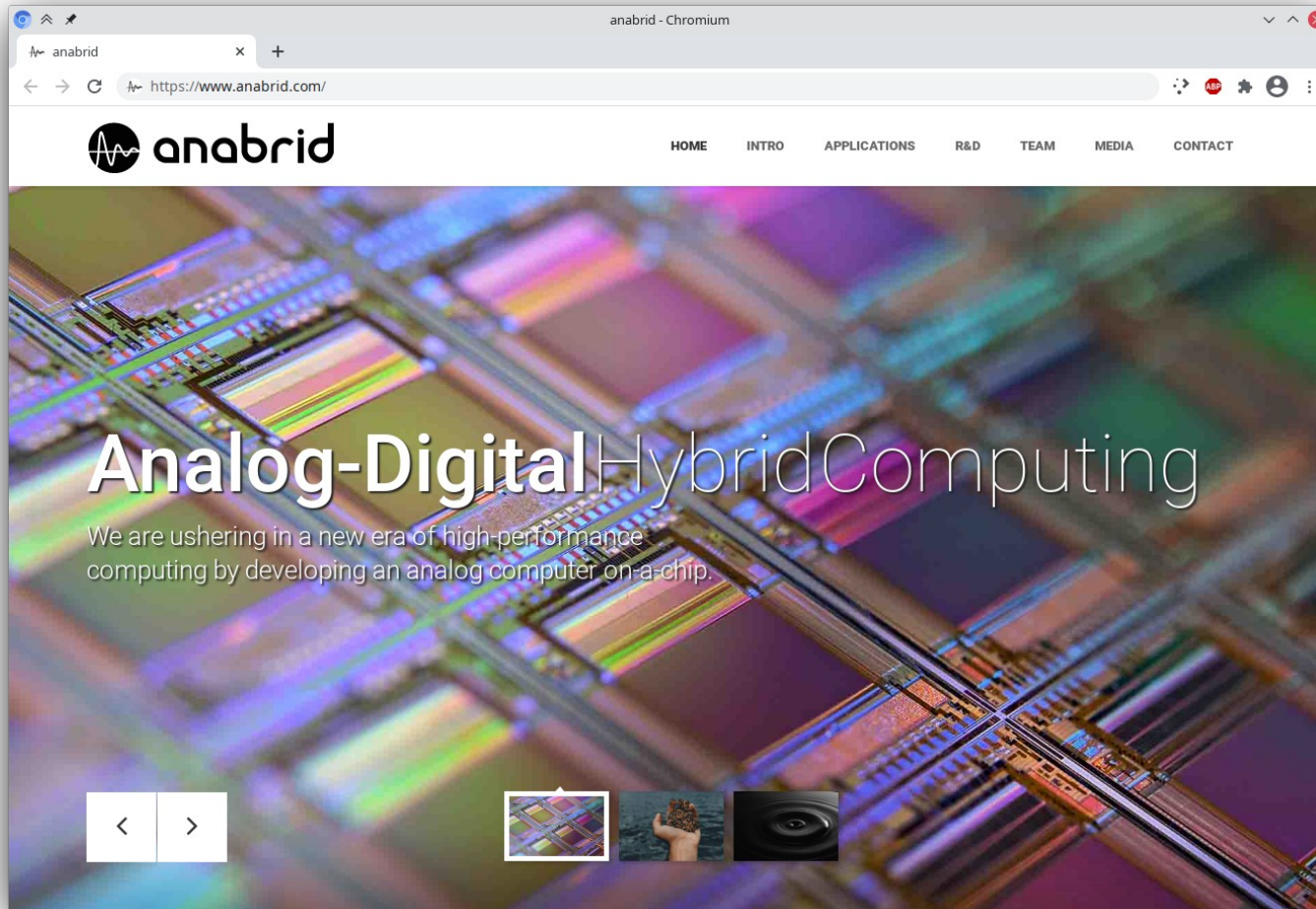
Über uns: www.analogparadigm.com

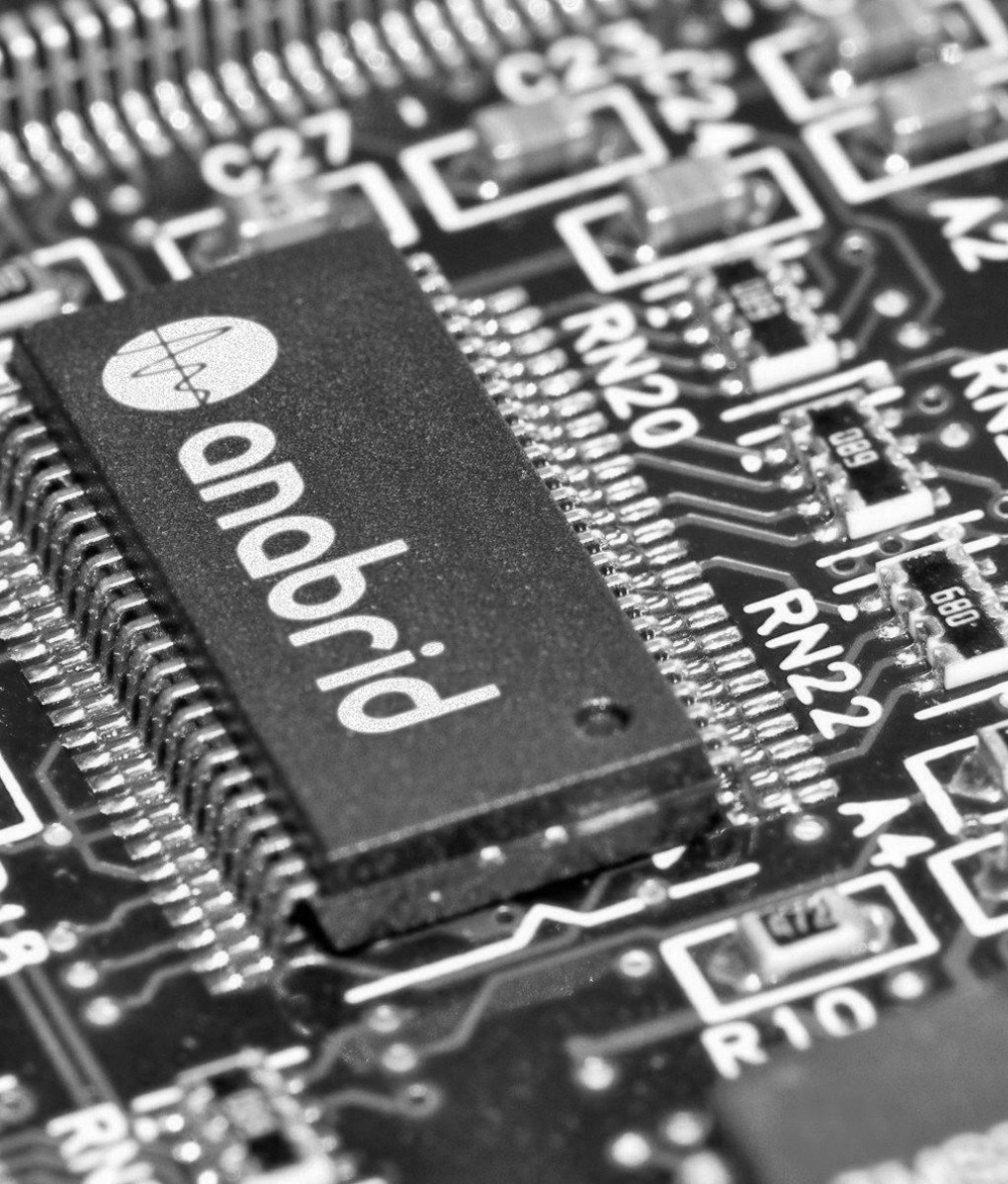




www.the-analog-thing.com

Analogcomputer on a Chip: www.anabrid.com





Die Zukunft ist Analog – wenn Digitalcomputern die Luft ausgeht

Dr. Sven Köppel
koeppel@anabrid.com

**Vielen Dank für eure
Aufmerksamkeit!
Schaut mal vorbei auf:**
www.anabrid.com
www.analog-paradigm.com

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

NIGHT
OF
2021
SCIENCE