
Zurück in die Zukunft –
Wie analoge Rechner unsere digitale Welt
verändern können

Prof. Dr. Bernd Ulmann, anabrid GmbH

29.09.2022

Die seit vielen Jahrzehnten dominierenden Digitalrechner (genauer *speicherprogrammierte Digitalrechner*) stoßen mittlerweile an grundlegende physikalische Grenzen.

Entsprechend rücken andere Technologien ins Rampenlicht (*Unconventional Computing*):

- *Analogrechner* und
- *Quantencomputer*.

Im Folgenden liegt der Fokus auf Analogrechnern.

Probleme klassischer Digitalrechner

Speicherprogrammierte Digitalrechner weisen eine Reihe von Nachteilen auf und stoßen an prinzipielle physikalische Grenzen, welche andere Ansätze zunehmend interessanter werden lassen:

- Hoher Energiebedarf
- Taktfrequenzen sind begrenzt (in erster Linie durch den Energiebedarf, aber auch durch Pipelinelängen etc.)
- Die Integrationsdichte stößt an physikalische Grenzen
- Parallelismus ist schwer zu erreichen, was durch **AMDAHL'S** Gesetz beschrieben wird
- Die algorithmische Steuerung bedingt eine im Wesentlichen sequenzielle Programmabarbeitung
- Nur ein kleiner Anteil der Transistorfunktionen eines modernen Prozessors ist direkt an der Ausführung von Instruktionen beteiligt – ein Großteil wird für die Ablaufsteuerung, Caching, Businterfaces etc. benötigt.



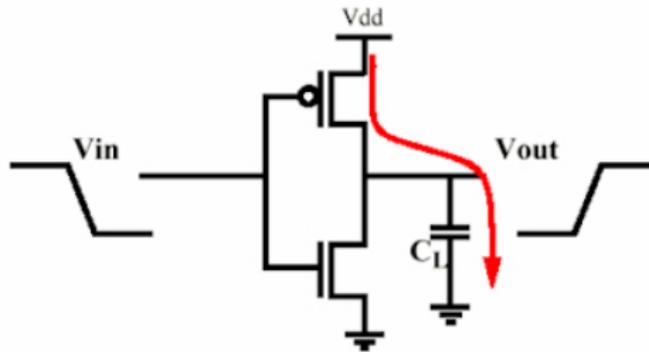
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Columbia_Supercomputer_-_NASA_Advanced_

Kühlung



<http://www.lanl.gov/newsroom/picture-of-the-week/pic-week-1.php>, 23.01.2017.

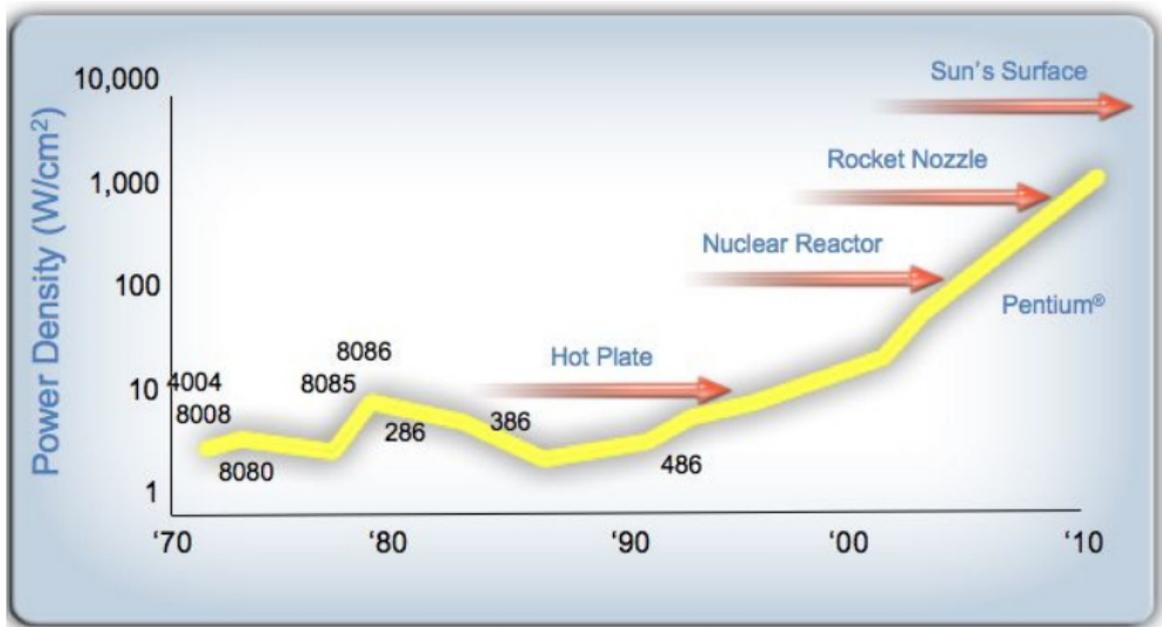
Eine typische Ausgangsstufe eines Gatters hat etwa folgende Gestalt:



Dies bringt eine Reihe von Schwierigkeiten mit sich:

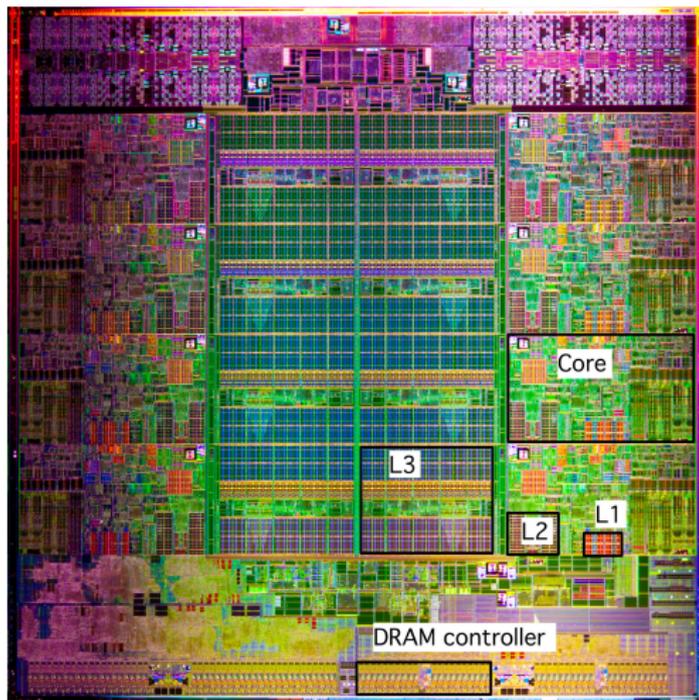
- Die parasitäre Kapazität C_L muss bei jedem Schaltvorgang umgeladen werden
- Während eines Schaltvorganges leiten kurzzeitig beide Transistoren der Ausgangsstufe
- Die Transistoren sind nicht perfekt und weisen Leckströme auf
- Der Energiebedarf hängt super-linear von der Taktfrequenz ab

Energiedichte



<http://pages.tacc.utexas.edu/~eijkhout/istc/html/sequential.html>, 23.01.2017.

Chip-Mikrophotographie von Intels *Sandybridge*:



<http://pages.tacc.utexas.edu/~eijkhout/istc/html/sequential.html>, 23.01.2017.

Derzeit (2022Q4) schnellster Digitalrechner (top500.org):
Frontier, Oak Ridge National Laboratory, USA:

- 1 102 PFLOPS
- 8 730 112 Rechenkerne
- Ca. 21.1 MW Anschlussleistung
- About 52 GFLOPS/W

Menschliches Gehirn:

- Ca. 38 PFLOPS
- 25 W
- Ca. 1.52 PFLOPS/W
- Der Trick ist, dass es sich hierbei um einen Analog- und keinen Digitalrechner handelt

Analogrechnen

Was sind nun Analogrechner?

- Analogrechner beruhen auf *Analogien* – konkret wird beispielsweise ein elektronisches Modell für ein Problem aufgebaut, an dem dann gemessen wird.
- Es gibt keinen Algorithmus zur Steuerung und damit keine Beschränkung auf eine sequenzielle Programmausführung.
- Analogrechner arbeiten inhärent parallel! *AMDAHLs* Gesetz gilt für sie nicht!
- Analogrechner sind sehr energieeffizient.
- Werte werden (meist, aber nicht notwendigerweise) als Spannungen oder Ströme repräsentiert.
- Analogrechner passen hervorragend in unsere analoge Realität – es sind für die Signalverarbeitung keine Analog-/Digitalumwandlungen etc. erforderlich.
- Analogrechner sind in idealer Weise für die Lösung von Problemen, die durch Differentialgleichungssysteme beschrieben werden können, geeignet.

- Analogrechner bestehen aus einer Vielzahl von *Rechenelementen* (hunderte, z.T. tausende, perspektivisch auch sehr viel mehr), Integrierer, Summierer, Multiplizierer etc.
- Diese Rechenelemente werden in geeigneter Weise miteinander verbunden, um ein elektronisches Modell für das zu lösende Problem zu implementieren.
- Da es keinerlei Algorithmus im herkömmlichen Sinne gibt, entfällt die Notwendigkeit zu einer komplexen Ablaufsteuerung.
- Alle Rechenelemente arbeiten vollständig parallel zueinander.
- Letztlich besteht ein Analogrechner fast vollständig aus Rechenelementen.

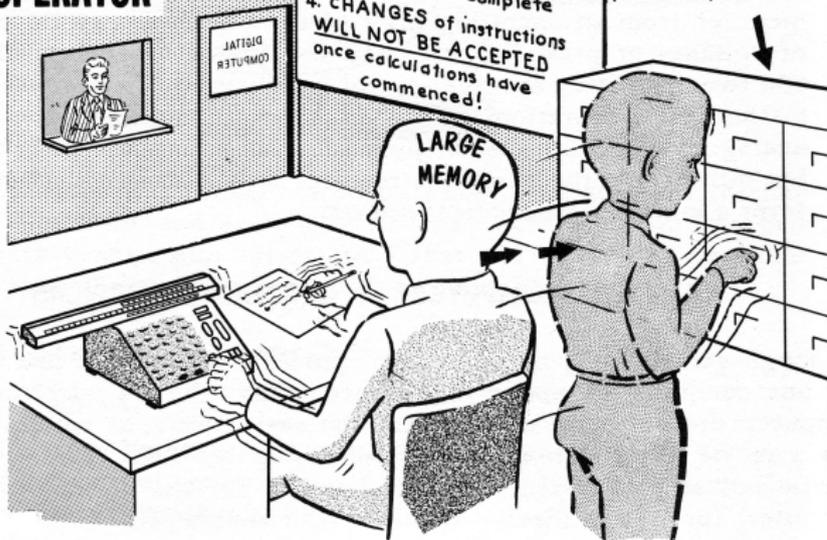
Die beiden folgenden klassischen Bilder zeigen die zentralen Unterschiede zwischen Digital- und Analogrechnern:

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

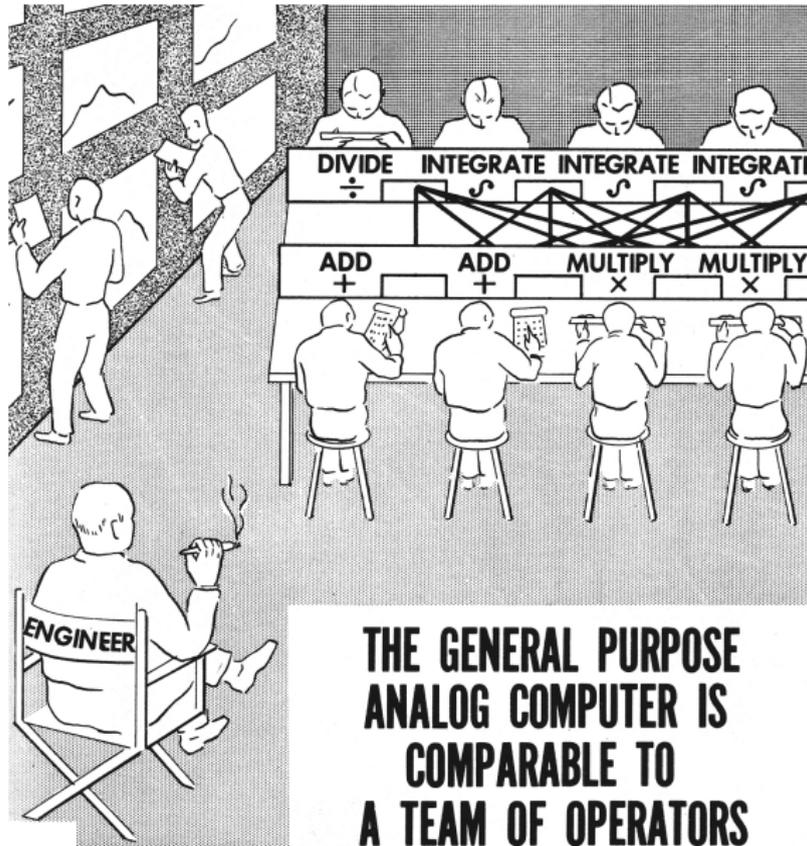
(300 to 10,000

operations/second)

**DESK CALCULATOR
OPERATOR**



Analog computer

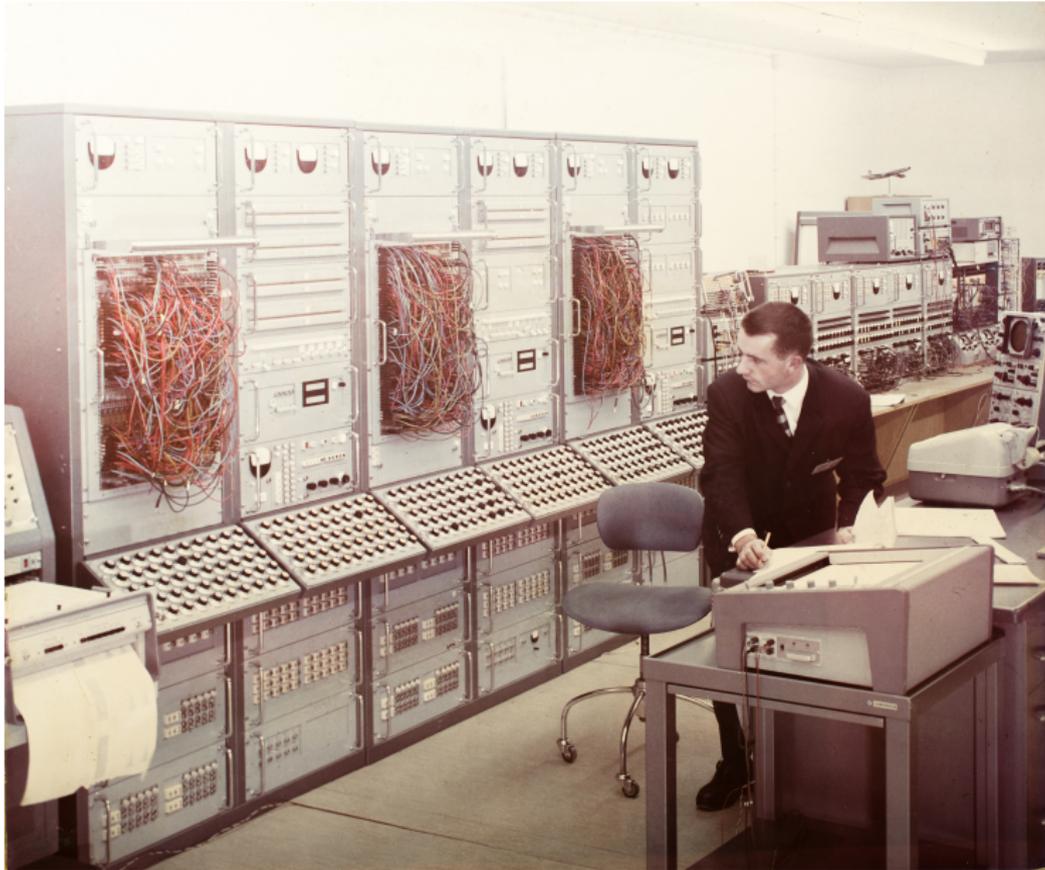


Natürlich haben auch Analogrechner Nachteile, die nicht verschwiegen werden sollen:

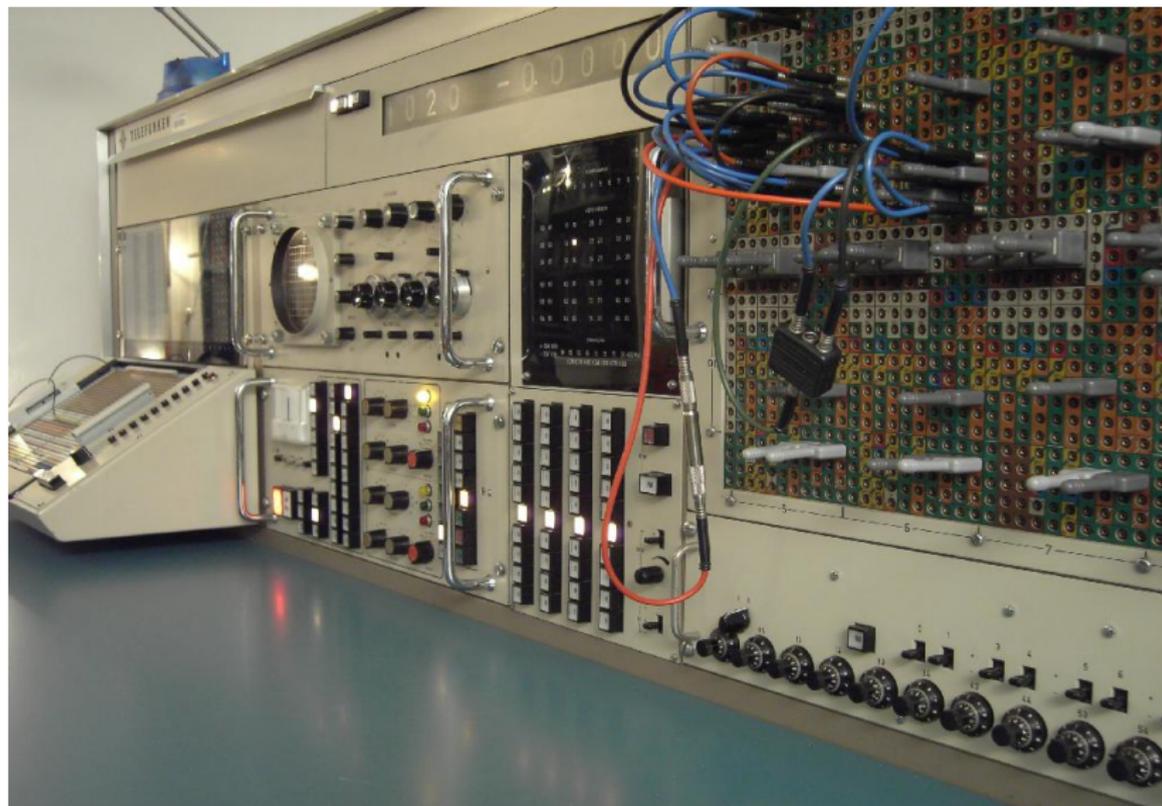
- Beschränkte Genauigkeit (meist kein großes Problem).
- Integrationen erfolgen nur bezüglich der Zeit als freier Variablen.
- Die Erzeugung arbiträrer Funktionen, die nicht analytisch beschrieben werden können, ist aufwändig.
- Variablen sind auf den Wertebereich $[-1, 1]$ beschränkt – Probleme müssen entsprechend skaliert werden.

Historische Analogrechner

Telefunken RA800, 1960



Telefunken RA770, 1966



VW car simulator, 1970s



Warum haben sich diese Rechner seinerzeit nicht durchgesetzt?
Warum wurden sie in den 1980er Jahren fast vollständig von Digitalrechnern verdrängt?

- Digitalrechner wurden, beginnend in den 1960er Jahren, sehr schnell billiger, was Analogrechner seinerzeit nicht konnten (mit Hilfe moderner Technologien ist dies kein Problem mehr).
- Die Programmierung klassischer Analogrechner war ausgesprochen zeitaufwändig, was auch für den Wechsel von einem Programm zu einem anderen gilt (auch dieses Problem lässt sich mit modernen Technologien lösen).
- Digitalrechner konnten im *Time Sharing Betrieb* genutzt werden, was Analogrechner seinerzeit nicht konnten.

Hybridrechner

Interessant für moderne Anwendungen sind Analogrechner in erster Linie als Bestandteil von *Hybridrechnern*:

- Ein Hybridrechner besteht aus einem klassischen Analogrechner, der eng mit einem Digitalrechner gekoppelt ist.
- Der Analogrechner fungiert als Co-Prozessor, um den Digitalrechner von zeitaufwändigen Berechnungen zu entlasten.
- Idealerweise kann der Digitalrechner den mit ihm gekoppelten Analogrechner rekonfigurieren, um ihn an wechselnde Problemstellungen anzupassen.
- Eine solche Kopplung beider Rechnerarchitekturen erfordert eine komplexe Softwareumgebung, bestehend aus einer Programmiersprache zur Konfiguration des Analogrechners, einem entsprechenden Compiler, Programmbibliotheken etc.

Anwendungsbereiche

Mögliche Anwendungsbereiche für moderne Analog- und Hybridrechner finden sich in nahezu allen Lebensbereichen:

- *High Performance Computing* im Allgemeinen
- Künstliche Intelligenz, vor allem künstliche neuronale Netze
- Medizinische Anwendungen, denkbar sind z. B. Implantate mit einem so geringen Energiebedarf, dass dieser perspektivisch mit Hilfe von *Energy Harvesting* gedeckt werden kann
- Industrielle Meß-, Steuer- und Regelungssysteme (nicht zuletzt im Bereich kritischer Infrastrukturen)
- Signalvor- und -nachverarbeitung für Mobilgeräte etc.
- Triggerworterkennung
- Monte-Carlo-Simulationen (Finanzmathematik etc.)
- Optimierungsaufgaben
- Erzeugung echter Zufallszahlen als Schlüssel für kryptographische Anwendungen
- *Physical Unclonable Functions* (hierzu läuft gerade ein vom HMdIS gefördertes Drittmittelprojekt an der FOM)

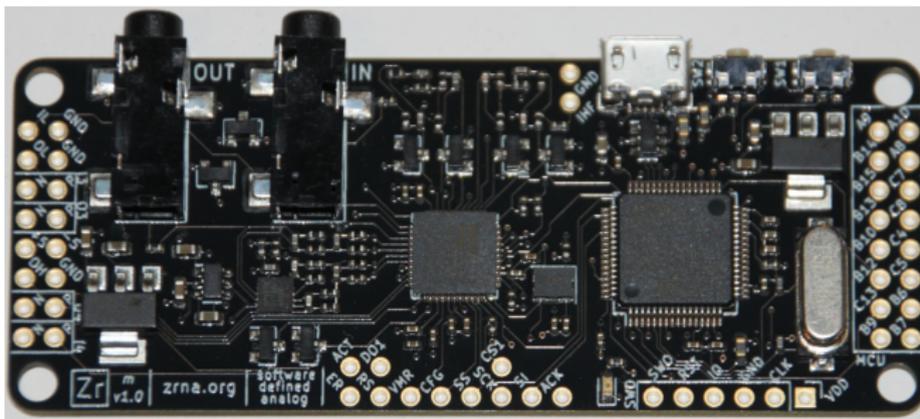
Moderne Entwicklungen

Moderne Ansätze zum Analogrechnen müssen eine Reihe von Herausforderungen lösen:

- Das klassische *Patchpanel* zur Programmierung gehört in Museen – moderne Analogrechner müssen automatisch rekonfigurierbar sein.
- Hierfür wird eine höhere Programmiersprache zusammen mit einem Compiler und entsprechenden Bibliotheken benötigt.
- Es ist eine enge Integration von Analog- und Digitalrechner erforderlich, was ebenfalls entsprechende Software erfordert.
- Es werden Rechenelemente mit sehr hohen Bandbreiten (einige 10 MHz bis idealerweise einige 100 MHz) benötigt.

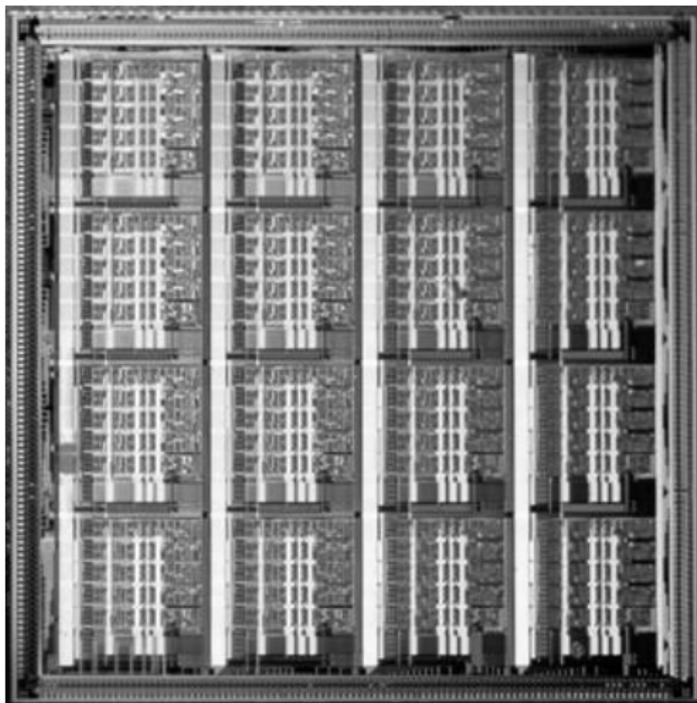
Die folgenden Folien zeigen einige moderne Entwicklungen in diesem Bereich:

Anadigm bietet einfache rekonfigurierbare analoge Bausteine für Aufgabenstellungen in der Signalverarbeitung an:¹



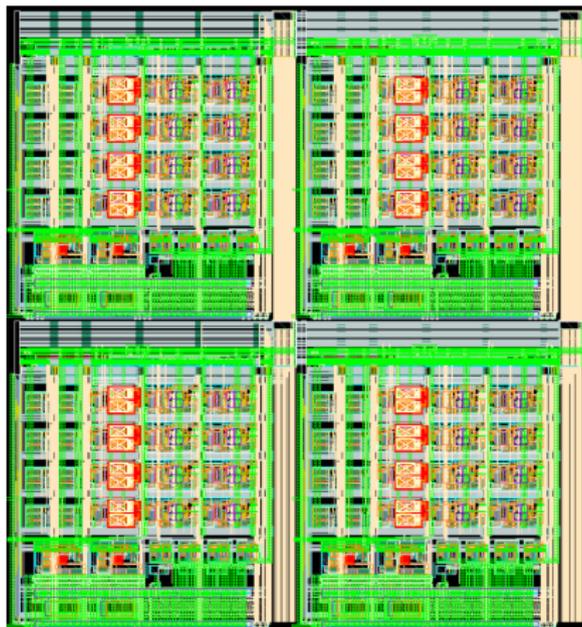
¹Das Entwicklungsboard wird von <https://zrna.org> vertrieben.

Der erste vollständig rekonfigurierbare Analogrechner auf einem Chip wurde 2005 von GLENN E. R. COWAN entwickelt:²



²Siehe [COWAN(2005)].

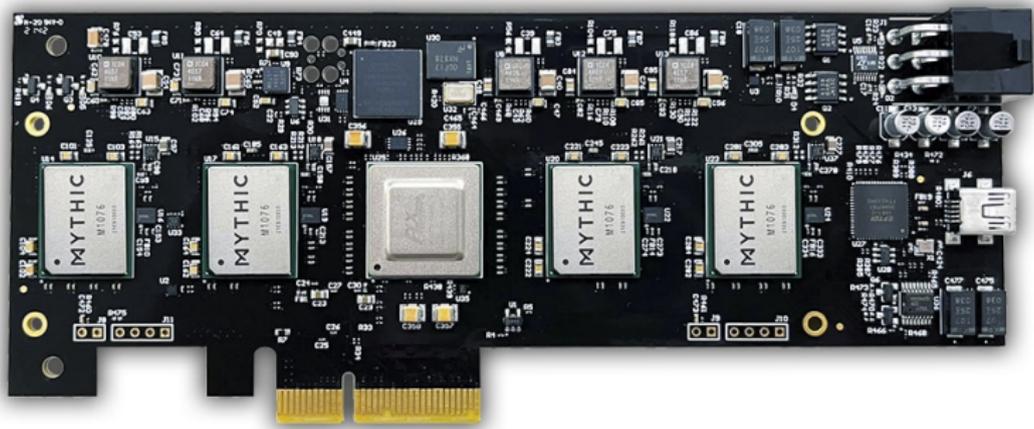
2016 stellte NING GUO einen wesentlich verbesserten Chip vor:³



(Bildquelle: http://yipenghuang.com/wp-content/uploads/2016/07/v2_chip.png, retrieved 2019-09-19).

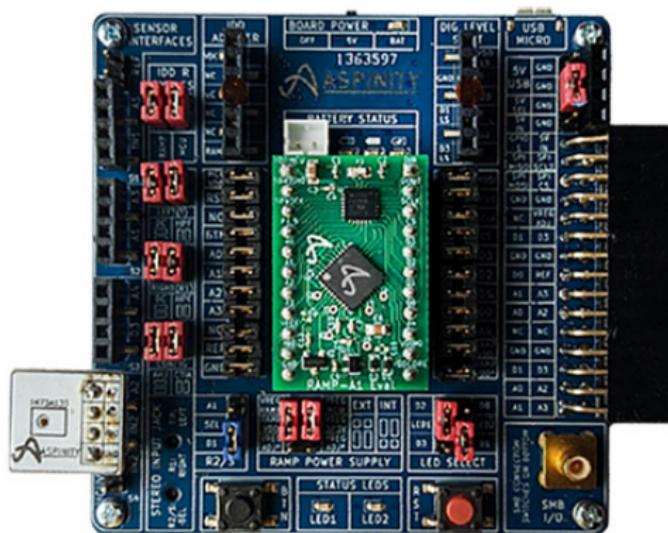
³See [GUO et al.(2016)].

MYTHIC⁴ entwickelt *Analog Matrix Processors (Compute In Memory)* für KI-Anwendungen:



⁴<https://mythic.ai>, abgerufen am 25.09.2022

Aspinity⁵ entwickelt hochintegrierte Spezialanalogrechner für Stimm- und Spracherkennung, Vibrationsklassifikation etc.:



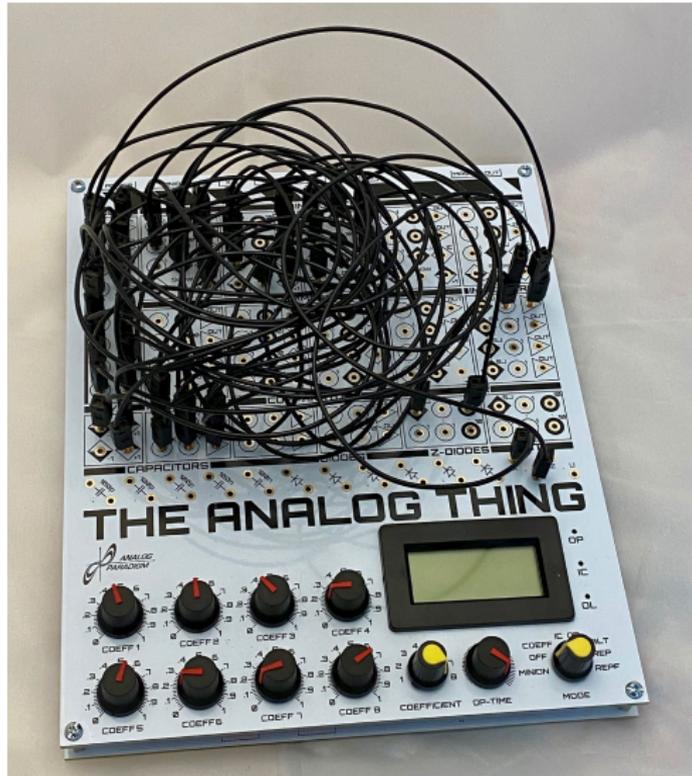
⁵<https://www.aspinity.com>, abgerufen am 25.09.2022

IBM stellte Anfang 2022 einen analogen Coprozessor für KI-Anwendungen vor:⁶



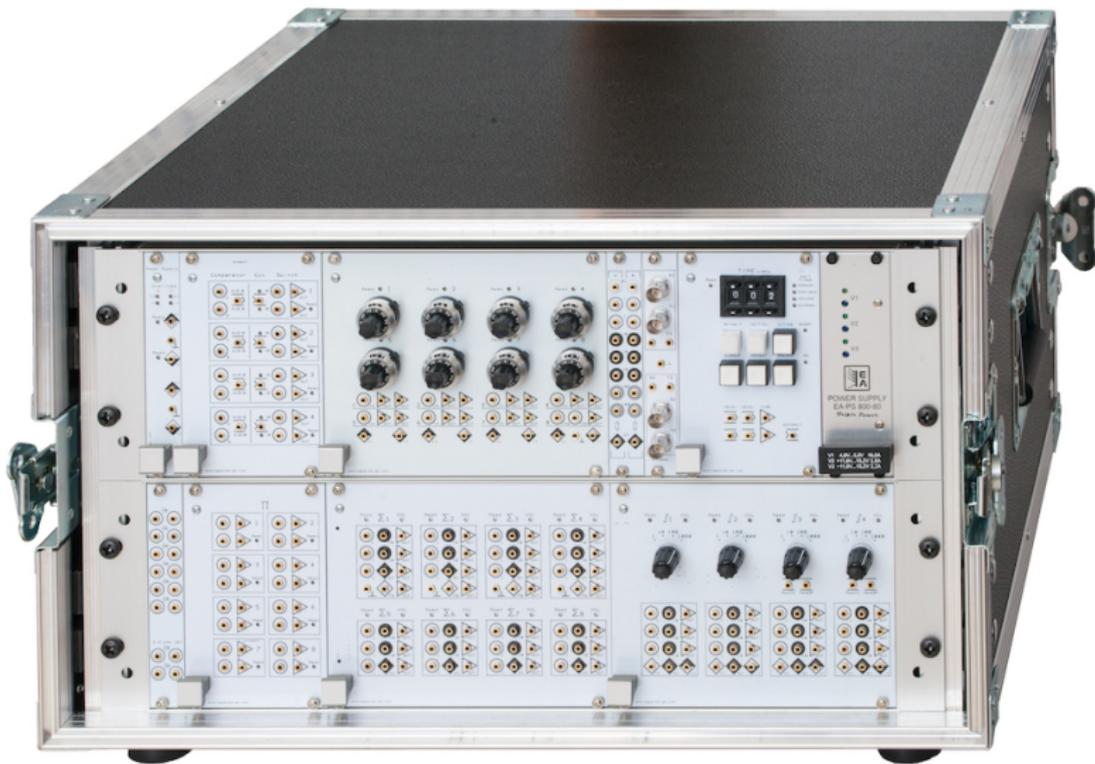
⁶<https://research.ibm.com/blog/the-hardware-behind-analog-ai>,
abgerufen am 25.09.2022

Ein moderner kleiner Analogrechner für Lehr- und Ausbildungszwecke wurde von anabrid entwickelt:





Ein großes modulares Analogrechnersystem ist das *Model-1*:

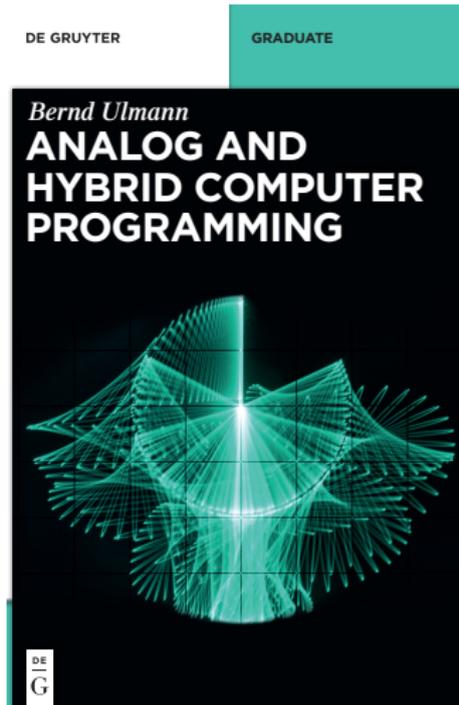


Mit Hilfe analoger Rechentechniken lassen sich *Physical Unclonable Functions* implementieren, mit deren Hilfe eine eindeutige und nicht fälschbare Identifikation von Personen oder Waren mit Hilfe von ID-Tags möglich ist.

Das HMdIS fördert gegenwärtig ein Drittmittelprojekt zur Untersuchung und Implementation solcher Funktionen an der *FOM Hochschule für Oekonomie und Management*.

Untersucht wird in diesem Projekt die Eignung chaotischer Systeme als Grundlage solcher PUFs. Die Grundidee hierbei ist, dass solche Systeme so empfindlich auf geringste (und unvermeidliche) Änderungen in ihrer Implementation reagieren, so dass keine Kopien hiervon erzeugt werden können, die sich exakt wie das Original verhalten.

Eine detaillierte Einführung in das Analog- und Hybridrechnen findet sich in⁷



⁷See [ULMANN(2020)].

Danke für Ihre Interesse!

`ulmann@anabrid.com.`

Bibliographie

-  GLENN EDWARD RUSSELL COWAN, *A VLSI Analog Computer / Math Co-processor for a Digital Computer*, Columbia University, 2005
-  N. GUO, Y. HUANG, T. MAI, S. PATIL, C. CAO, M. SEOK, S. SETHUMADHAVAN, and Y. TSIVIDIS, “Energy-Efficient Hybrid Analog/Digital Approximate Computation in Continuous Time”, in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 7, pp. 1514-1524, July 2016
-  Thos. D. Truitt, A. E. Rogers, *Basics of Analog Computers*, John F. Rider Publisher, Inc., New York, December 1960
-  BERND ULMANN, *Analog and hybrid computer programming*, DeGruyter, 2020