

Kleiner, schneller, analog? Analogrechnen im KI-Zeitalter

Prof. Dr. Bernd Ullmann, anabrid GmbH

27. November 2025

anabrid



Nach vielen Jahrzehnten stößt das klassische Digitalrechnen langsam an prinzipielle Grenzen, was andersartige Ansätze in den Fokus rückt:

- Analog- und Hybridrechnen und
- Quantencomputer.

Was ist ein Analogrechner?

Ein Analogrechner löst Probleme, indem ein mathematisch äquivalentes (elektronisches) Modell aufgebaut wird, an dem Lösungen gemessen werden können. Dieser Ansatz ist grundlegend nicht (!) algorithmisch.

Warum interessiert man sich für solche Ansätze?

Probleme klassischer Digitalrechner

Obwohl (speicherprogrammierte) Digitalrechner allgegenwärtig sind, weisen sie eine ganze Reihe von Nachteilen auf, die immer mehr in den Vordergrund rücken:

- Hoher Energiebedarf
- Beschränkte Taktfrequenzen (diese haben direkten Einfluss auf den Energiebedarf)
- Strukturen auf integrierten Bausteinen können nicht beliebig klein gemacht werden – am Ende sind auch Atome vergleichsweise große Objekte...
- Parallelismus ist hart! (AMDAHLSches Gesetz)
- Nur ein kleiner Teil der Chipfläche in einer modernen CPU rechnet wirklich – der Großteil ist mit „housekeeping“ Aufgaben beschäftigt...



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/91/Frontier_Supercomputer_%283%29.jpg/2560px-Frontier_Supercomputer_%283%29.jpg, abgerufen am 05.06.2024

Kühlung



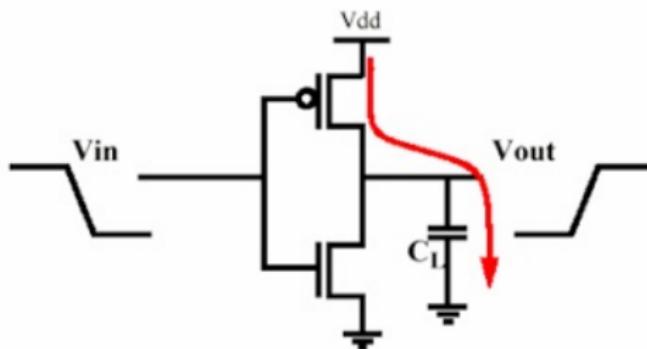
Kühlung



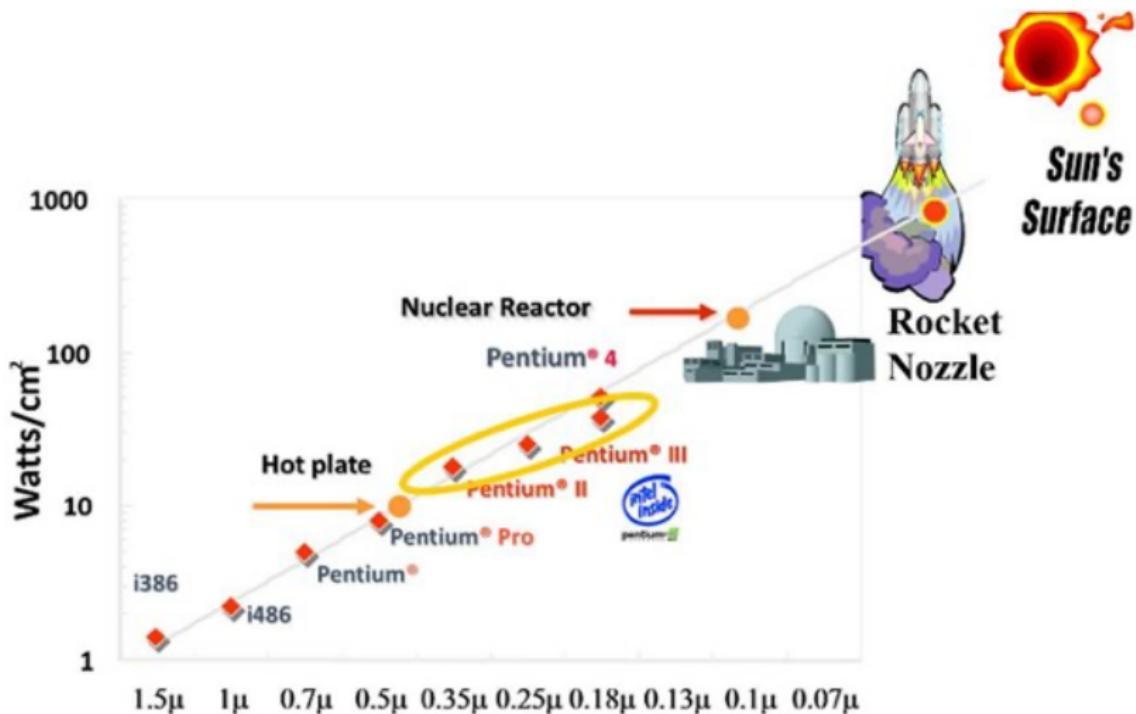
https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/iSYEWEeVCg_8/v1/-1x-1.jpg, abgerufen am

05.06.2024

Woher röhrt der hohe Energiebedarf im Wesentlichen? Eine typische digitale Ausgangsstufe sieht etwa so aus:

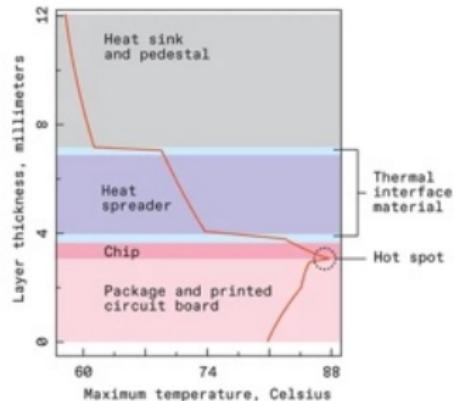
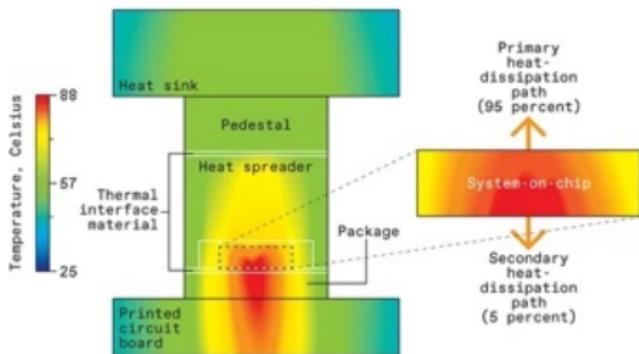


- C_L muss ständig umgeladen werden,
- für eine sehr kurze Zeit leiten beide Transistoren im Umschaltmoment,
- die Transistoren sind nicht perfekt und weisen Leckströme auf,
- $P_{cpu} = P_{dyn} + P_{sc} + P_{leak}$ ist super-linear bezüglich der Taktfrequenz!



Siehe [ETIEMBLE 2018, Fig. 8].

[MYERS 2025] titelt zu Recht: „*Future Chips will be Hotter than Ever*“



... über 3D-Stacking muss man gegenwärtig gar nicht nachdenken...

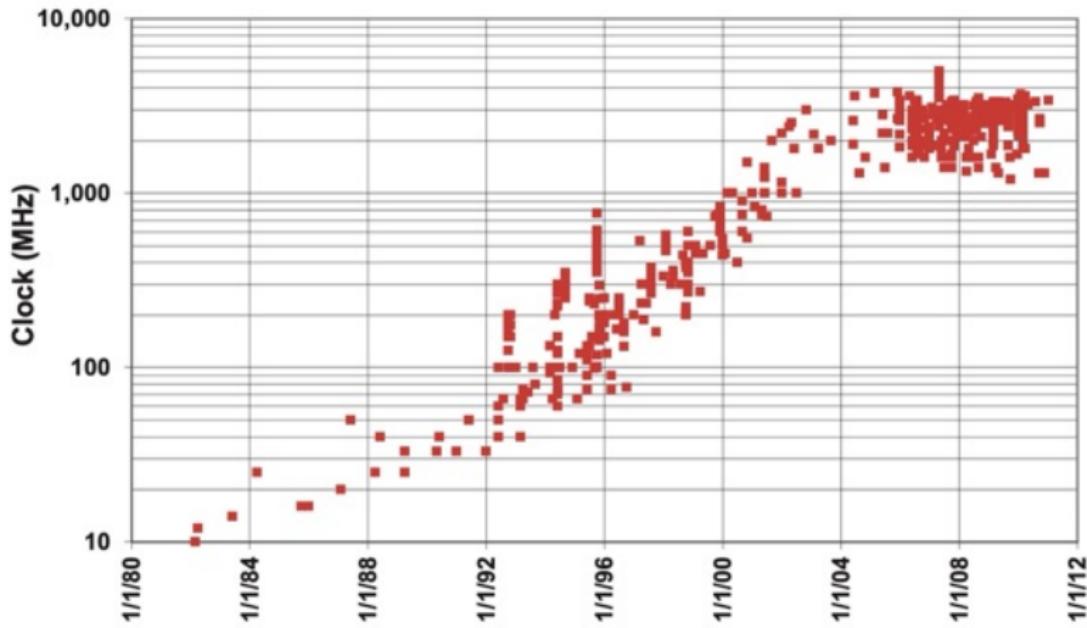
Flüssigkeitskühlung

Auch klassische Ideen werden wieder aufgewärmt. . . ;)



(Quelle: [GENKINA 2025], "Next-Gen AI Needs Liquid Cooling")

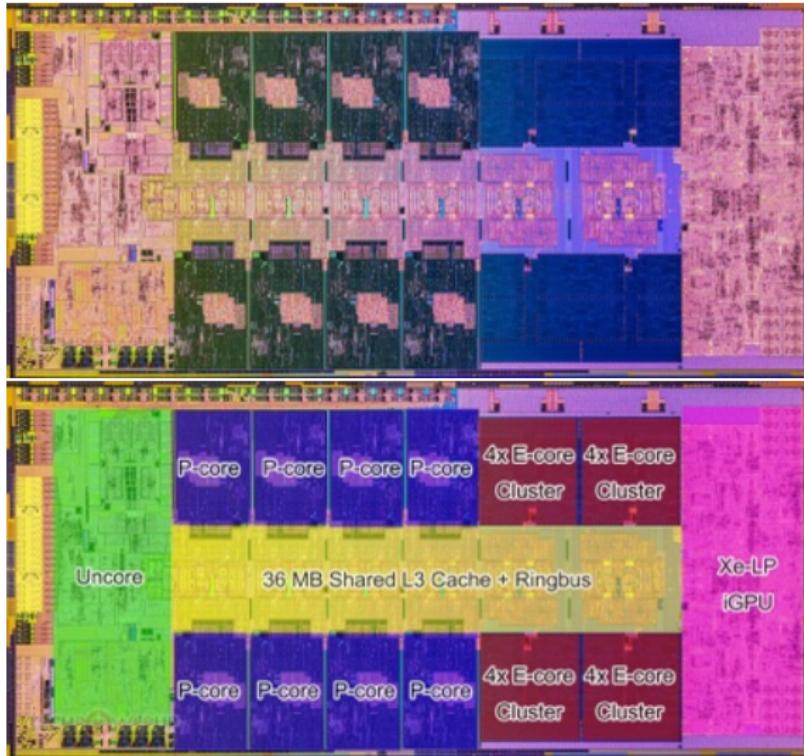
Taktfrequenzen



<https://wgropp.cs.illinois.edu/courses/cs598-s15/lectures/lecture15.pdf>, S. 11, 11.03.2024

Typische Chip-Struktur

Intel Core i9-13900K:



<https://www.techpowerup.com/review/intel-core-i9-13900k/2.html>, abgerufen am 08.06.2023

Schnellster digitaler Supercomputer (top500.org, November 2024):

El Capitan, DOE/LLNL USA

- Rmax: 1742 PFLOPS
- 11 039 616 Kerne
- Ca. 29.581 MW
- About 58.89 GFLOPS/W

Menschliches Gehirn:

- Ca. 38 PFLOPS
- 25 W
- Ca. 1.52 PFLOPS/W

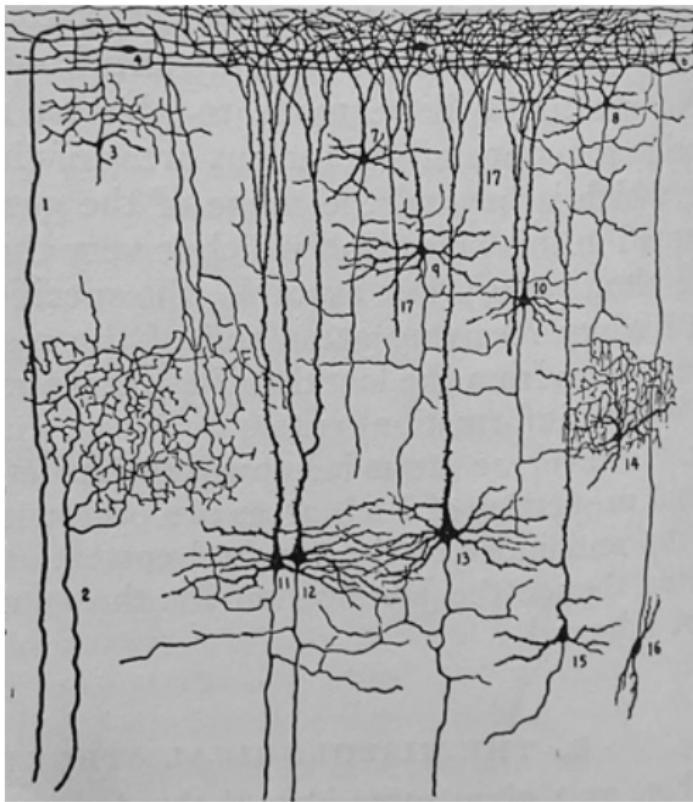
Der „Trick“ biologischer Gehirne ist, dass sie nicht algorithmisch arbeiten – es sind Analogrechner!

Wie schafft die Natur das?

- Ein Gehirn ist keine algorithmische Maschine!
- Es führt keinen Algorithmus aus.
- Es besteht aus ca. 86 Milliarden Nervenzellen, die miteinander verschaltet sind und
- vollkommen parallel arbeiten.
- Das „Programm“ ist die Verschaltung dieser Nervenzellen.
- Werte werden nicht binär dargestellt.

Das ist ein *Analogrechner!*

Cerebraler Cortex



(Quelle: [ECCLES 1953, S. 230].)

Analogrechner

Was, genau, ist ein Analogrechner?

- Er besteht aus *Rechenelementen*, die miteinander verschaltet werden und vollkommen parallel arbeiten.
- Werte werden in der Regel nicht binär, sondern als kontinuierliche Ströme oder Spannungen dargestellt.
- Sie sind extrem energieeffizient (Faktoren von 100 bis 1000 im Vergleich mit Digitalrechnern sind nicht unüblich).
- Sie passen perfekt zu unserer analogen Welt – keine Analog-Digital-Wandlungen etc. erforderlich.
- Sie sind auch perfekt, um neuronale Netze zu implementieren und vermutlich die einzige Chance, KI-Systeme künftiger Generationen zu implementieren.

Ein kleines Beispiel verdeutlicht den zentralen Unterschied zwischen Digital- und Analogrechnern:

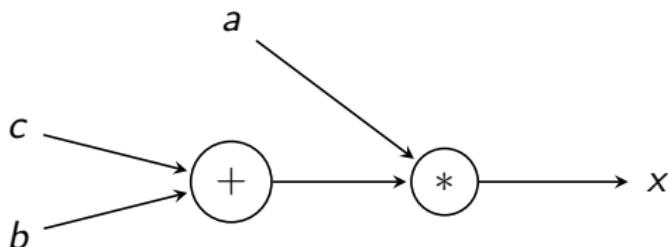
Zu berechnen ist $a(b + c)$ auf einem speicherprogrammierten Digitalrechner:

```
LOAD  A, R0
LOAD  B, R1
LOAD  C, R2
ADD   R1, R2, R1
MULT  R0, R1, R0
STORE R0, ...
```

Das sind vier energieintensive Speicherzugriffe, eine Addition und eine Multiplikation, die im Wesentlichen sequenziell ausgeführt werden müssen.

Langsam und energiehungrig...

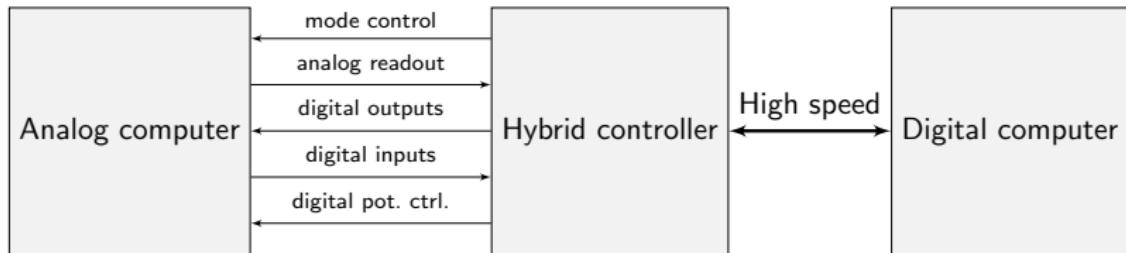
Berechne $a(b + c)$ mit einem Analogrechner:



a, b, c werden durch kontinuierliche Spannungen dargestellt, es gibt keinen Speicher, keinen Algorithmus, nur zwei miteinander verbundene Rechenelemente.

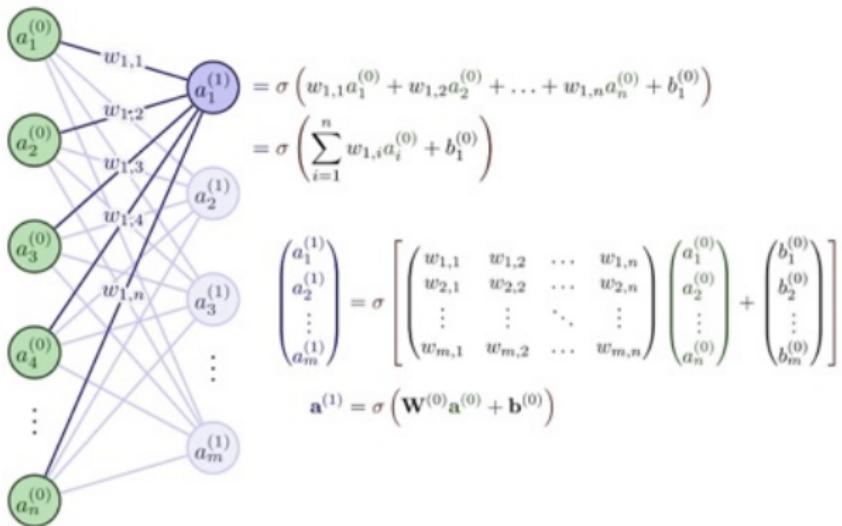
Ideal ist es, wenn man klassische Digitalrechner mit modernen Analogrechnern zu *Hybridrechnern* koppelt.

Der Analogrechner dient hier als extrem energie- (und zeit-) effizienter Co-Prozessor, beispielsweise für Anwendungen in der *künstlichen Intelligenz (KI)*.



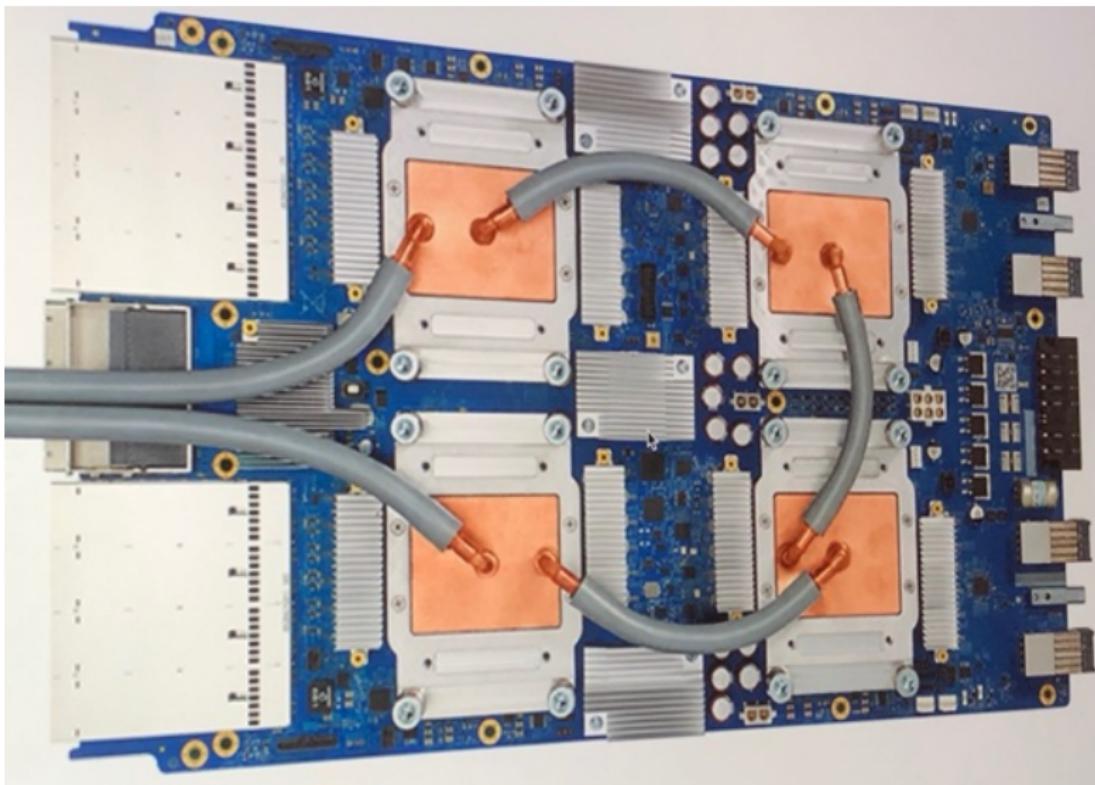
KI

Was genau ist unter *KI* zu verstehen? . . . im Folgenden *künstliche neuronale Netzwerke*, d. h. Netzwerke aus Neuronen, die allerdings im Vergleich zu biologischen Systemen massiv vereinfacht sind:



(Quelle: https://tikz.net/neural_networks/, abgerufen am 25.11.2025.)

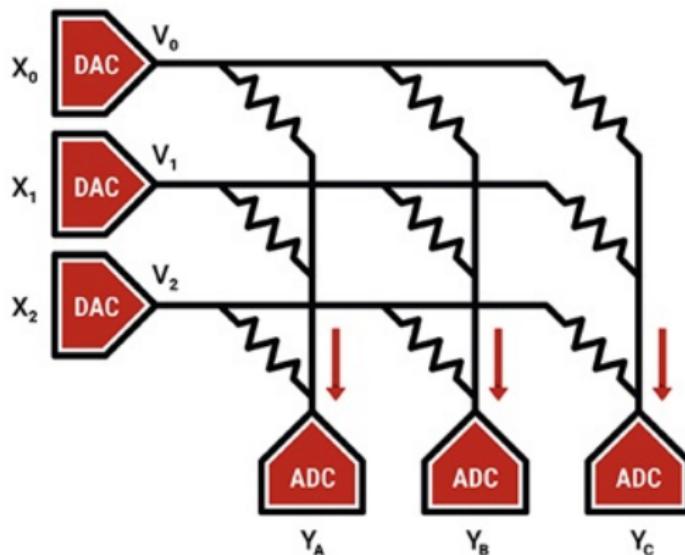
- Dieser Ansatz führt zu unfassbar viel linearer Algebra mit ebenso unfassbarem Rechen- und Energieaufwand.
- Unternehmen wie Microsoft planen, stillgelegte Kernkraftwerke wieder in Betrieb zu nehmen, um ihre Rechenzentren mit Strom versorgen zu können. Das ist zwar technologisch extrem spannend, skaliert aber nicht...
- Kein biologisches Gehirn führt explizite linearalgebraische Operationen aus – diese sind nur ein Ergebnis unserer vereinfachenden Betrachtung natürlicher neuronaler Netze.
- „Wenn man nur einen Hammer hat, sieht jedes Problem wie ein Nagel aus.“ Lineare Algebra passt gut zu klassischen Digitalrechnern, allerdings skaliert dieser Ansatz aus Energiesicht nicht.
- ... auch nicht mit spezialisierter digitaler Hardware wie einer solchen *Tensor Processing Unit (TPU)*:



(Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tensor_Processing_Unit_3.0.jpg, abgerufen am 25.11.2025.)

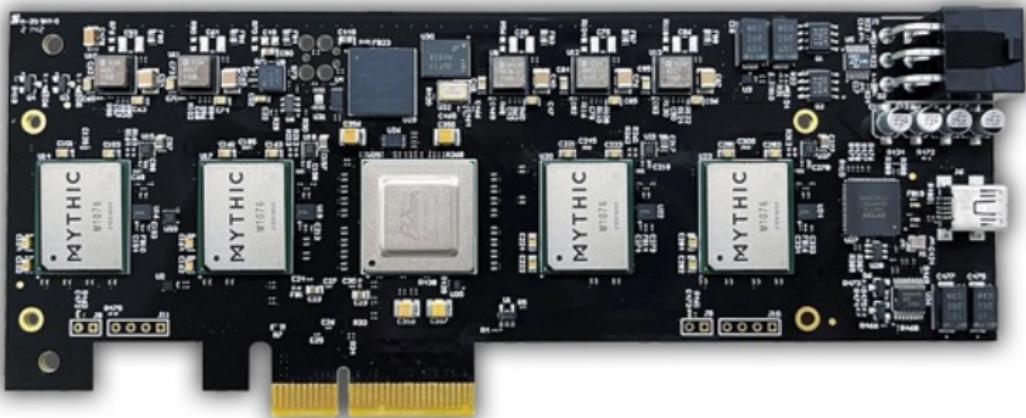
Warum nicht analog?

Das skaliert offensichtlich nicht, aber man könnte die lineare Algebra in Form eines (erstaunlich einfachen) Analogrechners implementieren und letztlich die Natur (Physik) die Berechnungen ausführen lassen. Z. B. so:



<https://mythic.ai/technology/analog-computing/>, abgerufen am 26.06.2023.

Hier löst die KICHHOFFsche Knotenregel zusammen mit einer Matrix aus (einstellbaren) Widerständen Matrix-Vektor-Berechnungen – ganz ohne Algorithmus, vollkommen parallel, hochenergieeffizient. Und das implementiert Mythic AI:

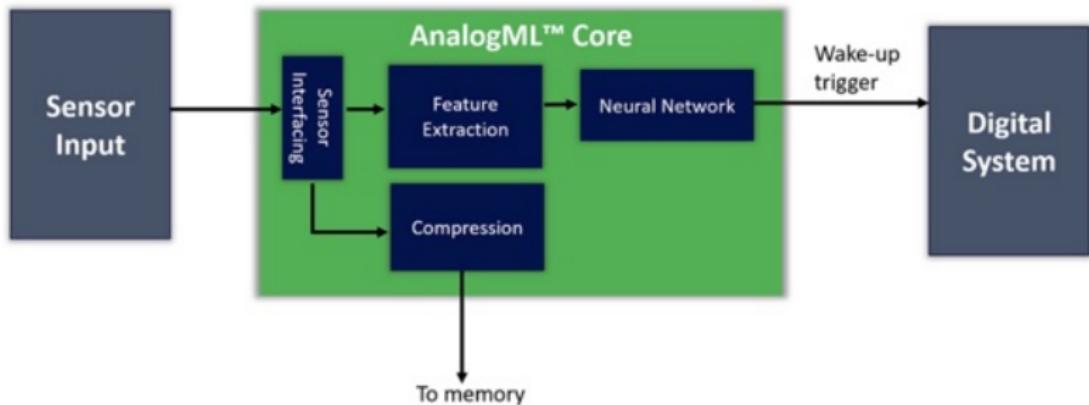


Auch IBM hat einen analogen KI-Beschleuniger:



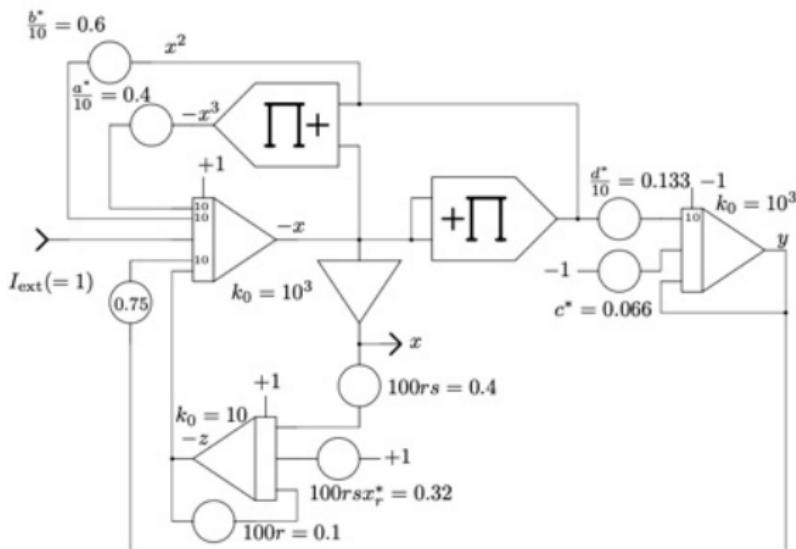
(Quelle: <https://research.ibm.com/blog/the-hardware-behind-analog-ai>, abgerufen am 26.06.2023.)

Auch Aspinity entwickelt solche Systeme:



(Quelle: <https://www.aspinity.com/AnalogML-Core>, abgerufen am 26.06.2023.)

Sind die heutigen – massiv vereinfachten – Modelle neuronaler Netze vielleicht zu vereinfacht? Warum bauen wir nicht elektronische Netzwerke aus (wenigstens halbwegs) realistischen künstlichen Neuronen? Das kann z. B. die anabrid GmbH (mit Standort in Frankfurt/Main):



Spikende/burstende Neuronen

So ein künstliches Neuron verhält sich schon sehr viel realistischer:

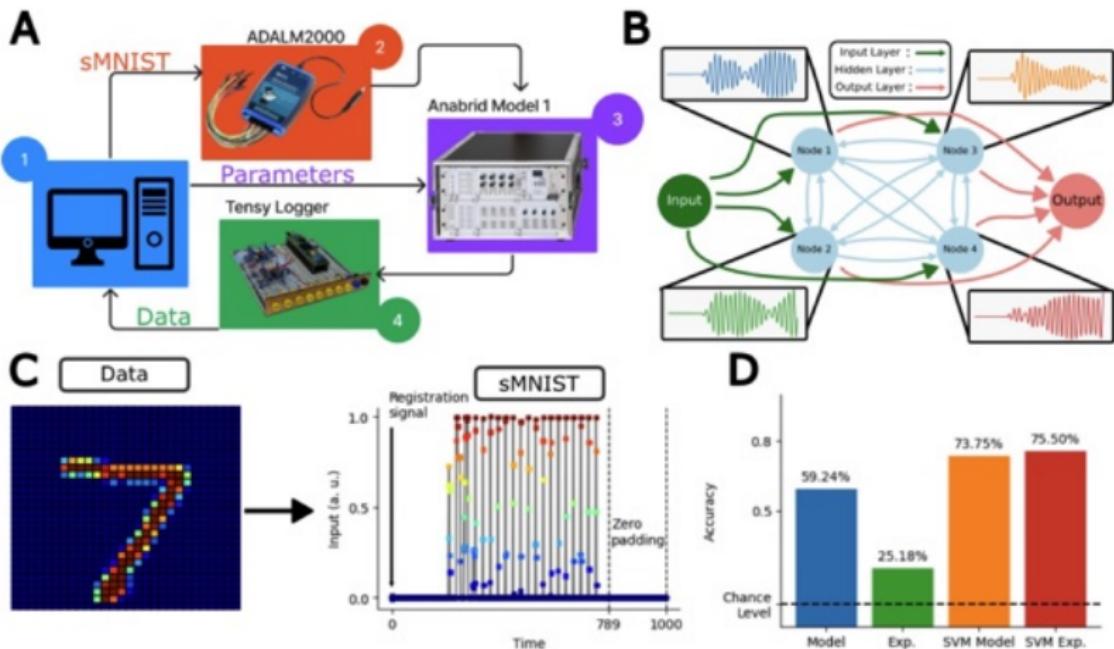


Eine hochinteressante Entwicklung, welche die Zukunft der KI maßgeblich beeinflussen könnte, kommt just aus Hessen, aus dem ERNST-STRÜNGMANN Institut:

- Experimente haben nahegelegt, ein biologisches Gehirn ein wenig abstrakter als Netzwerk aus Oszillatoren zu begreifen.
- Dieser Ansatz ist einem Analogrechner quasi auf den Leib geschneidert.
- Solche Netzwerke erfordern substanzial weniger Gewichte, die trainiert werden müssen, was allein diesbezüglich den Energiebedarf stark verringert.

Siehe [CARVALHO et al. 2025]:

Oszillatornetzwerke



Zukunft...

- Rein digitale (algorithmische) Ansätze werden nicht in der Lage sein, die Basis für künftige KI-Systeme zu bilden.
- In erster Linie sind sie viel zu energieineffizient!
- Analogrechner sind das tragfähigste Konzept für KI-Systeme kommender Generationen.
- Dies ist eine einzigartige Chance für Europa und vor allem für Deutschland, da die Fertigungstechnologien für integrierte Schaltungen, wie sie hierfür benötigt werden, hier verfügbar sind.
- Dies würde die massive (und bedenkliche), fast 100%-ige Abhängigkeit des Standortes von US-amerikanischen bzw. asiatischen Herstellern deutlich verringern.
- Europa und Deutschland könnten bei genügend Investitionen in diese Forschungs- und Entwicklungsbereiche eine Vorreiterstellung in der Welt einnehmen!

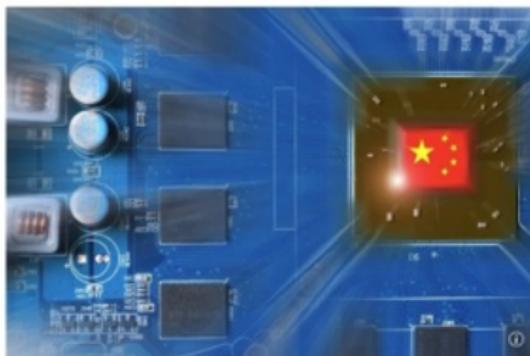
Europa und Deutschland dürfen das Rennen in diesem Bereich keinesfalls verlieren!

China's analogue AI chip could work 1,000 times faster than Nvidia GPU: study

The device also uses less power than conventional computing while achieving accuracy similar to that of digital systems, researchers say

Reading Time: 3 minutes

Why you can trust SCMP



Victoria Beta

Published: 11:00pm, 21 Oct 2025 | Updated: 9:38am, 22 Oct 2025

Sponsored Financial Content

Stay updated with the newest gold market developments.
MarketNews

Stay informed on what's happening next in the oil market.
MarketNews

Wie man Aktienindexpositionen mit Schweizer Präzision erstellt.
UBS - All Capital Alpha

What is the latest on ETFs?
MarketNews

Essential Guide to Inheritance Tax - Free 12 page Guide
Buckingham Gate

(Quelle: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3329820/chinas-analogue-ai-chip-could-work-1000-times-faster-nvidia-gpu-study>, abgerufen am 25.11.2025.)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Happy analog computing!

Der Autor ist unter folgender Adresse erreichbar:
ulmann@anabrid.com.

Bibliography

Bibliography

-  PEDRO CARVALHO, BERND ULMANN, WOLF SINGER, FELIX EFFENBERGER, "An analog-electronic implementation of a harmonic oscillator recurrent neural network", preprint, <https://arxiv.org/pdf/2509.04064>
-  JOHN CAREW ECCLES, *The Neurophysiological Basis of Mind*, Oxford at the Clarendon Press, 1953
-  DANIEL ETIEMBLE, *45-year CPU evolution: one law and two equations*, https://www.researchgate.net/publication/323510528_45-year_CPU_evolution_one_law_and_two_equations, abgerufen am 08.06.2023
-  DINA GENKINA, "Next-Gen AI Needs Liquid Cooling", IEEE Spectrum, <https://spectrum.ieee.org/data-center-liquid-cooling>, abgerufen am 25.11.2025

-  JAMES MYERS, "Future Chips will be Hotter than Ever", IEEE Spectrum, <https://spectrum.ieee.org/hot-chips>, abgerufen am 25.11.2025