

## [ZUM ANALOGCOMPUTER]

### ANALOGRECHNER

Operationsverstärker

"Die Zukunft ist analog"

Das kybernetische Modell

Schaltung zwischen analog und digital

Ringmodulatoren

Halb-digitale Momente des Analogrechners

Eine implizit mathematische Medienphysik

Unwillkürliche Analogrechner / Implizite Differentialmathematik

Der epistemologische Einsatz des Analogrechners

Nicht-numerische Mathematik

Der *Differential Analyzer* (Vannevar Bush)

Computer als Analogrechner

Datenflußrechner

Analogcomputer und *anti-aircraft prediction*

Homomorphien, Isomorphien: Diagrammatisches Denken in Modellen

Definitionen des Analogrechnens

Analogcomputer, FPGAs, Schwingungen

[Analogrechner an TU / DTMB]

Unschärfen: Dem Realen auf der Spur

(Elektro-)Mechanische Analogrechner

Wirtschaftsmodellierung

Mathematische Maschinen (*Analogue Calculator*)

Mathematik / Musik: Das Monochord als sonischer Analogcomputer

Der Rechenschieber

Mechanische Integratoren

Analogcomputer und Quantenmechanik

Analogcomputer als akustischer Synthesizer

Schleimpilze: Bio-Informatik (analog)

Wettervorhersage mit Analogcomputer (Patch Lorenz-Attraktor)

Digital Signal Processing

Dreiwertige Logik

Algorithmen? Programmierung des Analogcomputers

Analogcomputer und Kernphysik

(Elektro-)Mechanische Analogrechner

Implizite Analogrechner

Experimentelle Simulation mit dem Analogcomputer

Between emulation and simulation of dynamic worlds

Demonstrations-Analogrechner der Technischen Sammlung Dresden

Der Heathkit EC-1

Auch Fernsehbilder: halb-digital

Allianz von analog und digital: Der Hybrid-Rechner

Oszilloskopien

Nomogramme als Analogrechner

Das privilegierte Verhältnis des Analogrechners zur Differentialrechnung

Lern-Analogcomputer

Optische Funktionsgeber

Kybernetische Neurobiologie, Künstliche Intelligenz und der Analog-  
respektive Hybridcomputer

Neuronale Netze: Analogcomputer versus Turing-Maschine?  
Was ist am sogenannten Digitalcomputer überhaupt „digital“?  
Informatisierung des Analogcomputers?  
Die vergangene Zukunft des Computers: Analogrechner  
"Erfahrungen mit Analogrechnern und Modellregelkreisen"  
Rechnen, Hören und Sehen mit klassischer Elektronik: Analogcomputer  
und Synthesizer in gegenstrebigter Fügung  
Diverse Notizen "Analogcomputer"  
Elektronische Modellierung neuronaler Prozesse / Simulation  
Flugsimulation als Analogcomputing  
Emulation oder Simulation?  
Rhythmogramme und Analogrechnermusik

## ANTIKYTHERA-MECHANISMUS

Beispiel: Mechanismus von Antikythera  
A/historizitäten: Materiale Entropie *versus* symbolischer Kode  
Der Mechanismus von Antikythera als Analogcomputer  
Medien als aktive Archäologen solcher Artefakte  
Das Differential  
Planetarische Zeit (und jenseits)

## ANALOGRECHNER

### **Operationsverstärker**

- Operationsverstärker: invertierender und nicht-invertierender Eingang;  
idealerweise: unendliche Spannungsverstärkung. Demgegenüber dann  
Rückführung des Ausgangssignals. Wikipedia: "Das Design von  
Operationsverstärkern ist darauf ausgerichtet, dass deren eigentliche  
Funktion weniger durch den Operationsverstärker selbst als viel mehr  
durch die äußere Beschaltung festgelegt wird. <...> Der ideale  
Operationsverstärker ist ein stark vereinfachtes Modell, in dem die  
parasitären Eigenschaften realer Operationsverstärker vernachlässigt  
werden."

- einfacher OP fungiert mit seinen zwei Eingängen auch als  
Differenzverstärker; vgl. das sogenannte Rekursive Filter in der Informatik  
als diskretes Gegenstück; dient dort der Glättung von Signalen,  
vergleichbar mit dem Shift-Register (der aber nur einen Kanal darstellt, im  
Unterschied zu den zwei Eingängen des OP)

- In der von Philbrick hergestellten Form sieht der Operationsverstärker als  
elektronisches Bauteil auf Basis zweifacher Elektronenröhren zunächst aus  
wie ein Flipflop aus dem Z22 der Zuse KG. Beide Realisierungen sind  
tatsächlich strukturverwandt; der OP schaltet beide Röhren als  
Mitkopplung, der Flipflop als Rückkopplung (Hinweis Henry Westphal,  
Berlin, 3. November 2011)

- Als medienepistemisches Ding realisiert im Analogcomputer  
Operationsverstärker in einer spezifischen Weise ein Kernanliegen der

Kybernetik, nämlich die negative Rückkopplung. Der OP ist heute noch wirksam in allen möglichen (ansonsten digitalisierten) Elektroniksystemen, etwa in Sensoren

- vollmechanische Flipper-Automaten stellen ein stochastisches Spiel dar; die Triggerung durch Sprungfedern läßt die Kugeln durch die mit Widerständen bestückten Felder irren, nahe am Prinzip der Operationsverstärker.

- Operationsverstärker: eine komplexe Schaltung zur Ausführung analoger Rechenoperationen. "Eine Eingangsspannung um einen genauen Faktor zu verstärken entspricht der Rechenoperation Multiplikation" <Lernpaket Elektronik 2006, 87>; ebenso lassen sich damit Addition und Subtraktion „mit großer Genauigkeit“ - genau die Grenze zum präzisen Digitalen - durchführen. „Ursprünglich wurden diese Schaltungen für Analogrechner entwickelt, die Vorgänger heutiger Computer“ - womit aber die Vorgeschichte des Digitalcomputers nicht die eigene ist. „Heute sind die Universalbausteine für die unterschiedlichsten Aufgaben“ <ebd.>.

- OPV = komplexe integrierte Schaltung (auf Röhren-, später Transistorbasis). Funktionen: der Differenzverstärker, der kleinste Differenzen zwischen den Eingängen erheblich verstärkt = ebd., Unterkapitel „Den kleinen Unterschied verstärken“; Operationsverstärker entwickelt zur Realisierung mathematischer Operationen (Addieren, Subtrahieren, Invertieren, Skalieren, aber auch Differenzieren und Integrieren); Operationsverstärker verstärkt kleinste Eingangsdifferenzen zu großen Ausgangsdifferenzen

- Nyquist-Kriterium (Differenz zwischen schwacher und starker Kausalität), etwa bei Anstoß zweier zweiarmiger Pendel a) aus gleicher Lage mit starker Inklination (Gravitation), so daß beide fast synchron pendeln, und b) aus schwacher Ausgangslage (beide verhalten sich dann non-linear zueinander)

## **"Die Zukunft ist analog"**

- <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Wired-Konferenz-Die-Zukunft-ist-analog-und-sozial-1360961.html>; Oktober 2011

- Ansprache von Rechnerressourcen erfolgt über verschiedene Masken und Vorlagen, die der Biologie näher stehen, etwa *die pulsbasierte Taktung* von Mikroprozessoren. Alan Turing war bereits der Ansicht gewesen, dass sich nicht deterministische, sondern lernfähige Rechner durchsetzen werden - eine "Orakel-Maschine", die ab und zu auch Vermutungen anstellt. Genau dies bietet Googles Suchmaschine mit dem "Auf gut Glück"-Knopf: "Menschen machen zufällige Klicks und die Maschine lernt davon." So kann Intuition mit Erfindungsgabe ersetzt werden

- Ausdruck "an Stellschrauben drehen": konzeptueller Begriff entstammt dem haptisch-intuitiven Modell des Analogcomputers

"Wir erleben eine analoge Revolution, die digital vorangetrieben wird" (Richard Seymour) - etwa persönliche Agenten wie "Siri" im neuen iOS und iPhone von Apple, die ständig mit einer Person lebten und ihre Wünsche registrieren. Entscheidend sei dabei nur, dass die personenbezogenen Daten in der Kontrolle ihres Eigentümers blieben und nicht "in die Cloud" wanderten.

## Das kybernetische Modell

- 1876 von Lord Kelvin (William Thomson) formulierte Grundidee für die elementare Komposition von Analogrechnern: Der Ausgang eines Elementes, das am Ende einer Kette von Elementen liegt, wird mit dem Eingang des Anfangselementes rückgekoppelt.

---

- Georg Klaus: Kybernetik = Wissenschaft von abstrakten Systemen, die „als theoretische Analogiemodelle bestimmte wesentliche allgemeine Eigenschaften von Klassen dynamischer Systeme in den verschiedenen Bereichen der Wirklichkeit – Regelung, Selbstorganisation und Selbstreproduktion, Informationsverarbeitung und -speicherung, strategisches Verhalten und andere Eigenschaften“ - widerspiegeln.<sup>1</sup> Die Auswahl an Parametern ist hinreichend begrenzt, ohne Anspruch auf Einbezug aller möglicher Kriterien; insofern eine Heuristik.

## Schaltung zwischen analog und digital

- Techno/logie = Verschränkung von Materie und Schaltplan (also Hardware und Logik). Im Computer ist dieser Schaltplan auf Ebene der Programmierung nicht fest verdrahtet, damit mathematisierbar; die Verkabelung (*patching*) wird durch Algebra ersetzt.

- Recht eigentlich ist die Meßtechnik eine operative Entscheidung, etwa die Balkenwaage, die eine Gewichtung in eine analoge oder digitale Form bringt: einen Zeigerausschlag oder eine dezimale oder binäre Zahl.

- ETH Zürich, *online*-Kurs "Elektrotechnik", S. 45: Der ideale „Ein/Aus“ Schalter ist medientechnisch ein ideales Bauelement für binäre Logik und er wird medienlogisch durch binäre Logik beschrieben. Im offenen Zustand besteht keine Verbindung zwischen den Klemmen (Leerlauf, unendlicher Ohm'scher Widerstand, Leitwert Null). Im geschlossenen Zustand werden sind die Klemmen ideal miteinander verbunden: ein Kurzschluss, bzw. Ohm'scher Widerstand Null, bzw. unendlicher Leitwert. Wird beispielsweise ein solcher Schalter zur Zeit  $t_1$  eingeschaltet, so gilt für Schalterstrom  $i$  und Schalterspannung  $u$ :  $i = 0$  falls  $t < t_1$  und  $u = 0$  falls  $t > t_1$ . <...> In logischen Schaltungen kann man das dynamische in erster Näherung vernachlässigen und auch die Spannungen und Ströme nach dem Schaltvorgang statisch behandeln. Praktisch ist dies allerdings

---

<sup>1</sup> Georg Klaus, Wörterbuch der Kybernetik, Bd. 1, Frankfurt/M. 1969, 324

insbesondere bei schnellen Schaltvorgängen problematisch.

## **Ringmodulatoren**

- Ringmodulatoren "Analogschaltungen mit denen zwei Eingangssignale zu einem Ausgangssignal gemischt werden. Das Ausgangssignal entspricht dabei der Summe und der Differenz der beiden Eingangssignale, enthält aber nicht die ursprünglichen Eingangssignale.

Solche Ringmodulatoren werden in der Trägerfrequenztechnik und in Synthesizern eingesetzt. In Synthesizern sind die generierten Ausgangssignale rau, grell und unharmonisch. Werden als Eingangssignale oberwellenhaltige Signale wie Rechteck- oder Dreieckssignale benutzt, dann entstehen komplexe Ausgangssignale mit Hall-ähnlichem oder Glocken-gleichen Klang."<sup>2</sup>

## **Halb-digitale Momente des Analogrechners**

- rechnen Digitalcomputer beliebig genau. Sie behandeln Turing zufolge alle Größen „und gerade die Zeit“ als diskrete Elemente, also nach dem Vorbild des alphabetischen Codes, gleich der „vulgären Zeit“ (Heidegger) der Uhren. Turing schreibt 1947 über den digitalen Computer, „daß der Taktgeber uns erlaubt, Diskretheit in die Zeit einzuführen, so daß die Zeit zu bestimmten Zwecken als eine Aufeinanderfolge von Augenblick anstatt als kontinuierlicher Fluß betrachtet werden kann“ - hier im Bund mit dem quantisierenden Sampling, das Zeit als Kehrwert von Frequenzen behandelt. Epistemologisches Scharnier ist hier die Fourieranalyse, die ein Klangereignis, also ein Signal in der Zeit, als Komposition von Frequenzen, also rechenbaren Zeitwerten behandelt. McLuhan stellt - über Lewis Mumford hinausgehend - einen Zusammenhang zwischen Vokalalphabet, Gutenbergscher Typographie, Uhrwerk und Fließbandarbeit her; Kittler zufolge macht dies Digitalcomputer "zwar so dumm wie vormals Taylors Fließbandarbeit und unfähig, Differentialgleichungen überhaupt anzugehen, aber es löst alle Intelligenz in elementare, also machbare Grundrechenoperationen auf. Anstelle der klassischen Differentialgleichungen sind Differenzgleichungen getreten und anstelle der ebenso eleganten wie heiklen Fouriertransformation ihre schnelle diskrete Variante, die <...> entstand, um noch Blitzkriege im Mikrosekundenbereich zeitdiskret abtasten zu können. Die zeitdiskrete Abtastung begann bekanntlich mit der Morsetelegraphie, ihren Relais und Tastern. Zum erstenmal definierte schiere Dauer in einer standardisierten Zeit den Zeichenstatus von Punkten und Strichen“<sup>3</sup>

- wie es vormals allein die Prosodie leistete (auf die Augustin in Buch XI

---

2 Lexikon IT Wissen, <http://www.itwissen.info/definition/lexikon>, Eintrag "Ringmodulator", Zugriff 22. Oktober 2009

3 Friedrich Kittler, Am Ende der Schriftkultur, in: Gisela Smolka-Koerdt / Peter M. Spangenberg / Dagmar Tillmann-Bartylla (Hg.), Der Ursprung von Literatur. Medien, Rollen, Kommunikationssituationen zwischen 1450 und 1650, München (Fink) 1988, xxx-300, hier: 296

seiner *Confessiones* im Zusammenhang mit der Frage nach der Zeit ausdrücklich rekurriert)

- das Reissche Telephon: induzierte Unterbrechungen (durch Öffnen und Schließen des Stroms) verführen den Eisenkern bei höheren Oszillationen, als es die natürliche Materialität des Eisenkerns verträgt, zu quasi-Obertönen: „Der Eisenstab gibt nicht mehr seinen Longitudinalton, sondern einen Ton, dessen Höhe oder Tiefe der Unterbechungsahl (in gegebener Zeit) entspricht“ - das Analoge, buchstäblich. „Der Stab reproducirt den Ton, der dem Unterbechungsapparat zugeführt wurde“ = Reiss, zitiert nach: Steinbuch 1968: 73

- "Bei manchen Analogrechnern sind Einrichtung vorgesehen, die ein selbsttätiges Anhalten nach einer einstellbaren Zeit oder ein periodisches Anhalten nach gewissen Zeitabständen erlauben."<sup>4</sup>

- Sampling erfolgt bereits mit analogen Rechenelementen im Analogcomputer: "Bei der Berechnung und Simulierung kontinuierlicher linearer Systeme mit einem elektronischen Analogrechner ist die Integration die fundamentale Rechenoperation. An die Stelle des Integrators tritt bei der Untersuchung von diskontinuierlich arbeitenden Systemen der Abtaster, der die Eingangszeitfunktion zu den Abtastzeitpunkten mißt und über eine Abtastperiode speichert."<sup>5</sup>

- "Parametron", ein Digitalcomputer, der mit Hochfrequenzen in Phasenverschiebung rechnet. So bewegt es sich aufeinander zu: einerseits der Digitalcomputer, der im Konkreten (wie von Norbert Wiener in den Macy-Konferenzen betont) immer nur annäherungsweise "digital" schaltet, und andererseits der Analogcomputer, der sich in Grenzen "digital" zu verhalten vermag. In der konkreten Materie sind beide Weise "aufgehoben" (Hegel); analoges XOR: <http://www2.informatik.hu-berlin.de/~oberthol/html/Analog%20XOR.html>

## **Eine implizit mathematische Medienphysik**

- Analogrechner vollzieht keine unmittelbare Analogie zur Physik der Welt, sondern basiert auf der Äquivalenz der mathematischen Beschreibung seines Verhaltens zur analogen mathematischen Analyse eines Weltvorgang. In dieser mathematischen Analyse aber ist die alternative Option, nämlich die unmittelbar mathematische Errechnung eines Weltäquivalents im Digitalcomputer, bereits angelegt. Im Software-Paket *Eisenbahn.exe european class* (Software Untergrund, Klettgau 1999), also einer virtuellen Modelleisenbahn, sagt es im Kapitel zum Rollmaterial: "Die Lokomotiven und Waggonen unterliegen übrigens berechneten physikalischen Gesetzmäßigkeiten" = Handbuch S. 24

4 Wolfgang Giloi / Rudolf Lauber, Analogrechnen. Programmierung, Arbeitsweise und Anwendung des elektronischen Analogrechner, Berlin / Göttingen / Heidelberg (Springer) 1963, 21

5 A. Kley / G. Meyer-Brötz, Analoge Rechenelemente als Abtaster, Speicher und Laufzeitglieder, in: Elektronische Rechenanlagen Bd. 3 (1961), Heft 3, 119-122 (119)

- beschreibt James Clerk Maxwells mathematische Entfaltung von Michael Faradays Entdeckung des elektromagnetischen Feldes das Verfahren als eines, das die Unterstellung mathematischer Analogien im Analogcomputer vorwegnimmt: "Um physikalische Vorstellungen zu erhalten, ohne eine spezielle physikalische Theorie aufzustellen, müssen wir uns mit der Existenz physikalischer Analogien vertraut machen. Unter einer physikalischen Analogie verstehe ich jene theilweise Aehnlichkeit zwischen den Gesetzen eines Erscheinungsgebietes mit denen eines andern, welche bewirkt, dass jedes das andere illustriert. Auf diese Art sind alle Anwendungen der Mathematik in der Wissenschaft auf Beziehungen zwischen den Gesetzen der physikalischen Grössen zu denen der ganzen Zahlen gegründet, so dass das Streben der exacten Wissenschaft darauf gerichtet ist, die Probleme der Natur auf die Bestimmung von Grössen durch Operationen mit Zahlen zurückzuführen" = James Clerk Maxwell, Über Faradays Kraftlinien (1855/56), in: Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften, Bd. 69, herausg. v. Ludwig Boltzmann, Reprint Thun / Frankfurt/M. (Harri Deutsch) xxx, 4

- Elektronischer Analogrechner EAI-TR 48 (Electronic Associates Ltd., USA, 1968), Exemplar im Deutschen Museum München, Inv. Nr. 1995-482, übernommen vom Institut für Flugmechanik und Flugregelung (Technische Universität München). Beschreibung an Museumsvitrine: simuliert Rechenvorgänge durch Umwandlung elektrischer Spannungssignale. Ein Analogrechner bildet die mathematische Beschreibung der Flugzeugbewegungen mit elektronischen Rechenelementen nach; Helmut Hölzers Analogcomputer zur Simulation des Flugs der VS (A4)

- derzeit auf Digitalrechnern Analogrechnerschaltungen selbst simuliert und parallel arbeitende Digitalcomputer erstrebt<sup>6</sup>

- Programmierer verbindet auf dem Steckbrett die modularen Rechenelemente (Integratoren, Summierer, Multiplizierer); die Verkabelung simuliert die Flugbewegung. Durch Messung der umgewandelten Eingangsspannungssignale läßt sich der zeitliche Verlauf der Flugbewegungen verfolgen.

- modulare Beschaltung ist im Grunde ein "Experimentalsystem" im Sinne der Definition von Hans-Jörg Rheinberger

- Unterschied zwischen Digital- und Analogcomputer: Vgl. Welle/Teilchen-Differenz; die (scheinbare) Opposition wird aufgehoben im Begriff (und in der Mathematik) der Wahrscheinlichkeitwellen (Schrödinger), im *computing* konkret als digitale Signalverarbeitung als diskrete (teilchenhafte) Meisterung von (metaphysisch gesehen) „kontinuierlichen“ Prozessen (der *physis*)

- Elektronenröhren für die Impulstechnik (etwa EDVAC) zunächst der Radiotechnik entnommen; erweisen sich aber als überbelastet. Daher Entwicklung spezieller Computerröhren (wie für Zuse Z22)

„Die Rechengrößen sind beim elektronischen Analogrechner Amplituden von Spannungen. Die Verarbeitung erfolgt in Rechenelementen in

---

<sup>6</sup> Ein Argument von Gunter Schwarze in seiner Festrede aus Anlaß der Enthüllung einer Gedenktafel für Helmut Hoelzer auf Usedom

paralleler Arbeitsweise“<sup>7</sup>; nicht Welt ist Zahl, sondern Zahl hier ist Welt.

- Differenz von Knacken (diskret) und Ton (analog), vertraut vom elektronischen Synthesizer: "Im Digitalrechner werden die Zahlen durch Ziffernfolgen, im allgemeinen durch Binärziffern, dargestellt, die durch Impulse realisiert werden. Ihre Verarbeitung erfolgt in Rechenwerken, die aus logischen Grundbausteinen aufgebaut sind und seriell bzw. sequentiell Informationen abarbeiten" = ebd.

- Stärken beider Systeme liegen in der markierten Differenz: "Der Analogrechner dient hauptsächlich der Lösung von gewöhnlichen Differentialgleichungen und in den Ingenieurwissenschaften der Simulation dynamischer Systeme. Der Digitalrechner hat ein universelles Einsatzfeld, in dem umfangreiche algebraische Berechnungen mit hohen Genauigkeiten einen Schwerpunkt bilden" = ebd., 7

Für die Simulation dynamischer Systeme bedarf es nicht nur einer präzisen Geometrie, sondern auch die zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten müssen modelliert werden - *physical modelling* im Digitalcomputer, Direktsimulation im Analogrechner.

Erst die hybride Kombination des im Zeitbereich mächtigen, weil parallelverarbeitenden Analogcomputers mit der Tugend des Digitalcomputers erlaubt es hinreichende Genauigkeit in bestimmten Rechenanwendungen zu erzielen - vertraut als das unauflösbare Orts/Zeitpunkt-Unschärfeproblem.

Vgl. die menschliche Fähigkeit, in Wolken und Tanz etwa "unsinnliche Ähnlichkeit" zu erkennen; besonders Sprache und Schrift sind damit "ein Archiv unsinnlicher Ähnlichkeiten [...] geworden".<sup>8</sup>

- analoges Radio und Fernsehen, wenn sie (oh Wunder) auf Basis von Energie aus Starkstrom (das 220 V Wechselstrom-Netz) niederfrequente Signale (Sprache und Musik) ertönen lassen, Äquivalente zum Analogrechner in der Computistik, insofern es dann quasi-mathematische Operationen ausführt, bzw. analog zum Analogcomputer, mit dessen Hilfe elektronische Vorgänge *als* physikalische Werte gerechnet werden, parallel zur Mathematik (die sich in diesem Moment auch tatsächlich daran abspielt)? Womit wieder zum Thema kommt: eine Mathematik, die sich vollzieht, ohne überhaupt erst symbolisch zu werden; das mathematische Wissen um Wellengleichungen etwa steckt schon jeder Saite, wenn sie erklingt, und jedem Ton vom Magnettongerät

- schwingende Geigensaite nur in Grenzen durch den elektronischen Analogcomputer simulierbar, anhand von „Modellen, wie sie die analoge Umwandlung mechanischer Systeme in elektrische bietet.“<sup>9</sup> Die

---

<sup>7</sup> Achim Sydow, Elektronisches Hybridrechnen, Berlin (VEB Verlag Technik) 1971, 6

<sup>8</sup> Walter Benjamin, Über das mimetische Vermögen, in: Gesammelte Schriften, Bd. II, 1, Frankfurt/M. 1989 (2. Aufl.), 213

<sup>9</sup> L. Cremer, Die Geige aus der Sicht des Physikers, in: Nachrichten aus der Akademie der Wissenschaften in



Schwingungserzeugung durch Anstreichen (Geigenbogen) erweist sich als nur in Grenzen elektronisch analysierbar: "Wir hatten ursprünglich versucht, das ganze Problem ins Elektrische zu übersetzen, also auch die Saite durch einen Kettenleiter aus Spulen und Kondensatoren, mußten dies aber aus der bekannten Erfahrung aufgeben, daß elektrische Systeme infolge der Ohmschen Widerstände viel gedämpfter sind als mechanische" = Cremer 1971: 234

## **Unwillkürliche Analogrechner / Implizite Differentialmathematik**

- Fachbegriff Rechenschaltung gilt für das analoge wie das digitale Regime: "Anordnung von analogen Übertragungsgliedern oder digitalen logischen Verknüpfungsgliedern, die eine vorgegebene Rechenfunktion verrichtet"

- vollzieht bereits ein Radio oder Fernseher mit seiner komplexen Verschaltung von Kondensatoren (gemessen in Farad), Widerständen (bemessen in Ohm), Röhren (Steilheit etc.) und Spulen (bemessen in Henry für die Induktion) eine Art verdrahteter ("hard-wired") Mathematik impliziter Natur- eine Gleichung aus Summen und Differenzen dieser Werte, ein fragiles Fließgleichgewicht, liquidierte (verflüssigte, strom-, also signalbasierte) Mathematik in dynamischer Schwebung

- "Die Einheit der Natur zeigt sich in der 'überraschendsten Analogie' der Differentialgleichungen auf den verschiedenen Erscheinungsgebieten." 6 Schlagendes Beispiel dafür „ist die Schwingungstheorie, in der die Mechanik, die Elektrotechnik, die Radiotechnik, die Hydraulik" - und damit auch der Analogcomputer selbst

- Leibniz traut dem Unbewußten zu, daß es in Form der *petits perceptions* in der Lage ist, beim Spaziergang am Strand in den sich brechenden Wellen die Natur sich kalkulieren zu hören

- unwillkürliche Differentialmathematik: das Kohlegrießmikrophon, „bei welchem die Bewegung einer beschallten Membrane zur Veränderung des Übergangswiderstandes zwischen zwei Elektroden, welche in eine Kohlegrießkammer eintauchen, benutzt wird" = Steinbuch 1968: 75; Branlys „Kohärer“ (Fritter)

- Verkehrs-Radargerät gleicht Sende- und Echofrequenz miteinander ab (Schwebung?); „daraus wird – gleichfalls auf elektrischem Wege – die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt und von einem Instrument angezeigt. Überschreitet sie den am Gerät einzustellenden Wert, so wird automatisch der Kameraverschuß betätigt und so Nummernschild des Verkehrssünders im Bild festgehalten“ 8 - Umschalten auf digitale Entscheidung im Makrobereich (Hysterese)

## **Der epistemologische Einsatz des Analogrechners**

- indem Analogcomputer ein Analogon der Wirklichkeit zeitigt, gilt für ihn

Roland Barthes' Definition des photographischen Bildes als denotative "Botschaft ohne Code"<sup>10</sup>

- Schlußbemerkung von Achim Sydows *Elektronisches Analogrechnen* kommt ausdrücklich auf den "erkenntnistheoretischen Nutzen des Analogrechners" zu sprechen.<sup>11</sup> Konkret unterstreicht er, "daß das Analogrechnen mehr als jede andere Rechentechnik Einsichten in die Arbeitsweise dynamischer Systeme verschafft" <ebd.> und zitiert das Leitwort aus R. W. Hamming's Buch *Numerical Methods for Scientists and Engineers*: "Der Zweck einer Rechnung ist Einsicht, nicht Zahlen" <ebd.> - die *ultima ratio* des Analogrechners.

- "Die Arbeit mit der gesamten Rechenschaltung bei Parametervariationen und Strukturänderungen sowie die sofort auswertbare analoge Ausgabe der Lösung in Kurvenform trainieren das Einfühlungsvermögen in die Dynamik des Systems."<sup>12</sup> Zur ausdrücklichen "Denkschule" wird der Analogrechner, indem er das "dynamische Denken" massiert <ebd.> - als die (im Sinne McLuhans) eigentliche Botschaft dieses Mediums

## **Nicht-numerische Mathematik**

- "Aber noch sind einige, die zu erfahren vermögen, daß das Denken kein Rechnen ist."<sup>13</sup>

- "Der Begriff des 'Berechnens' ist demnach viel allgemeiner als der Begriff des Zahlenrechnens."<sup>14</sup>

- während Digitalcomputer die Welt "sampelt" (ganz so, wie in der Abtastung kontinuierlicher Schwingungen deren quasi-momentanen Werte zeitdiskret quantisiert werden), bleibt die Werteverarbeitung im Analogcomputer stetig: "The fundamental difference between analog and digital computers is that analog computers operate on continuous data rather than on discontinuous and discrete units of information. <...> input data and parameter values which vary during the calculation are not broken down into numerical values <...>. Instead they are represented by the rotation of a shaft or transformed into voltage."<sup>15</sup> Demzufolge handelt es sich nicht um Eingangsdaten, sondern um Signalen.

---

10 Siehe Roland Barthes, *Fotografie als Botschaft* [\*1964], in: ders., *Der entgegenkommende und der stumpfe Sinn. Kritische Essays III*, Frankfurt/M. 1990, 11-27

11 3. neuverf. Aufl. 1971, VEB Verlag Technik Berlin, 72 (Kapitelüberschrift)

12 Achim Sydow, *Elektronisches Analogrechnen*, Berlin (VEB Verlag Technik) 3. neuverf. Aufl. 1971, 71

13 Martin Heidegger, zitiert als Motto eingangs zu: Erich Hörl, *Parmenideische Variationen*. McCulloch, Heidegger und das kybernetische Ende der Philosophie, in: Pias (Hg.), *Macy-Konferenzen*, Bd. II, xxx-xxx

14 Helmar Frank, *Objektiviertes Rechnen*, in: ders. (Hg.), *Kybernetik. Brücke zwischen den Wissenschaften*, 7. völlig neu bearb. Aufl. Frankfurt/M. (Umschau) 1970 [Erstausgabe 1962], 133-150 (133)

15 Small 1993: 8

## **Der *Differential Analyzer* (Vannevar Bush)**

- Ab. B. Macee, An electronic differential analyzer, Boston: MIT 1948

- Wiener in Erinnerung an Vannevar Bushs Differential Analyzer. „In Bushs Maschine wurden Zahlen nicht als Folgen einstelliger Ziffern, sondern als Meßwerte dargestellt. <...> Die Analogiemaschine mißt, die Digitalmaschine zählt" = Norbert Wiener, Mathematik -Mein Leben, Düsseldorf / Wien (Econ) 1962, 119; dazu Pias: Computer-Spiel-Welten, xxx (Datei "action"); darin: "kinetically act out the mathematical equation" (Owen). Wobei "die Handbewegungen von Operatoren- und Plotterarmen tatsächlich jene Daten *sind*, die auch verarbeitet werden" (Pias) - transitives rechnen. Vorteil in der Epoche ohne Monitore: Anschaulichkeit, Sichtbarkeit. Hier gilt uneingeschränkt Friedrich Kittlers Diktum "there is no software", denn: "Bushs Wartungstechniker ´versteht´, da sie ja sichtbare Bewegungen sind, mathematische Probleme ohne das Symbolische der Schrift und kann `programmieren´ ohne die Diagrammatik der Programmbeschreibungen" = Kapitel 1.5 in: Diss. Claus Pias, Computer - Spiel - Welten, xxx

## **Computer als Analogrechner (Definitionen)**

- Typoskript Alan Turing "Proposed electronic calculator" [Automatic computing engine] = ACE, 1946, als Photokopie im Archiv von King's College, Cambridge (Inventar des Nachlasses Turing, *online*: <http://janus.lib.cam.ac.uk>), Gruppe AMT/C, No. 32:

<p. 2> Bisläng Maschinen für Grundrechenarten hinreichend, "except machines of the nature of the differential analyser and wind tunnels, etc., which operate by measurement rather than by calculation."

## **Datenflußrechner**

- Analogcomputer eine "Datenflußmaschine" (Bernd Ulmann), ohne die zeitdiskreten, am (Uhr-)Takt orientierten Datensynchronisationsprobleme wie im Digitalcomputer; Thema Datenflußrechner: Reiner Hartenstein, ein entschiedener Vertreter der Technischen Informatik: <http://helios.informatik.uni-kl.de/staff/Hartenstein.html>; sein Begriff "Von-Neumann-Syndrom"; alternative Lösungen frühzeitig bedenken, damit dann neue Realitäten benennen ("Xputer"); Parallelrechner

## **Analogcomputer und *anti-aircraft prediction***

- George R. Stibitz unterscheidet in einem Typoskript (Memorandum) vom 23. April 1942 über "Digital Computation for a. a. directors" im Rahmen einer Konferenz über elektronische Feuerleitkontrolle in der Flugabwehr den "analogue" vom digitalen Computer und nennt letzteren "digital" im

Unterschied zum "pulse" Computer: "Computing mechanisms have been classified as `analog´ or as `pulse´ computers. The latter term seems to me less descriptive than the term `digital´" = zitiert nach dem Faksimile des Dokuments in: Dennhardt 2009: 157. Folgt eine Definition des Analogcomputers: "All directors in use now are of the former type; that is the value of each variable in the computation is represented in the mechanism by the magnitude of a physical quantity such as length, voltage, speed etc. It has been suggested from time to time that digital calculation, such as that performed by adding and calculating machines might be used in the A. A. director, with advantage" = ebd.; Hagemeyer 1979: 359; Dokument im Besitz Hagemeyer; Mindell 2002

- Weiter Stibitz 1942: "Digital computers introduce a consideration not found in kinematic analog computers, namely the ordering of computation steps in time"; meint den "number train" von Nullen und Einsen. "Digital computation is dynamic in character" (Stibitz 1942)

- Infometrie (laut Umstätter) macht die Inkubationszeit von Erfindungen berechenbar

- "analog" meint Signalverarbeitung; "digital" hingegen Daten- und Informationsverarbeitung (als mathematisches Maß im Sinne Shannons)

## **Homomorphien, Isomorphien: Diagrammatisches Denken in Modellen**

- Dissertation Georg Klaus (NL Klaus, Archiv BBAdW) zu Isomorphierelationen, etwa zwischen Pendel und Schwingkreis

- Denken in Modellen statt in Algorithmen (Ulmann); entscheidendes Moment des Analogrechnens ist die Modellbildung; in welchen Medien diese Modellbildung realisiert wird (mechanisch, elektronisch, Digitalcomputer) zweitrangig

- diagrammatisches Modell: "Das Gebilde A heißt homomorph zum Gebilde B, wenn ihre Strukturen analog sind, d. h., daß sich die Teile des Gebildes A den Teilen des Gebildes B vermittelt einer eindeutigen Abbildung, die dann Homomorphismus heißt, so zuordnen lassen, daß jeder Beziehung zwischen Teilen des einen Gebildes eine bestimmte Beziehung zwischen den diesen Teilen zugeordneten Teilen des anderen Gebildes entspricht" = Eintrag "Homomorphie", in: Georg Klaus (Hg.), Wörterbuch der Kybernetik, Bd. I, Frankfurt/M. u. Hamburg (Fischer Bücherei) 1971, 250. "Wenn diese eindeutigen Homomorphismen zudem umkehrbar sind, ist die Rede von Isomorphismen" = ebd., 252

- Hermann von Helmholtz' Begriff des Zeichens in der Sinneswahrnehmung: Relation Welt / Eindruck; Lenin kritisiert in seiner Schrift *Materialismus und Empirio-kritizismus*: "Wenn die Empfindungen nicht Abbilder der Dinge, sondern nur Zeichen oder Symbole sind, die keine Art der 'Ähnlichkeit' (Helmholtz) mit ihnen haben, dann wird der

materialistische Ausgangspunkt <...> untergraben."<sup>16</sup>

- lautet die Botschaft: "think analog"; im Sinne des Peirceschen Icon-Begriffs wird hier eine gemeinsame Eigenschaft zwischen Bild und Gegenstand geteilt; Analogcomputer erweist sich mithin als diagrammatische Maschine, im Unterschied zur algorithmischen Maschine Digitalcomputer

## Definitionen des Analogrechnens

- analog computing device with two distinguishing characteristics: "It performs operations in a truly parallel manner: many calculations all at the same time. It operates using continuous variables; it uses numbers that that change not in steps, but change in a smooth continuous manner. By contrast, a digital computer can only perform sequential (one at a time) operations, and operates on discrete (noncontinuous) numbers" = Doug Coward's Analog Computer Museum and History Center, <http://dcoward.best.vwh.net/analog> (November 2008)

- Arbeitsweise elektronischer Rechenanlagen: " Man kann im allgemeinen für jedes Problem einen physikalischen, insbesondere elektrischen bzw. elektronischen Vorgang finden, der durch dieselben Gleichungen beherrscht wird wie die im Problem geforderten."<sup>17</sup>

- Analogrechner *keine* symbolverarbeitenden Maschinen (jedenfalls nicht im medienimmanenten Sinne), sondern Signal- und Spannungswandler  
- Akzent auf *Änderung* (subjektiv in der Potentiometereinstellung, objektiv im dargestellten Objektverhalten) kennzeichnet den Analogrechner als genuin dynamisches Medium (im Unterschied zur Turing-Maschine als Zustandsmaschine): „(Dynamisch, weil es auf Änderungen reagiert.)“<sup>18</sup>  
Dynamisch aber verhält sich auch eine Flipflop-Schaltung in ihren Zuständen, also eine digitale Baugruppe, wenn etwa die Ent/ladung von Kondensatoren eine Wechselschaltung steuert: „Welcher Elko gerade aufgeladen ist, bestimmen die Zustände der Transistoren“ <Schlenzig ebd.>

- Gegensatz zum Ziffernrechenautomaten; steht "Bearbeiter am Analogrechner in einer ganz anderen Beziehung zur zu lösenden Aufgabe. Man kann sagen, daß er ein „Gefühl“ für die Auswirkung von Parameteränderungen bekommt“ = Kathe 1970: 424

- Analogrechner speziell „unentbehrliche Hilfsmittel für die <...>

---

16 Zitiert hier nach: Hans Bozenhard, Georg Klaus - Gedanken zu seiner Semiotik, in: Klaus Fuchs-Kittowski / Siegfried Piotrowski (Hg.), *Kybernetik und Interdisziplinarität in den Wissenschaften*. Georg Klaus zum 90. Geburtstag, Berlin (trafo Verlag) 2004, 295-310 (299)

17 Helmut Winkler, *Elektronische Analogieanlagen*, Berlin (Akademie-Verlag) 1961, 2

18 Klaus Schlenzig, *Textbuch zum KOSMOS-Baukasten electronic profi*, Stuttgart (Franck-Kosmos) 2007, 45 (Versuch 62 "Dynamisches Flipflop")

Untersuchung von Schwingungsvorgängen und für die mathematische Forschung“ <ebd.>

- hängt Mathematik an der Abzählbarkeit (also zeitdiskret), oder ist eine andere Mathematik denkbar, die an einer anderen, nämlich kontinuierlichen Zeit hängt? „Die modellmäßige Nachbildung <sc. Eines physikalischen Prozesses durch den Analogcomputer> erfordert, daß für jede im Problem vorkommende Rechenoperation ein eigenes Rechenelement vorhanden sein muß. Eingangsgrößen und Veränderliche werden in physikalische Größen umgeformt, mit denen in der Maschine ‚stetig‘ gerechnet wird“ <Kathe 1970: 425> - ein Oxymoron?

- auch Analogrechner universell mächtig, angelegt in seiner Modularität wie der Synthesizer: „Ein universeller Analogrechner ist durch die Möglichkeit gekennzeichnet, die vorhandenen Rechenelemente nach dem Baukastenprinzip beliebig zu verbinden oder zusammensetzen“ = ebd.

- "Der gerätetmäßigen Lösung einer Gleichung liegt das Rückkopplungsprinzip von W. Thomson (dem späteren Lord Kelvin) zugrunde, nach dem Rechenelemente zu einem geschlossenen Schaltkreis verbunden werden. Ausgangsfunktionen von Rechenelementen gehen unmittelbar wieder als Eingangsfunktionen in Rechenelemente ein“ <ebd.>, was schon mechanisch geleistet werden kann.

- kann mit einem Analogrechner eine Regelstrecke kybernetisch simuliert werden, sondern auch deren Zeitverhalten, indem für die Simulierung der Originalzeitmaßstab zugrunde gelegt wird oder durch eine Zeittransformation eine Zeittraffung oder Zeitdehnung erfolgt <ebd.>.

F(x): „Als Rechengrößen werden für die abhängigen Veränderlichen die Spannungen, / für die unabhängige Veränderliche die Zeit verwendet“ <ebd., 425f>; das zentrale Rechenelement ist dabei der „Rechenverstärker“ (vielfach ein Gleichspannungsverstärker, in dessen Rückkopplungszweig Widerstände oder Kondensatoren eingeschaltet werden).

- analog der Maschinensprache für Digitalrechner gilt im Analogcomputer „die sog. Maschinengleichung, die im Analogrechner gelöst wird“ <ebd., 431>; die vorgegebenen Problemveränderlichen werden dabei in proportionale Maschinenveränderliche umgeformt.

- Abszisse der zu rechnenden Funktion ist selbst Zeit: Die Zeit  $t$  ist die unabhängige Veränderliche des zu untersuchenden Problems;  $T$  ist die unabhängige Analogrechenzeit (Zeit hier als Signifikant und Signifikat des Rechenprozesses)

- bevorzugtes Objekt für Analogrechnungen: die Integration einer Funktion der Zeit. "Die Differentiation wird in der Regel durch den Einsatz von Integratoren umgangen, obwohl es im Prinzip möglich ist, durch Auswechseln vn Kondensator und Eingangswiderstand zu einem Differentiator zu kommen" = 435

- optisches Interface des Analogrechners keine intransitive Umsetzung der symbolischen Maschinensignale in menschenlesbare Sinnesdaten, sondern gibt transitiv Einblick in das ("Rechen"-)Geschehen des Geräts selbst: "Zur Funktionsausgabe werden in langsam rechnenden Analogrechnern Koordinatenschreiber, in schnellen Anlagen Katodenstrahloszillografen verwendet. Vielfach arbeiten die elektronischen Analogrechner repetierend, d.h., der Lösungsvorgang wird in Bruchteilen einer Sekunde (Frequenz bis zu 60 Hz) laufend wiederholt, so daß die Lösungskurve auf dem Bildschirm der Katodenstrahlröhre ‚steht‘. Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Lösungskurve können somit unmittelbar verfolgt werden" <437> - also nicht in Echtzeit - das nämlich wäre diskret gerechnet -, sondern *live* Rundfunk

---

- implizite Mathematik (in Operation), oder ist der Begriff der Rechnung überhaupt nicht angebracht? So noch der vorsichtige Titel H. Winkler, Elektronische Analogieanlagen, Berlin (Akademie) 1961

---

- gilt im Unterschied zur impliziten Mathematik des Analog"rechners" für den ENIAC: „Numbers are never represented by the magnitudes of electrical signals, but only by their presence or absence on wires, and these signals are of sufficient magnitude (at least 3 volts <...>) that they are never destroyed by cross talk“<sup>19</sup>

- "Ein Analogrechner liegt vor, wenn man zur Lösung eines mathematischen Problems ein analoges physikalisches System aufbaut und die Lösung des Problems durch ein physikalisches Experiment gewinnt, nämlich durch die Messung des Zustandes oder des zeitlichen Ablaufes der physikalischen Größen des aufgebauten Systems" = E. Kettel, Übersicht über die Technik der elektronischen Analogrechner, in: Telefunken-Zeitung Jg. 30 (Juni 1957) Heft 116, 129-135 (129)

- analoge Maschinerie: "In ihr wird <...> gar nicht im eigentlichen Sinne 'gerechnet', sondern die Lösung durch Aufbauen eines Analogons, eines Modells erzeugt." = Wolfgang Giloi / R. Herschel, Rechenanleitung für Analogrechner, hg. v. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft AEG-Telefunken, Fachbereich Anlagen Informationstechnik, Konstanz o. J., 12 f.

- "Zu <...> der Sinnenwelt und der realen Welt, kommt nun <...> die Welt der physikalischen Wissenschaft, oder das physikalische Weltbild. Diese Welt ist / <...> eine bewußte, einem bewußte <...> Schöpfung des menschlichen Geistes und als solche wandelbar <...>" = Max Planck, Das Weltbild der neuen Physik [\*1929], 11. unveränd. Aufl. Leipzig (Barth) 1952, 10 f.

- "<...> zwar das technische Problem mathematisch formuliert wird, dieses

---

19 Arthur W. Burks, Electronic Computing Circuits of the ENIAC, in: Proceedings of the I.R.E. (Institute of Radio Engineers), August 1947, 756-767 (757)

mathematische Problem dann aber nicht mit mathematischen Methoden gelöst wird, sondern gewissermaßen als Brücke" - also als Medium! - "dient, über die hinweg man zu einem Modell kommt, mit dem dann experimentiert werden kann" <ebd., 13>

- "Man hat weniger eine Rechenmaschine vor sich, als vielmehr ein Modell zum Experimentieren. Der Ingenieur kann bei der Untersuchung in den ihm geläufigen Begriffen denken. Er erhält die Lösung in anschaulicher, graphischer Darstellung." <ibid., 13>

- "Da die ihn interessierenden Größen oder Parameter alle unmittelbar zugänglich sind und ihre Veränderung sich unmittelbar in der Lösung auswirkt, erhält er vor allem auch <...> einen Einblick in die Struktur und Arbeitsweise des zu untersuchenden Systems <...>" <ibid., 13>.

## **Analogcomputer, FPGAs, Schwingungen**

- Differenz im Zeitbereich; kein diskreter Takt, sondern asynchrone Rechnung

- Hava T. Siegelmann, Neural Networks and Analog Computing – Beyond the Turing Limit

In gemeinsamer Nähe zur Hardware

- ansatz von adrian thompson von 1996, der mit genetischen algorithmen fpgas als analogcomputer dienstbar gemacht hat (Hinweis Oswald Berthold)

- Dynamische physikalische Prozesse *a/s* Differential"rechnung" (ganz so, wie Leibniz in den sich brechenden Wellen am Strand die Natur sich kalkulieren hört): "Daß <...> in weiten Kreisen ein erhöhtes Interesse für alle Schwingungsfragen besteht, braucht in der Zeit des Rundfunks und Tonfilms <und neuerdings auch Fernsehen> wohl kaum hervorgehoben zu werden. Außerdem scheint <...> gerade die Schwingungslehre für den Anfänger, der mit der Differentialrechnung noch nicht vertraut ist, besonders geeignet zu sein, den physikalischen Sinn dieser mathematischen Formelsprache verstehen zu lernen."<sup>20</sup>

---

- Endim 2000 Elektro-Analogrechner (VEB Rechentechnik Glashütte, 1963-75); xy-Schreiber: Registriergerät zur Aufzeichnung des funktionellen Zusammenhangs zweier beliebiger physikalischer Größen, die in äquivalente Gleichspannungen umgeformt werden können, etwa: Kennlinien elektrischer Bauelemente (Elektronenröhren)

- Einsatz Analogrechner speziell für dynamische Probleme / Differentialrechner; Werte können *im Lauf* verändert werden

---

20 H. Barkhausen, Einführung in die Schwingungslehre nebst Anwendungen auf mechanische und elektrische Schwingungen, 6. Aufl. Leipzig (Hirzel) 1958, Vorwort zur 2. Auflage (1940)



## **Analoge Oszillographien**

- Begriff „Bildspeicherröhre“ im Zusammenhang mit Analogrechnern: Oszilloskop zum Ablesen der gemessenen/„errechneten“ Signalkurven (ist dies ein Rechenprozeß im physikalischen Sinn, vor-symbolisch?)
- Erinnerung von Helmut Kammerer (Karlsruhe): Spielerisch wurde aus Langeweile rein intuitiv versucht, mit Analogcomputer am Oszillographen quasi-Zeichnungen auf der Basis von Lissajous-Figuren zu erzeugen

## **Analogrechner an TU / DTMB**

- Wolfgang K. Giloi, Principles of continuous System Simulation, Stuttgart (Teubner) 1975
- Wolfgang Giloi / Rudolf Lauber, Analogrechnen. Programmierung, Arbeitsweise und Anwendung des elektronischen Analogrechner, Berlin / Göttingen / Heidelberg (Springer) 1963
- Rechenvorgang erfolgt im Analogrechner nicht aufgrund numerischer Verfahren, sondern es wird ein physikalisches Modell aufgebaut, in dem strukturanalog (und geradezu diagrammatisch im Sinne von Peirce) die gleichen Gesetze gelten, wie sie durch das zu lösende Problem vorgeschrieben sind.
- Aufsatz „Analog was not a Computer Trademark“ von George Fox Lang, in: Sound and Vibration, August 2000): die Computersprache Mimic, „a Fortran-derived simulation language that tried to emulate an analog computer“
- Mathematik der Analysis, für die der Analogrechner (zumindest in der Variante gewöhnlicher Differentialgleichungen, primär mit Ableitungen nach der Zeit operierend) so optimal geschaffen war. Die Meisterung dynamischer Prozesse ist die große Leistung elektronischer Medien, und so steht zur Diskussion, inwieweit die gängige harte Dichotomie zwischen „analog“ und „digital“ nicht selbst eine metaphysische Fiktion ist. Seit Planck wissen wir, daß das vorgeblich Stetige, je genauer wir hinschauen, ebenso sprunghaft, und damit prinzipiell numerisch berechenbar ist (Konrad Zuse selbst spekuliert darüber in *Rechnender Raum*)
- 1983 beim Aufbau des Instituts fuer Rechnerarchitektur und Softwaretechnik (GMD-FIRST) (heute FhG-FIRST) den am TU-Institut befindlichen Telefunken-Analogrechner RAT740 mit Zustimmung des Fachbereichs nach FIRST mitgenommen. nach dem Umzug nach Adlershof keine rechte Verwendung fuer den Rechner mehr (Herr Sydow hatte sich zeitweilig seiner angenommen); etwa 1995 den noch voll funktionsfaehigen Rechner dem Museum fuer Technik als Leihgabe angeboten. Das Museum nahm an; der Vorsatz, ihn auszustellen, fiel aber dann dem Beschluss zum Opfer, sich ganz auf Zuse und seine Rechner zu

konzentrieren = E-mail Wolfgang Giloi, 11. November 2008

- Im Rahmen der *Mathema*-Ausstellung am Deutschen Technikmuseum in Berlin wieder Helmut Hoelzer Ur-Analogcomputer aus Peenemünde zu sehen (bzw. sein Nachbau). Stichwort, mit dem Hoelzer nach eigener Aussage (O-Ton seiner Berliner Rede von 1992) auf das Konzept kam, wie denn partielle Differentialgleichungen elektronisch in Echtzeit zu lösen seien: "Capacitors ....!"; radikaler Unterschied zwischen differentialelektrophysikalischem und algorithmischer Vorgehensweise, der auch völlig verschiedene "Interfaces" generiert, denn die Stellschrauben (Potentiometer und Steckplätze) am Analogcomputer ermöglichen ein geradezu intuitives Erproben des zu analysierenden Prozesses, im Unterschied zu den Kalkulationen des Digitalrechners, die in Form des "run"-Befehls immer zwischen Welt und Modell stehen

### **Unschärfen: Dem Realen auf der Spur**

- "Während Zahlenrechnen, Chiffrieren und logisches Kalkulieren typische digitaler, "diskreter" Natur sind, gibt es auch eine "kontinuierliche" Realisierung des Rechnens. Vorherrschend ist dabei die "analoge" Darstellung der rationalen oder der reellen Zahlen durch Verschiebung und Drehungen, konkret ausgebildet durch Stangen und Schieber einerseits, durch Räder und Scheiben andererseits."<sup>21</sup> Kommen hier Zahnräder zum Einsatz, "dienen sie nur der formschlüssigen Verbindung und haben in rein analog arbeitenden Geräten keine diskretisierende Bedeutung" <ebd.>. Eine Konsequenz: "Wissenschaftstheoretisch gehört das Analogrechnen, das sich auf den Kontinuumsbegriff stützt, <...> nicht zur Informatik; die Realisierung durch physikalische Analogien erlaubt keine beliebige Steigerung der Rechengenauigkeit" <Bauer 2009: 62>

- entscheidend für die Genauigkeit analoger Rechenverfahren die Ableseeinrichtung; der Prozeß selbst ist infinit genau: Der Analogrechner praktiziert ein Überstreichen des Reellen (der reellen Zahlen), wie es analoge Speichermedien aufzeichnen (der Phonograph etwa; dazu Kittler 1986), dem die Ablesegeräte immer hinterherhinken. Das Reelle ist dem Analogcomputer also eher anhörbar denn ablesbar

Gerade diese Ungenauigkeit des Analogrechnens mag seine Tugend wieder sein: dem Realen der Physik näher als die Modellierungen der numerischen Mathematik. Denn das physikalisch Reale *ist* die Unschärfe, der Analogrechner (weil mit Mitteln der Physik selbst operierend) auf der Spur

### **(Elektro-)Mechanische Analogrechner**

- Analogrechner operiert mit kontinuierlich variierbaren Werten einer physikalischen Größe, mit Verstärker-Bausteinen

- Lord Kelvin 1876: Differentialgleichungen lassen sich mechanisch lösen

---

<sup>21</sup> Friedrich L. Bauer, Kurze Geschichte der Informatik, München (Fink) 2. verb. Aufl. 2009,

- Babbage, *Differential machine*; ferner Vannevar Bush, *Differential Analyser*

- Summen werden in Differentialgetrieben gebildet. Ideal für Berechnung von Systemen von linearen Differentialgleichungen, in denen nur Ablenkungen nach der Zeit auftreten; Integrieranlage

- Zusammenschaltung der Bausteine in „Kuppelplan“; Ausführung der mechanischen Kopplung mit Wellen und Zahnrädern

## **Wirtschaftsmodellierung**

- Ökonomie von John Maynard Keynes (*General Theory*, 1936) zunächst durch eine Reihe abstrakter mathematischer Modelle (graphisch und algebraisch) veranschaulicht; zweidimensionalen Graphen ermangelt es an Darstellungsmöglichkeiten des Wesens von Prozessen, wie sie - ganz im Sinne von Lessings *Laokoon*-Theorem - im sprachlichen Text darlegbar war: "The Keynesian verbal approach presented the economy as a dynamic system, but these little mathematical models tended to be static, so that to understand the system, or show the implications of changes in its, required using 'the method of comparative statics'. This involved comparison of 'before' and 'after' situations by shifting curves on diagrams or by making a change in one equation and / following the causal impact through the series of equations in the system."<sup>22</sup>

- ein Drittes, zwischen symbolischem Diagramm und operativem physikalischem Modell, ist die Mathematik Dynamischen: "Proposals to create dynamic mathematical models had been made during the 1930s by the econometricians who introduced both lags and differential terms into their model equations" <ebd., 373> - Zeitfaktoren, wie sie in Elementen des Analogcomputers (Kondensatoren zur Signalverzögerung) quasi-mathematisch operativ werden

- Unterschied von Phillips' hydraulischer Maschine zur Veranschaulichung ökonomischer Zirkulation zum Analogcomputer ist die Absenz einer gemeinsamen mathematischen Analogie: "Phillips did not build his machine by starting from the extant mathematical models and simply translating them, but rather tried to resolve the problems <...> by directly linking the economic ideas with hydraulic ones" <ebd., 374>.

- kommt der Unterschied einer Modellierung dynamischer Prozesse durch Digitalcomputer im Unterschied zu Analogcomputern ins Spiel: "Richard Goodwin's 1948 proposal to represent the dynamics of the economic process not by difference equations but by differential equations, in other

---

22 Mary S. Morgan / Marcel Boumans, *Secrets Hidden by Two-Dimensionality: The Economy as a Hydraulic Machine*, in: Soraya de Chadarevian / Nick Hopwood (Hg.), *Models. The Third Dimension of Science*, Stanford (UP) 2004, 369-401 (372f)

words, not by discrete steps but as a continuous process" <ebd., 374>

- analog ist, was unter mechanischer / elektrischer Spannung steht

- *Praxis der Naturwissenschaften-Physik* eine Paraphrase für Medienprozesse aus Sicht einer techniknahen Medienwissenschaft; Heft April 1986 über „Elektronik im Experiment“ nennt den Königsweg einer genuin medienarchäologischen Hermeneutik, die sich in reiner Textlektüre nicht erschöpft; virtueller Nachbau, wie die Lösung einer Schwingungsgleichung im Analogcomputer aussieht – auf Softwareebene also eine Simulation der Simulation, Stoff für medientheoretische Reflexion zum Verhältnis des sogenannten Digitalen zum sogenannten Analogen. Gleichzeitig ein Analogcomputer-Modul aus aktuellen Elektronikbauteilen zusammen basteln – ganz im Sinne eines Experimentalsystems

- Helmut Hoelzer, 50 Jahre Analogcomputer, in: Bolz / Kittler / Tholen (Hg.), *Computer als Medium*, München (Fink) 1994, 69-90; Rechner von Helmut Hölzer ab November 2008 in der Mathematikausstellung *Mathema*, Deutsches Technikmuseum Berlin

- Elektromechanischer Analogcomputer: Differential Analyzer (Bush); in Deutschland: Helmut Hölzer (WKII; V2)

Verwendung in Kopplung an Trägheitsnavigationssystem (Kreisel- und Kurssteuerung)

- zentraler Luftdatentechniker im Starfighter T 106 setzt einkommende Daten <besser: analoge Signale> auf elektromechanischem Weg in Steuersignal für den Autopilot und das Zielgerät um; aus Eingabewerten (Temperatur, Winkel) werden Höhe, Geschwindigkeit errechnet: Überwindung der physischen durch Wandlung der Daten in (umrechenbare) Information. Extreme Eskalation: der Stealth-Bomber, der (im Sinne der Gravitation und der Aerodynamik) negentropisch fliegt, unwahrscheinlich im Sinne des nachrichtentechnischen Informationsbegriffs (Shannon / Luhmann).

- behandeln Differentialgleichungssysteme grundsätzlich dynamische Probleme, also Wellenphänomene; Wellenphänomene lassen sich darin anschreiben. Spezielles Problem: non-lineare Systeme. Steuerung von Strömen und Spannungen durch geringe (Meß)werte; müssen verstärkt werden: ideal dafür Elektronenröhren.

Schon Elektronik (Elektrotechnik) ist eine Modellierung der Welt (gleich Analogcomputer); siehe etwa Barkhausen, Schwingungslehre, oder xxx, Elektroakustik: Beide betonen die verblüffenden Analogien zwischen mechanischer und elektronischer Welt (Pendel / Schwingkreis). Nur daß die Modellierung hier mit Mitteln der Welt selbst geschieht (Elektrophysik); demgegenüber stellt der Computer die mathematische, also informatik abstrahierte Form der Modellierung von Welt dar: mittels Symbolen (die als solche nicht welthaftig sind). Andererseits aber kann Mathematik selbst als als Extremwert, als ein Grenzwert der physikalischen Maschine (und sei es

als Papiermaschine) aufgefaßt werden (zumindest in der xxx-Schule der Mathematik).

### **Mathematische Maschinen (*Analogue Calculator*)**

- mathematische Modellierung von Welt im Analogcomputer vollzieht sich in Form einer physikalischen Simulation; digitale Computer artikulieren sich vielmehr in Form numerischer Lösungen

- mechanisch programmierbare Rechenmaschine ASCOTA (Chemnitz)

- "Analog calculators work by analog, that is, they create a physical model of a mathematical problem. Many physical situations can yield mathematical results, provided they can be interpreted properly. The extent of a lateral or a rotational movement of a mechanism or the voltage level on a wire are examples of quantities which can be used to represent numbers. <...> types of analog calculators include devices used in drafting, measuring and integrating, e.g., parallel, rules, planimeters, pantographs and harmonic analyzers. The families in this order are divided according to the complexity of the mechanism itself single part, two-three part, multiple part, complex and programmable <...> with multiple part devices not developing until mechanical tooling was improved, in the early nineteenth century."<sup>23</sup>

- anhand von Erfahrung mit Babbages *Difference Engine* erweist sich: "not everything that is expressed in the mathematical formulae etc. is necessarily able to be replicated in an analogous form in a machine. <...> machines themselves have linkages not present in the mathematics."<sup>24</sup>

### **Mathematik als Musik? Das Monochord**

- "implizite Mathematik"

- Monochord als Analogrechner: aristoxenische Richtung betrachte Intervalle »wie Strecken, die man zueinander addieren oder voneinander subtrahieren kann«<sup>25</sup> - ein Begriff des *Analogrechnens*. »Das Ziel der griechischen Mathematik ist also weniger das Ausrechnen, als, mit Kant zu sprechen, das Erforschen der Bedingungen der Möglichkeit des Ausrechnens. Und so lässt sie die ›Verhältnisse‹, die λόγοι, stehen und schaut sie sich an. Die Griechen sind die Erfinder der reinen Theorie (...).«<sup>26</sup>

---

<sup>23</sup> <http://ed-thelen.org/comp-hist/1981Catalog.html>

Zugriff 20. November 2008

<sup>24</sup> Zitiert aus: <http://web.archive.org/web/2004012001464>

<sup>25</sup> Stefan Hagel, *Modulation in altgriechischer Musik: antike Melodien im Licht antiker Musiktheorie*. Frankfurt am Main; New York (Lang) 2000, 17

<sup>26</sup> Johannes Lohmann, *Musiké und Logos, Musikwissenschaftliche*

- medienepistemologisch erweiterte Bedeutung des Begriffs *analog*: „Die Tatsache, daß es für physikalische Vorgänge eine gesicherte mathematische Beschreibung gibt, erlaubt es umgekehrt auch, mathematische Zusammengänge durch physikalische Vorgänge nachzubilden“ <Giloi / Lauber 1963: 5> - etwa als Klang (die Erkenntnismusik von Pythagoras). Daraus resultieren akustische Meßmedien als sonische Analogcomputer bzw. mathematisierte Musik als Modellierung dynamischer Weltprozesse.

- das Monochord unter Varianten des vor-elektronischen Analogcomputers zählen

- In einem Katalog zu einer Telefonausstellung begegnet das aus der griechischen Antike wohlbekanntes Monochord wieder - als "Untersuchungsinstrument der Ohrenheilkunde zur Bestimmung der oberen Tongrenze, um 1910" = Helmut Gold / Annette Koch (Hg.): Das Fräulein vom Amt, München: Prestel 1993, 78. "Es ist schon interessant, wofür in der Mediengeschichte einsaitige Instrumente genutzt wurden" = E-mail Stefan Höltgen, 19. Oktober 2011

- Längenabteilungen des Monochords als implizite Mathematik (die pythagoreische These) und damit als akustische Form von Analogrechnen

- Monochord: Streckenverschiebung

## **Der Rechenschieber**

- "Werden Daten in Form von Zahlen eingegeben und werden die Resultate ebenfalls in Zahlen angegeben, so spricht man von mathematischen Maschinen (digital machines); werden dagegen die Daten in Gestalt von Kurven oder von Winkeldrehungen, elektrischen Strömen usw. eingegeben und erzählt man die Resultate in entsprechender Form, so spricht man von mathematischen Instrumenten oder Apparaten (analogue machines)"<sup>27</sup>

Die geometrische Teilung einer Linie von A bis B durch eine maschinelle Implementierung ermöglicht Teilung, aber auch Multiplikation - die von Rechenschiebern vertraute Praxis von Analogrechnung im Unterschied zur arithmetischen Maschine.

Einfaches analoges Rechenggerät: der Rechenschieber, bei dem eine Zahl durch eine bestimmte Länge dargestellt wird.

Ein archaischer Analogcomputer ist der Rechenschieber, seit dem 17. Jahrhundert in Benutzung.

---

Verlags-Gesellschaft, 1970, 11

27 Fr. A. Willers, Mathematische Maschinen und Instrumente, Berlin (Akademie-Verlag) 1951, 1

"The most important breakthrough for analog calculators <...> came with the invention of logarithms by John Napier in 1614. This enabled the processes of multiplication and division to be carried out by addition and subtraction through proper positioning of number series along sliding rules. The results are interpolated between the marks on the rule."<sup>28</sup>

- Rechenschieber in der Welt der Rechenmaschinen; Fokus auf der Differenz zwischen mechanischem Rechenschieber und elektronischem Analogcomputer; die Frage der "Programmierbarkeit" von Rechenschiebern; wie die Klassifizierung der Rechner in "analog" und "digital" von der Hardware abhängt

- dass der Analogrechner mit kontinuierlichen und Digitalrechner mit diskreten Variablen arbeitet; rein theoretisch kann auf der Hauptskala mit allen Werten zwischen 1 und 10 gerechnet werden, jedoch ist die Menge an Werten durch die Form des Rechenschiebers ( es gibt eine Eingrenzung z.B. durch die Feinmotorik des Menschen und die Breite des Striches auf dem Läufer) bereits endlich; Skalierung des Gnomon (Sonnenuhrschatten)

- Vorteil des Analogrechnens liegt in der Schnelligkeit; das Ergebnis unverzüglich ablesen, während Digitalcomputer früher lange rechnen mußten - wie es ja auch für das Rechnen mit Zahlen auf Papier gilt. Andererseits können nur Digitalcomputer beliebig genau (hinter dem Komma) rechnen, während die Ablesbarkeit von Werten auf der analogen Skala an die Grenzen der Genauigkeit kommt. Daher wurden später auch "hybride" Kombinationen aus Analog- und Digitalcomputer entwickelt, welche die Schnelligkeit des Analogrechnens mit der Genauigkeit des Digitalrechnens verbinden

- Max Hartmuth, Vom Abakus zum Rechenschieber. Eine leicht verständliche Einführung in die "hohe Kunst" des Schieberrechnens nebst einem zahlenhistorischen Überblick. [Hauptbd.]. Mit mehr als 100 Abbildungen im Text und einem gebrauchsfertigen Lehrmodell. Hamburg 1942

## **Mechanische Integratoren**

- Integrierer = "analog calculators that perform the mathematical integration function. The two-three part mileage readers are <...> primitive forms of this phenomena"

- technisch zur näherungsweise Integration bzw. Flächenbestimmung Planimeter, "bei welchen die Summierung der Flächenelemente kontinuierlich erfolgt. Der Zahlenwert der so bestimmten Fläche kann an einem Zählwerk abgelesen werden" =

<http://de.wikipedia.org/wiki/Integralrechnung>; Zugriff 4. Juni 2009; Rechenschieber setzt Zahlen ins Verhältnis; Analogcomputer: analoges

---

<sup>28</sup> <http://ed-thelen.org/comp-hist/1981Catalog.html>  
Zugriff 20. November 2008

Meßgerät und analytisches Rechnen fallen zusammen

- Lord Kelvins (= William Thomson) Gezeitenrechner (Analogrechner, mechanisch) = „Tide Predictor“ (1873); nicht Zeit- aber Gezeitenvorhersage

- Ende der 1960er Jahre vermehrt genannte Hybridrechner entwickelt und eingesetzt, die über digitale und analoge Rechenwerke verfügten, um Vorteile beider Rechnerwelten zu vereinigen

- H. Adler und G. Neidhold: *Elektronische Analog- und Hybridrechner*. Nr. 206-435/197/74, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin (Ost) 1974.

- Simulation einer Automobilfederung auf einem elektronischen Analogrechner

## **Analogcomputer und Quantenmechanik**

- <http://www.heise.de/tr/artikel/Quantencomputer-Analog-statt-digital-3236300.htm>: Wiedereinkehr des Analogcomputings im Quantencomputer; Fall von operativen Wissensverhältnissen, welche die klassische Technikgeschichtsschreibung nicht fassen kann - jedenfalls nicht als Fortschrittsgeschichte

- Wenn "Teilchen" tatsächlich Wellen, Quantencomputer keine Digital-, sondern Analogrechner. "Es gibt <...> ein Indiz für die Analogizität von Quantencomputern: es ist mit ihnen genau wie bei den <...> Analogrechnern des Neunzehnten Jahrhunderts: sie konnten nur ihre Spezialaufgaben, dafür aber in Echtzeit, erledigen, etwa im zeichnerischen Fluge Integrale errechnen oder Kurven rektifizieren oder Winkelfunktionen berechnen, wie z. B. der Proportionalzirkel" = Martin Warnke, in: xxx 301; URL: [http://www.uni-lueneburg.de/uni/fileadmin/user\\_upload/rmz/kultur\\_informatik/warnke/Qantum\\_Computing.pdf](http://www.uni-lueneburg.de/uni/fileadmin/user_upload/rmz/kultur_informatik/warnke/Qantum_Computing.pdf); Zugriff 4. März 2009

- in Analogcomputern "the variable is measured, and the mathematical operations <...> are the performed directly" <Small 1993: 8>. Damit aber hat der Einsatz von Analogrechnern seine Grenze an quantenphysikalischen Phänomenen, die *per definitionem* der Unschärferelation unterliegen, da gerade der Meßakt schon eingreift

- Lösungen der Schrödingergleichung sind Wellenfunktionen, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elementarteilchen im Ortsraum beschreiben. Somit lassen sich Aussagen über die Stabilität und Struktur chemischer Moleküle finden, "was bereits Mitte der 1940er Jahre zur Entwicklung spezieller Analogierechner führte"<sup>29</sup>



- Tom Simonite, "Quantencomputer: Analog statt digital" 14. Juni 2016, in: Technology Review. Das Magazin für Innovation; <http://www.heise.de/tr/artikel/Quantencomputer-Analog-statt-digital-3236300.html>; Zugriff 16. Juni 2016: **analoger** Quantencomputer mit mindestens 40 Qubits vermag Dinge zu beherrschen, die für konventionelle Computer unmöglich, etwa "*indem Atome so realistisch simuliert werden, wie es heute unmöglich ist*"

- von dem Moment an, wo ein solches Modell etwas berechnet, wird es digital auf logischer Ebene; physisch bleibt letztlich auch Digitalcomputer analog, solange sich diskrete Symbole fehlerfrei herleiten lassen; "Analogrechner" längst vergangener Tage haben physikalische Größen verändert, was mathematisch verwertbare Ergebnisse lieferte, aber keine \*Berechnung" im eigentlichen Sinne

### **Analogcomputer als akustischer Synthesizer**

- Subharchord, das in Berlin-Ost ein Gegenstück zum Mixtur-Trautonium darstellte: <http://www.subharchord.de>

- analogelektronisch generierte Klänge von Hans Kulk; im Zuge des Sampling-Theorems / Digitale Signalverarbeitung nun möglich, analoge Synthesizerklänge vollständig im algorithmisierten Computer zu reproduzieren

- Hans Kulk, der mit Hilfe elektronischer Analogrechner analog Synthesizer zur Klangerzeugung steuert; einige CDs veröffentlicht

- Carlos' LP von Synthesizer *Switched on Bach*

- in Schaltschema zur musik-kybernetischen "On-line Steuerung eines hybriden Computer-Systems" taucht neben der eingängigen A/D-Signalwandlung und dem speichernden und rechnenden Digitalcomputer sodann das D/A-Converter auf, betitelt "Analog-Rechn. (Synthesizer) Klangerzeugung" = Peter Vogel, Musik und Kybernetik, in: Teilton, Heft 2, Kassel (Bärenreiter) 1978, 5-67 (25, Abb. 10)

---

- Vergleich von Analogrechner und Musik-Synthesizer; Sonifikation mathematischer Befunde

- in Ost-Berlin entwickeltes Subharchord verfügt auf halbem Wege über digitale Komponenten (also ein analog/digital-Hybridcomputer; Demonstrationsrechner Technische Sammlung Dresden

- Schaltung eines binären Frequenzteilers: „Die Teilerkette besteht aus sieben Flip-Flop-Stufen, an deren Ausgängen mäanderförmige Tonspannungen abgenommen werden. Im Spektrum einer Mäanderspannung sind bekanntlich nur ungeradzahlige Teiltöne vorhanden. Sie werden zur Erzeugung von Klängen und Geräuschen

verwendet, die hohl klingen sollen, ähnlich den Klängen von gedeckten Orgelpfeifen. Zur Darstellung von vielen anderen Klang- und Geräuschwirkungen wird aber auch ein Spektrum benötigt, das alle Teiltöne in genau definiertem Amplitudenverhältnis zueinander enthält. *Die Wellenform, die dieser Forderung entspricht, ist der Sägezahn. Um nun die Mänderspannungen der Flip-Flop-Stufen in Sägezahnspannungen umzuformen, wurde ein neuer Weg beschritten.* Voraussetzung für die optimale Funktion des binären Frequenzteilers im „Subharchord“ ist die Forderung, daß dieser über einen Frequenzumfang von mindestens 12 Oktaven völlig aperiodisch arbeitet. In Bezug auf die Flip-Flop-Stufen ist diese Forderung automatisch gegeben. Um nun die notwendigen Sägezahnspannungen zu erzeugen, die ja auch aperiodisch mit stets gleicher Amplitude vorhanden sein müssen, schied die übliche Differenzierung der Mänderspannung mit einseitiger Basisbeschneidung aus, da diese sich bei Frequenzänderung ebenfalls verändert und ein stets anderes Spektrum ergibt. Im hier vorliegenden Anwendungsfall wird die Sägezahnspannung *durch additive Mischung über entsprechende Spannungsteileranordnungen aus den Mänderspannungen gewonnen* = Schreiber, Funktionsbeschreibung des Subharchord II = <http://www.subharchord.de>; ferner Ernst Schreiber, Ein neuartiger elektronischer Klang- und Geräuscherzeuger, in: Rundfunk und Fernsehen, Heft 2 (1964), xxx

### **Schleimpilze: Bio-Informatik (analog)**

- Andrew Adamatzky, Lehrstuhl für Unconventional Computing am Institut für Informatik, Direktor des Unconventional Computing Centre und Mitglied des Bristol Robotics Lab an der University of the West of England; <http://uncomp.uwe.ac.uk/adamatzky>
- TU-Mathematiker Martin Grötschel über "evolutionäre Optimierungsverfahren in der Berliner Verkehrsplanung"
- biologische Analogcomputer: Verfahren der Selbstoptimierung unter der Perspektive impliziter Algorithmik am Beispiel des Schleimpilz

### **Wettervorhersage mit Analogcomputer (Patch Lorenz-Attraktor)**

- "Dass Computersimulationen, verstanden als die verzeitlichte Imitation von Systemverhalten durch das Medium Computer, analytisch nicht zugängliche Phänomene wie etwa Klima behandelbar gemacht haben, rückt sie in eine Position jenseits der tradierten Kategorien von Theorie und Experiment." = Claus Pias, Klimasimulation, in: 2°. Das Wetter, der Mensch und sein Klima, hg. für das Deutsche Hygienemuseum von Petra Lutz und Thomas Macho. Begleitbuch zur Ausstellung in Dresden (Juli 2008-April 2009), xxx (Wallstein) 2009, 108-115 (112)
- nicht-pythagoräische Computerästhetik, die nicht allein Nostalgie des

Analogcomputers ist (der in der Tat an Punktgenauigkeit, partiellen Differentialgleichungen und *big data* scheiterte), sondern im Quantencomputing wieder einkehren wird - Welt mit Welt berechnen, *computational universe*. Parallel zum ENIAC: hat auch Whirlwind analogrechnerisch begonnen, weil eben Flugsimulator; dann unter der Hand zum digitalen SAGE-Radar-Frühwarnsystem geworden

- idealtypische Anwendung für Analogcomputer ein System von Differentialgleichungen namens Lorenz-Attraktor, Achtung: keine Modellierung von Hendrik Lorenz' quantenmechanischer Formel, sondern von Meteorologen Edward N. Lorenz entwickelt zur Modellierung atmosphärischer Instabilitäten / eines hydrodynamischen Systems zum Zweck der Wetterprognostik = ders., Deterministic nonperiodic flow, in: J. Atmos. Sci. vol. 20 no. 2 (1963), 130-141

- "bypassing mathematics by analog computing" - Argument für den Analogrechner, der eine physikalisch implizite, non-numerische Mathematik betreibt (Computersimulation)

- "seltsamer Attraktor" eines Systems von drei gekoppelten, nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichungen; damit Modellierung von "Zuständen" (im Nicht-Sinn der diskreten *states* der *turingmaschine*) in der Erdatmosphäre zum Zweck der Langzeitvorhersage / prädiktive Zeitreihenanalyse; liefert allenfalls für begrenzte Parameterbereiche von a, b, c realistische Resultate; nicht partielle Differentialgleichungen

- numerische Lösung des Systems zeigt bei bestimmten Parameterwerten deterministisch chaotisches Verhalten; Trajektorien folgen einem seltsamen Attraktor; modellbildend für mathematische Chaostheorie; "Gleichungen stellen wohl eines der einfachsten Systeme mit chaotischem Verhalten dar" / "sollte das Lorenzsystem anschaulich machen, dass im atmosphärischen Strömungsbild kleine Ursachen große Wirkung zeigen können" = <http://de.wikipedia.org/wiki/Lorenz-Attraktor>; Zugriff 26. Oktober 2009

- gleich Differenz von Computer als symbolischer (Turing-)Maschine und tatsächlicher Implementierung als Software in Hardware, also *computing*: "true symmetry is impossible to achieve in any physical system" / "the idealized symmetry of Lorenz's original mathematical model cannot be perfectly achieved in any physical realization" Ned J. Corron, A Simple Circuit Implementation of a Chaotic Lorenz System, in: Creative Consulting for Research and Education, Stand 1. Februar 2010, "conclusion"

## Digital Signal Processing

- Ausdruck „processing“ im Akronym DSP hängt an der binären, mithin mathematisierten Verarbeitung der (zeitdiskreten abgetasteten und quantisierten) Signale. Die Täuschung der menschlichen Sinne auf dem Niveau der Signalverarbeitung aber existiert seit der Epoche analoger Medien, die (anders als die alphabetische Schrift) nicht im Reich der

symbolischen Ordnung, sondern im Realen operieren (seit Edison 1877). Hier aber werden Signale nicht prozessiert im Sinne der Berechnung, sondern gesteuert / manipuliert

## **Dreiwertige Logik**

- George Spencer Brown, Laws of Form: auch das zeitliche Dazwischen logischer Entscheidungen / Kalküle, die Oszillation als zeitliches Pendeln zwischen den Zuständen „wahr“ und „falsch“, fortwährend: ein eher dynamisches Dazwischen, eine temporalisierende Dreiwertigkeit in der Logik, nahe an dem, was in Analogcomputern der Differenzverstärker (Operationsverstärker) ist, kleinste Unterschiede klar verstärkend (siehe auch Hysterese); temporalisierende Differenz zwischen Null und Eins, Querstrich

## **Algorithmen? Programmierung des Analogcomputers**

- für Programmierung des Analogcomputer zunächst sog. Filteralgorithmus in Form einer Differentialgleichung schreiben; Analogcomputer besteht im Kern aus aktiven Filtern, den Operationsverstärkern; diese folgen einem Algorithmus. Damit läßt sich eine Struktur in Form einer Differentialgleichung bauen, die Differentialgleichungen genügt. Wenn das Wesen der mathematischen Analysis in solchen Gleichungen liegt, und das der hochtechnischen Medien, solche Prozesse realisieren zu können, resultiert daraus zunächst einmal der Analogcomputer

- "Wenn man aber Algorithmus als eine in Einzelschritte zerlegte Anweisungsvorschrift fasst, kann man – nicht die Verkabelung, aber – die schriftlichen Fixierungen der Verkabelungsschritte, wie man sukzessive zu einem bestimmten Sound kommt, durchaus als eine Form des Algorithmus auffassen" = Axel Volmar, E-mail 1. Juli 2011; Überlegung von Martin Carlé: Vollzug des Verkabelns der ENIAC als Programmieren auffassen. "Aber die Grenzen sind sicherlich fließend. Umso spannender scheinen aber solche Übertragungen" = Volmar ebd.

- Differenz zwischen Analog- und Digitaloszilloskop: ersteres "lügt nicht" (Herr Schöne, Werkstätten DTMB Berlin); steht in einem transitiven Verhältnis zum elektrischen Ereignis in der Zeit, während das digitale Oszilloskop zwar aufgrund des Sampling-Theorems wirklichkeitsgetreu Zeitverläufe abbildet, diese aber sämtlich mathematisch-parametrisch eingestellt werden müssen. Demgegenüber liefert die analoge Einstellung zwar Verzerrungen, aber keine Lügen. Sie verweisen immer auf ein tatsächliches elektrophysikalisches Ereignis.

- Laufzeitgerät LZG 102, das physikalische Laufzeiten (qua Zwischenspeicherung) kalkulierbar macht: "Das Laufzeitgerät LZG 102 tastet eine eingegebene Spannung mit einer wählbaren Taktfrequenz ab, wandelt den Abtastwert in ein 10-bit-Wort um und speichert die Werte in einem Schieberegister wählbarer Länge. An einem oder mehreren

Ausgängen des Schieberegisters wird dann über D/A-Wandler wieder das Analogsignal erzeugt. <...> Das Gerät kann je nach Programmierung als Laufzeitglied, als Signalgenerator oder zur Zeittransformation einmaliger Vorgänge verwendet werden" = aus Beschreibung und Bedienungsanleitung zu LZG 102, Typoskript

## **(Elektro-)Mechanische Analogrechner**

- Analogrechner operiert mit kontinuierlich variierbaren Werten einer physikalischen Größe, mit Verstärker-Bausteinen

Lord Kelvin 1876: Differentialgleichungen lassen sich mechanisch lösen; Babbage, Differential machine; ferner Vannevar Bush, Differential Analyser

Summen werden in Differentialgetrieben gebildet

Ideal für Berechnung von Systemen von linearen Differentialgleichungen, in denen nur Ablenkungen nach der Zeit auftreten

Integrieranlage

Zusammenschaltung der Bausteine in „Kuppelplan“; Ausführung der mechanischen Kopplung mit Wellen und Zahnrädern

## **Implizite Analogrechner**

- Christoph Schweigger entwickelt, angeregt durch die Forschungen Ampères, um 1820 einen *multiplyer* (eine Vorform des Galvanometers). Ein Galvanometer multipliziert in der Tat Spannungen, rechnet also implizit (kein elektronischer, aber elektrischer Analogrechner).

- archaische Formen des Analogrechners - keine Mathematik, sondern Simulation (mit) der Physik? "Electric circuits can <...> easily perform <...> simulations. For example, voltage can simulate water pressure and amperes can simulate water flow in terms of cubic metres per second."<sup>30</sup>

## **Experimentelle Simulation mit dem Analogcomputer**

- Analogrechner korrelieren mit induktiver Experimentalphysik (Faraday), im Unterschied zum deduktiven Digitalrechner (Maxwell)

„Die große Bedeutung der Analogrechner liegt in der ‚modellmäßigen‘ Nachbildung des zu lösenden Problems in der Rechenmaschine. Mit diesem Modell ist die Möglichkeit einer experimentellen Erforschung des Problems gegeben, indem die Auswirkung der Abänderung von Eingangsdaten auf

---

30 [http://en.wikipedia.org/wiki/Analog\\_computer](http://en.wikipedia.org/wiki/Analog_computer); last modified 29. April 2007; Zugriff: Mai 2007

die Lösungsfunktion unmittelbar verfolgt werden kann.“ <???

- "Die Bedeutung der Simulatoren liegt darin, daß man mit ihnen Experimente anstellen kann, wenn der Originalteil noch gar nicht existiert"  
= Kettel 1957: 130

- Mathematik wird hier selbst Experimentation, während "<...> zwar das technische Problem mathematisch formuliert wird, dieses mathematische Problem dann aber nicht mit mathematischen Methoden gelöst wird, sondern gewissermaßen als Brücke" - als Medium! - "dient, über die hinweg man zu einem Modell kommt, mit dem dann experimentiert werden kann" <ibid. ???, 13>

- Archiv Fachhochschule Mittweida; dortige Historischen Gerätesammlung; Objekt "Prozeßsimulator SIM 1" (Inv.-Nr. 03280 E6) - ein Eigenbau von 1975. Wissensgeschichtlich von Interesse, daß der Begriff der mathematischen Simulationen realweltlicher Prozesse nicht - wie heute zumeist vermutet - am Digital-, sondern am Analogrechner entwickelt wurde; verlangt nach Wiedererinnerung und Begründung; das Gerät noch einmal in Operation zu versetzen und diesen Durchlauf entsprechend zu dokumentieren; Verwendung des SIM 1 für Lehrzwecke, hergestellt von der Sektion Elektronischer Gerätebau, 1975; Übungsbuch anbei: "Darstellung des Zusammentreffens von Zufallsgrößen bei der Montage elektrischer Funktionseinheiten durch die Methode der stochastischen Simulation"

### **Between emulation and simulation of dynamic worlds**

- Jens Schröter, Computer/Simulation. Kopie ohne Original oder das Original kontrollierende Kopie?, online [http://www.theorie-der.medien.de/text\\_druck.php?nr=41](http://www.theorie-der.medien.de/text_druck.php?nr=41)

### **Demonstrations-Analogrechner der Technischen Sammlung Dresden**

- eingestelltes Beispiel = Formel für Pendelbewegung (gedämpft); symbolische Formelzeichen werden in Baugruppen übersetzt (symbolischer Flow-Chart); die liegen dann als kalibrierbare Hardware-Gruppen vor (etwa Widerstände, Potentiometer). Am Oszilloskop erscheint die Schwingkurve a) über die Zeit, b) als Zustand (Nautilus-artige Schleife).

- dient das Oszilloskop, anders als in der klassischen Meßtechnik, hier nicht der Darstellung eines extern vermessenen Verlaufs (etwa akustische Signale aus dem Radio/lautsprecher), sondern repräsentiert innere (Spannungs- und Widerstands-)Zustände der Maschine, deren optisches Interface das Oszilloskop ist - transitiv.

- Beispiel der gedämpften Schwingung des Pendels gerade deshalb naheliegend, weil: Schwingungslehre von Barkhausen (in der 6. Aufl.

1958). Daß sich die Welt der Schwingungen im Mechanischen wie im Elektrotechnischen fast gleichsprüchlich abbilden und analysieren läßt, gehört zu den erstaunlichen post-pythagoräischen Befunden der Medienkultur

### **Der Heathkit EC-1**

- Röhren-Analogrechner EC-1; Anfang der 60er Jahre von der amerikanischen Firma Heathkit als Bausatz oder Fertiggerät vertrieben. EC-1 enthält 9 Verstärker, die extern frei beschaltet werden können. "So ist der Aufbau von Addierern, Integratoren oder Differentiatoren einfach möglich. Ergänzt wird das System durch Schaltungen zum Setzen von Anfangsbedingungen, Potentiometern für die Einstellung von Koeffizienten und einem Messgerät. Zeitverläufe müssen mit einem externen Oszilloskop oder Plotter dargestellt werden" = E-mail 15. Juli 2007 Thomas Falk, Verein Technische Sammlungen Dresden

- Computer von Heathkit folgendermaßen beworben: "Excellent teaching aid for a course in computer electronics ?Vividly illustrates the electronic analogies to mathematical problems ?Handles problems as complex as fluid flow, damped harmonic motion, and flight of a projectile in viscous medium."

- Verhältnis zwischen Apparatur und Mathematik ist hier eben nur ein analoges, nicht wesensgleiches ?es sei denn, Mathematik sei nicht-numerisch definiert, eher in Begriffen der Mengenlehre. Analogcomputer können Differentialgleichungen zwar nicht lösen, aber physikalisch simulieren?. Damit haben Analogcomputer in einer anderen Weise Anteil an der Welt (als physis), als es der digitale Computer im pythagoreisch-mathematischen Sinne ist: Analogcomputer sind gerade als physikalische Gebilde ?unscharf, also fehlerbehaftet, wie sie selber am unaufhörlichen Rauschen des Realen teilhaben? gerade im immer drohenden Zusammenfall von Signal und Rauschen drückt das Reale <Kittler ebd., unter Bezug auf: John von Neumann 1967, 144f>. Es ist dieser immer drohende Zusammenfall von Signal und Rauschen, der unser technisches Konzept vom Realen radikal vom Kosmos der Philosophen unterscheidet?0, von jenem Wunsch nach Wohlgeordnetheit (kosmos), der für altgriechisches Wissenwollen einen Denkhorizont (und damit auch eine Denkbarriere gleich dem ptolemäischen Weltbild) bildete

### **Auch Fernsehbilder: halb-digital**

- Zeilensprung im analogen Fernsehen: stufenweise baut sich das 30zeilige Fernsehbild des Systems von John Logie Baird auf, gespeichert auf Grammophonplatte (90 Zeilen, also drei Bilder pro Umdrehung, bei 78/Min.): "A single frame of the Paramount Astoria Girls may be crudely recognisable, but when seen as a moving dynamic television image, / the girls come to life before our eyes. There is something strange at work and it has much more to do with what we perceive than what is there in pixels,

lines and frames. What we are experiencing is not the detail that the eye sees, but the recognition of movement that the brain sees" = McLean 200: 211 f.; so „rechnet“ die Wahrnehmung (analog) diskrete Bildinformation (Zeilen, Bildkader) aus diskreten Flächen in Bewegung um, korrelierend mit der Bewegung des zeilenschreibenden Lichtpunkts (erst Nipkow-Scheibe, dann Kathodenstrahl) selbst. Eine räumliche Matrix wird so auf der Zeitachse transformiert: Bedingung für die Operation der Differentiation / Integration

## **Allianz von analog und digital: Der Hybrid-Rechner**

- Hybridrechner verbanden eine Zeitlang die Vorteile beider Rechnerformen

- Mit Digitalrechnern kommt ein Zeitweise der Verzögerung ins Spiel, die im Unterschied zur analogtechnisch bedingten stetigen Laufzeit radikal anderer, nämlich mathematisch-diskreter Natur ist. "A disadvantage of a digital method of solution lies in the relatively longer amount of computing time required for each solution", heißt es in der Analyse einer rechnerbasierten Methode raketengestützter Luftabwehr - also in einem Kontext, wo geringe Verzögerungen in der Vorausbestimmung bereits tödlich sein können, falls das Rechenergebnis dem Zielereignis hinterherläuft (ein kritisches Oszillieren zwischen Pro- und Retention). Die numerische Integration der zu bestimmenden Flugdaten und das Sampling von Meßdaten erfordern - wenn auch kleinste - Rechenzeitintervalle; im konkreten Fall "this would result in a running time of about eight times real time" <ebd.>. Erst die hybride Kombination des im Zeitbereich mäßigen, weil parallelverarbeitenden Analogcomputers mit der Tugend des Digitalcomputers, hinreichende Genauigkeit in bestimmten Rechenanwendungen zu erzielen, "the solution could be run at about one-tenth real time" <ebd.>

- Zeit versus Genauigkeit, oder deren Kombination: \*White Heat Cold Logic: British Computer Art 1960 - 1980\* edited by Paul Brown, Charlie Gere, Nicholas Lambert, and Catherine Mason, MIT Press, 127, über Installation Ihnatowicz Rückverwandlung digitaler Daten in Analogcomputer, um Geschwindigkeit zu erhöhen: "The output from the computer was latched as sixteen data bits (the input could also be set via manual switches, for testing). All sixteen bits were also taken to light bulbs for debugging purposes. The sixteen bits were split into two sets of 8 bits, which represented the next required position for an actuator, thus each joint had 32 (2<sup>5</sup>) discrete positions. This was a very low position resolution but was overcome by the use of a circuit called the 'predictor.' <...> (The computer was not fast enough to generate smooth motion in real time, hence the use of analogue circuits.)." <pdf S. 118> "Fortunately, the circuit diagram for the predictor survives and was simulated using SPICE, a standard circuit simulation software package. <...> The predictor smoothes out the transition, so that the



motion of the robot joint starts and stops smoothly."

## **Oszilloskopien**

- Meßmedien implizit schon Analogrechner. Vilém Flusser definiert es anhand der Photometrie als der Kernfunktion photographischer Apparaturen, deren zentrale Parameter Zeit und Licht darstellen: "Alle Apparate (und nicht erst der Computer) sind Rechenmaschinen <...>. In allen Apparaten (auch schon in der Kamera) gewinnt das Zahlendenken Oberhand über das lineare, historische Denken."<sup>15</sup> Dies mag hinsichtlich der Perspektive (als mathematisch-geometrischer Konstruktion) richtig sein; allerdings ist hier das Nicht-Numerische an der Mathematik entscheidend.

- Digitaltechnik-Bausätze (Kosmos Micro-Kontroller; Computer-Bausatz Fischer) mit Oszilloskop vermessen (die jeweiligen Zustände); analoge Repräsentation digitaler Schaltzustände; mehrkanaliger Taktanalysator; ex-MAF: RFT-Meßbatterie: Oszilloskop plus „Integrierverstärker“, erworben am 14. Juli Trödelmarkt am Elbufer, Dresden

## **Nomogramme als Analogrechner**

- Nomogramm = bildliche Darstellung gesetzmäßiger Zusammenhängen (siehe Funktion) zwischen verschiedenen veränderlichen Größen (Variablen), aus der man zusammengehörige Werte der betriff. Größen bequem ablesen kann <= Brockhaus? S. 1162>; also: Abkürzung von Datenmengen in visuellen Zeichen. Gehört zum "graphischen Rechnen"; vgl. visuelles Programmieren. "Sie dienen in den beiden geometrisch dualen und damit theoretisch gleichwertigen Formen der Netzdiagramme und der Fluchtliniendiagramme <...> zur Realisierung nicht mehr notwendigerweise kommutativer zweistelliger Funktionen. Dabei handelt es sich nicht einmal um Geräte, sondern lediglich um Papierblätter. Bei den "Fluchtlinientafeln" muß lediglich ein Lineal benutzt werden, um Werte, die auf zwei Einstellskalen abgegriffen werden, zu verbinden und im Schnittpunkt mit einer Ergebnisskala das Ergebnis abzulesen <...>. Bei den "Netztafeln" entfällt sogar der Gebrauch eines Lineals, die Einstellwerte a und b werden als Koordinaten eines gewissen Punktes P(a,b) aufgefaßt; es ist diejenige Kurve aus einer mit Ergebniswerten x bezeichneten Kurvenschar zu suchen, auf der der Punkt P(a,b) liegt <...>"; dazu Abb. Bauer 2009: 58

## **Das privilegierte Verhältnis des Analogrechners zur Differentialrechnung**

- William Thomson, Mechanical Integration of the Linear Differential Equations of the Second Order with Variable Coefficients, in: Proc. Royal Soc., London, 14, 1876, S. 211

- Lord Kelvin 1876: Prinzip der Rückkopplung
- Mechatronik benennt Verbindung von Mechanik (Dynamik) und Mathematik, aufgehoben im elektronischen Analogcomputer
- privilegiertes Verhältnis des Analogrechners zu dynamischen Prozessen (Schwingkreise etwa)
- Leistungsfähigkeit von Analogcomputern steht und fällt mit der Zeitachse; sie sind „lediglich in der Lage, Veränderungen zu beschreiben, die in der Zeit ablaufen“ <Rieger 2003: 51> - dies aber immerhin fast unverzüglich. Für die Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen eignet sich der Analogcomputer mit der Zeit als einziger Variable; kommen hingegen weitere Variablen hinzu, ist der Übergang zu partiellen Differentialgleichungen vonnöten - an den Grenzen der Leistungsfähigkeit eines Analogcomputers

### **Lern-Analogcomputer**

- Denken in analogen Modellen ist eine alternative Weise von Mathematik und Erkenntnis, grundsätzlich
- Leybold-Heraeus-Handbuch:  
[http://fafner.dyndns.org/~analogmuseum/library/der\\_analogrechner.pdf](http://fafner.dyndns.org/~analogmuseum/library/der_analogrechner.pdf)
- Leybold-Heraeus Analogrechner 57601 (Lehrcomputertafel, 220 V) auch auf CD "Analogrechnermuseum"
- Was macht in Ausbildung und Lehre elektronische Analogrechner gegenüber speicherprogrammierten Digitalrechnern überlegen; Zitat von Walther: "Hervorhebenswert ist die Anschaulichkeit, mit welcher das implizite Gegebensein einer Funktion durch eine Differentialgleichung, der Einfluss von Parametern und die Zusammenhänge der verschiedenen Größen untereinander zutage treten."
- Analogrechner vermittelt - über die formelmäßige Rechnung hinaus - ein Gespür für die Mathematik: "Die Vermittlung eines solchen Gefühles für das Verhalten eines mathematischen Systems durch die hohe Interaktivität elektronischer Analogrechner ist die Grundlage dafür, dass vereinzelt noch heute derartige Rechner zu Ausbildungszwecken eingesetzt werden." <Diss. Ulmann 2008: 363>
- Elektronen-Drift führt beim Differenzieren im Analogrechner zwar zu extrem driftender Ableitung. Der Analogcomputer aber ist nicht nur der Modellierer und Simulator realer Physik, er unterliegt ihr auch, ist mithin ihr Subjekt. Aber Thermo-Rauschen etwa beeinträchtigt die Zufallszahlengenerierung auch in Digitalcomputern.
- Thermo-Rauschen beeinträchtigt Zufallszahlengenerierung

- Denken in Algorithmen versus Denken in Modellen (Ulmann); entscheidendes Moment des Analogrechnens: Modellbildung; in welchen Medien diese Modellbildung realisiert wird (mechanisch, elektronisch, Digitalcomputer) ist zweitrangig
- 1960 Argonne National Laboratory report „Introduction to Electronic Analogue Computing“ courtesy of Jim Benson  
 READ article about analog computers by George Fox Lang appearing in the August 2000 issue of Sound and Vibration magazine" = Doug Coward's Analog Computer Museum and History Center = <http://dcoward.best.vwh.net/analog/> Zugriff 12. November 2008
- „Die Arbeitsweise der <...> elektronischen Rechenanlagen beruht in folgendem: Man kann im allgemeinen für jedes Problem einen physikalischen, insbesondere elektrischen bzw. elektronischen Vorgang finden, der durch dieselben Gleichungen beherrscht wird wie die im Problem geforderten.
- Analogrechner keine symbolverarbeitenden Maschinen (nicht im medienimmanenten Sinne, allein auf der Ebene der symbolischen Notation des Steckfelds)
- Analogrechner Gegenstück zur Experimentalphysik (Faraday), im Unterschied zum Digitalrechner (Maxwell): "Die große Bedeutung der Analogrechner liegt in der Modellmäßigen Nachbildung des zu lösenden Problems in der Rechenmaschine. Mit diesem Modell ist die Möglichkeit einer experimentellen Erforschung des Problems gegeben, indem die Auswirkung der Abänderung von Eingangsdaten auf die Lösungsfunktion unmittelbar verfolgt werden kann.<sup>1</sup> Der Akzent auf der Änderung kennzeichnet den Analogrechner als genuin dynamisches Medium (im Unterschied zur Turing-Maschine als Zustandsmaschine): "Dynamisch, weil es auf Änderungen reagiert."<sup>2</sup> Dynamisch aber verhält sich auch eine Flipflop-Schaltung in ihren Zuständen, also eine digitale Baugruppe, wenn etwa die Entladung von Kondensatoren eine Wechselschaltung steuert: "Welcher Elko gerade aufgeladen ist, bestimmen die Zustände der Transistoren?" = Schlenzig ebd.
- "Im Gegensatz zum Ziffernrechenautomaten steht somit der Bearbeiter am Analogrechner in einer ganz anderen Beziehung zur zu lösenden Aufgabe. Man kann sagen, daß er ein Wesen ist, die Auswirkung von Parameteränderungen bekommt." = Kathe 1970: 424
- Analogrechner „unentbehrliche Hilfsmittel für die <...> Untersuchung von Schwingungsvorgängen und für die mathematische Forschung“ <ebd.>
- hängt Mathematik an der Abzählbarkeit (also zeitdiskret), oder eine andere Mathematik denkbar, in einer anderen, nämlich kontinuierlichen Zeit? „Die modellmäßige Nachbildung <sc. Eines physikalischen Prozesses durch den Analogcomputer> erfordert, daß für jede im Problem vorkommende Rechenoperation ein eigenes Rechenelement vorhanden

sein muß. Eingangsgrößen und Veränderliche werden in physikalische Größen umgeformt, mit denen in der Maschine ‚stetig‘ gerechnet wird“ <Kathe 1970: 425> - ein Oxymoron?

Auch der Analogrechner ist universell, angelegt in seiner Modularität wie der Synthesizer: „Ein universeller Analogrechner ist durch die Möglichkeit gekennzeichnet, die vorhandenen Rechenelemente nach dem Baukastenprinzip beliebig zu verbinden oder zusammensetzen“ <ebd.>

- "Der ger?em?igen L?ung einer Gleichung liegt das R?kkopplungsprinzip von W. Thomson (dem sp?eren Lord Kelvin) zugrunde, nach dem Rechenelemente zu einem geschlossenen Schaltkreis verbunden werden. Ausgangsfunktionen von Rechenelementen gehen unmittelbar wieder als Eingangsfunktionen in Rechenelemente ein?<ebd.>, was schon mechanisch geleistet werden kann.

- Nicht nur kann mit einem Analogrechner eine Regelstrecke kybernetisch simuliert werden, sondern auch deren Zeitverhalten, indem für die Simulierung der Originalzeitmaßstab zugrunde gelegt wird oder durch eine Zeittransformation eine Zeitraffung oder Zeitdehnung erfolgt <ebd.>.

F(x): „Als Rechengrößen werden für die abhängigen Veränderlichen die Spannungen, / für die unabhängige Veränderliche die Zeit verwendet“ <ebd., 425f>; das zentrale Rechenelement ist dabei der „Rechenverstärker“ (vielfach ein Gleichspannungsverstärker, in dessen Rückkopplungszweig Widerstände oder Kondensatoren eingeschaltet werden).

Analog der Maschinensprache für Digitalrechner gilt im Analogcomputer „die sog. Maschinengleichung, die im Analogrechner gelöst wird“ <ebd., 431>; die vorgegebenen Problemveränderlichen werden dabei in proportionale Maschinenveränderliche umgeformt.

- Abszisse der zu rechnenden Funktion ist selbst Zeit: Die Zeit  $t$  ist die unabhängige Veränderliche des zu untersuchenden Problems;  $T$  ist die unabhängige Analogrechenzeit (Zeit hier als Signifikant und Signifikat des Rechenprozesses)

- bevorzugtes Objekt für Analogrechnungen: die Integration einer Funktion der Zeit

- „Die Differentiation wird in der Regel durch den Einsatz von Integratoren umgangen, obwohl es im Prinzip möglich ist, durch Auswechseln von Kondensator und Eingangswiderstand zu einem Differentiator zu kommen“ <435>.

- Transitive Mathematik: "Today, computers use 0 and 1 to encode numbers. However, numbers can also be represented directly through physical quantities such as electrical voltages or currents, volumes of liquid, or the position of mechanical shafts. Although limited in accuracy,

analog computers are very useful for certain types of applications. Prior to the early 1950s, it was not possible to say whether analog or digital technology would prevail. Mechanical analog machines were designed by Lord Kelvin at the end of the nineteenth century and reached a peak with the Differential Analyzers built by Vannevar Bush in the 1930s. Descendants of these giant mechanical devices were in regular use until the early 1960s. Electrical analog computers are still used for some special applications" = <http://www.computerhistory.org/virtualvisiblestorage>;  
Zugriff: 6. Juni 2008

- englischsprachiger Text auf [www.vaxman.de](http://www.vaxman.de) zum Wesen des Analog- und Hybridrechners: als Stärke des Analogrechners ausdrücklich der Begriff "time-critical"

### **Optische Funktionsgeber**

- "Optische Funktionsgeber haben nichts mit Speicherrohren zu tun - die Idee ist, vor einer Oszilloskopröhre eine Maske anzubringen, auf der der Graph der zu erzeugenden Funktion geschwärzt dargestellt ist. Mit einer einfachen Servoschaltung und einem Photomultiplier, der hinter der Maske angeordnet ist (das Ganze natürlich lichtdicht aufgebaut), kann nun dafür gesorgt werden, dass der Leuchtpunkt bei wechselnder X-Ablenkung immer auf der "Kante" des Funktionsgraphen gehalten wird, so dass die hierfür nötige Y-Ablenkspannung als Funktionswert ausgegeben werden kann" = E-mail 17. Mai 2011 Bernd Ulmann; dazu Korn & Korn, "Electronic Analog and Hybrid Computers", 1964, 248; Huseky & Korn, "Computer Handbook", 1962, S. 3-68 ff.; McKay & Fischer, "Analogue Computing at Ultra-High Speed", 1962, S. 94 ff.

### **Kybernetische Neurobiologie, Künstliche Intelligenz und der Analog- respektive Hybridcomputer**

- elektrische Modellierung eines primitiven lernfähigen Bio-Systems; Memristor, dessen innerer Widerstand sich nicht nur in Abhängigkeit des erfahrenen elektrischen Stromes ändert, sondern diesen Wert auch bei Abschaltung des Stroms konstant zu halten vermag. Diese Gedächtnisfunktion, mit der auch einzellige Organismen in ihrer Lernfähigkeit gegenüber der Umwelt modelliert werden können, stellt ein analoges Gegenstück zum digitalen FlipFlop dar. Siehe Yuriy V. Pershin / Steven La Fontaine / Massimiliano Di Ventra, Memristive model of amoeba's learning, in: arXiv:0810.4179v3 [q-bio.CB], 27. Juli 2009

- Turingsche "Imitation" ist vom Begriff der "Simulation" deutlich zu unterscheiden. Tatsächlich entstand die elektronische Simulation welthafter physikalischer Vorgänge dem Reich des Analogcomputers (einen solchen sogenannten "Process Simulator" haben wir im Medienarchäologischen Fundus im Keller der Sophienstraße sogar stehen), bevor es dann viel später im Digitalcomputer durch entsprechende Programmierumgebungen Einzug hielt

- Hybridrechner: eine Hochzeit von "analog" und "digital"?

- John von Neumann faßt die neuronalen Aktionspotentiale ("the nerve-pulse part of the system") als digitale Operation auf, die endophysikalischen chemischen Abläufe in der Zelle analog = John von Neumann, *The Computer and the Brain*, New Haven: Yale University Press 1958, 68; insofern stellt das Hirn einen Hybrid-Computer dar

- Resultate kommen in einen Speicher, etwa auf Magnetband, von da ab digital auslesbar / rechenbar)

### **Was ist am sogenannten Digitalcomputer überhaupt „digital“?**

- "[...] *computable real numbers* lassen sich mit endlich vielen Zeichen eines Alphabets beschreiben. [...] das Reelle, weil sein Körper überabzählbar ist, bleibt weiterhin als Unmögliches [...]. Jeder digitale Computer fällt mithin Jahrtausende hinter die neuzeitliche Analysis zurück, um erneut eine strikt pythagoreische Mathematik zu implementieren. [...] Alle Zustände einer digitalen Maschine lassen sich als entweder offener oder geschlossener Schalter implementieren, also mit den [...] binären Zahlen Eins und Null. Anders wäre der *physis* kein *logos* einzuschreiben, wie das elektronenlithographisch millionenfach pro Tag geschieht [...]"<sup>31</sup>- und doch: der Analogcomputer "rechnet" Mathematik (*logos*) *als physis*

- numerische Lesart von Pulszügen eine geradezu platonische Idealisierung unreiner Signalecken. Alles daran ist (elektro-)physikalisch, also der Welt des Analoggen entspringend und entsprechend. Mathematik ist eine kognitive Überwältigung, ja Mißachtung dieser *physis* (ebenso wie auch die Fourieranalyse zwar den Klang in sinusförmige Elemente zerlegt, hier aber eher der Suggestion der vokalphabetischen Sprachanalyse folgt. Der Klang aber ist – so auch Denis Gabor – ein zeitlich Anderes als diese mathematische Analyse)

### **Informatisierung des Analogcomputers?**

- "rechnet" Analogrechner überhaupt? integriert, differenziert; die andere Lösung (statt Informationsausgabe über Kathodenstrahlbildschirm oder Meßkurvenschreiber): akustisch = (Moog-)Synthesizer

- mechanische Systeme elektrotechnisch in (quasi-)mathematischen Bausteingruppen – aber eben nicht numerisch – analysiert, unter Ausnutzung der mehrfachen Analogie zwischen beiden Operationsebenen;

---

31 Friedrich Kittler, Martin Heidegger, Medien und die Götter Griechenlands, in: Alexander Roesler / Bernd Siegler (Hg.), Philosophie in der Medientheorie. Von Adorno bis Zizek, München (Fink) 2008, 133–145 (142)

damit Vermeidung der Quantisierungsprobleme des digitalen Computers. Zuletzt noch eingesetzt im Flugzeugflügelbau

- Überleben des Analogcomputers im Digitalcomputer: eine virtuelle Fortexistenz, insofern analoge (physikalische) Systeme oder die Modelle des Analogrechners in digitaler Simulation durchgespielt werden

## **Die vergangene Zukunft des Computers: Analogrechner**

[= Kolloquium 17. Dezember 2008]

- Antwort auf Frage nach "Medien, die wir meinen" u. a.: der elektronische Analogcomputer. Es gehört zu den Eigenheiten der technologischen Medien, daß sie nur bedingt den normalen Rhythmen der historischen Zeit unterliegen. So wird der Analogcomputer, obgleich zumeist als bizarre Sackgasse in der Geschichte des Computers beschrieben, durch die Fragestellungen des Quantencomputers wieder aktualisiert (zumindest als Modell)

- medienarchäologisches, auch medienepistemologisches (hochaktuelles) Interesse am Analogrechner als Alternative zum Digitalcomputer, Veto gegenüber einer vorschnellen Historisierung dieser elektrotechnischen Meisterwerke; Leidens- und Erfolgsgeschichte, ein Exemplar dieser Gattung im Signallabor der Sophienstraße wiederzubeleben; Einblick in das Wesen von Elektromathematik

- *featuring* MEDA 42 Computer

- Medienwissenschaft, welche Theorien und die Arbeit an der konkreten Hardware miteinander kombiniert; historischen Analogcomputer (MEDA 42) ggf. als Musiksynthesizer umnutzen (Komponenten weitgehend identisch); daran über die Differenz von „analog“ und „digital“, von Rechnen mit Physik und mit Symbolen nachdenken

- Ambition, den Analogcomputer nicht als ein historisches Stück Computergeschichte zu sehen, sondern als eine grundsätzliche Alternative im Verhältnis zu Rechnen, Zeit und Welt

- Simulationsergebnisse und Vergleich mit der heutigen digitalen Simulations-Software SPICE, dem *state-of-the art* Werkzeug seit Ende der 80er Jahre

- elektronischer Kernkomponentennachbau und die Software-Simulation einer Schwingkreisberechnung durch Analogcomputer

- sonischer *Auftakt* erinnert an die Wesensverwandtschaft des Analogcomputers und des musikalischen Synthesizers. Beide elektronischen Apparaturen stellen ein Paradies aus Stecktafeln und Potentiometern dar

- Gerald Kell, Professor an der TH Brandenburg "komponiert" Schaltungen für die Verarbeitung von extremen Datenraten bis 30 GigaBit/s - "ähnlich einem Musiker. Wenn er es für gut befindet, malt er eine Schaltung auf: das sind die Noten, die den anderen gestattet, mitzuspielen oder es wiederholt zu realisieren. So hat einmal Erfundenes Bestand" = E-mail 20. November 2008 Frank Winkler
- Komponist Hans Kulk, der tatsächlich auf Analogrechnern Musik komponiert; Nähe von Elektroakustik und Analogrechner liegt (von den Modulen her) auf der Hand
- Analogcomputermuseum von Bernd Ulmann in Bad Schwalbach (Taunus): <http://fafner.dyndns.org/~analogmuseum/deutsch/library.html>
- medienarchäologisch interessante Monumente und das computerepistemologische Momentum des Analogrechners
- in *Mathema*-Ausstellung (Deutsches Technikmuseum Berlin) endlich Hoelzers Ur-Analogcomputer von Peenemünde wieder zu sehen, in einem von Hoelzer selbst noch autorisierten Nachbau; ging es bei diesem ersten elektronischen Analogrechner gleich zweifach darum, einerseits die Raketenwaffe V2 in ihrem Flug zu simulieren, und andererseits, sie mit einem integrierten Analogrechenteil selbst zu steuern; genauere Begriffsverwendung vonnöten: "Rakete" bezeichnet den ballistischen Flugkörper im Unterschied zum "Lenkflugkörper", der erst zum Objekt respektive Subjekt kybernetischer, nachrichtentechnischer Operationen werden kann. Die V1-Raketen, die nach dem D-Day auf London niedergingen, waren von der Artillerieabwehr noch relativ leicht in ihrer linearen Flugbahn extrapolierbar; anders verhält es sich mit bemannten Flugzeugen, deren Piloten zu spontanen Ausweichmanövern fähig sind. Genau dieses willkürliche Verhalten mathematisch zu modellieren war die Ambition Norbert Wieners
- Modellhaftigkeit des Analogcomputers kam als Erkenntnis während desgleichen Epche zustande, in der Hoelzer seinen vollelektronischen Analogrechner in Peenemünde konstruierte, auf der anderen Seite des Atlantik. Der Mentor von Claude Shannon, Vannevar Bush, konstruierte den legendären elektromechanischen Differential Analyzer, einen Analogrechner nach Fug und Recht. Und Bush formulierte dazu auch dessen epistemologische Qualität, was alle Mediengeschichten, welche den Analogrechner zu einem bloßen Zwischenkapitel oder als bloße Sackgasse in der Geschichte des Computers darstellen, Lügen straft
- Verdienst von David Mindell, aus den Archiven des Massachusetts Institute of Technology die Rolle des Analogrechners für die Vorgeschichte dessen ans Licht gebracht zu haben, was dann später (1948) von Norbert Wiener auf den Begriff gebracht wurde: *Kybernetik*. Monographie *Between Humans and Machine. Feedback, Control, and Computing before Cybernetics* (2002); Kapitel in Mindells Buch, das den schönen Titel "Analog's finest Hour" trägt, schließt sich der Kreis gegenseitiger Referenzen und führt als Wissensvermehrung die Figur des positiven und



negativen Feedback an, die im Zentrum der Funktionsweise des Analogcomputers selbst steht; Archäologie des Analogcomputers, konkret: seine Genese aus den Feuerleitsystemen in der Zwischenkriegszeit des frühen 20. Jahrhunderts

- Brückenschlag zu Helmar G. Franks kybernetischen Lehr- und Lernmaschinen: Mitstreiter Max Benses und Karl Steinbuchs, dem Herausgeber des Klassikers *Mensch und Automat*, auf dessen Titelblatt ein Telefunken-Analogcomputer glänzt

- Kernbegriff der Ästhetik des Analogrechnens ist das Modellieren: "Eine Analogie liegt vor, wenn sich zwei verschiedene physikalische Systeme durch die gleichen mathematischen Gesetze beschreiben lassen" <174>; es geht hier also um ein innerweltliches Rechnen, für dessen Ermöglichung die symbolische Mathematik einen gemeinsamen Nenner bzw. ein syllogistisches Medium (nämlich den *terminus medius*) darstellt

- sowohl das elektrotechnische Modell wie das referenzierte physikalische Ereignis - etwa eine Federschwingung - verhalten sich (in der Sprache der Textlinguistik) *koreferentiell* hinsichtlich der gemeinsamen algebraischen Differentialgleichung

- Programmieren eines Analogrechners besteht im Kern aus dem Aufbau eines Modells aus Rechenelementen, das dem zu lösenden Problem analog ist.<sup>32</sup>

- Kley nennt als Beispiel dafür die Analogie zwischen einem mechanischen Schwinger und einem elektrischen Schwingkreis; letzterer "im Prinzip zur Lösung aller Probleme geeignet, die sich mathematisch durch eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit positiven Koeffizienten beschreiben lassen. Die Lösung gewinnt man hier durch Messen des zeitlichen Verlaufs des Stromes  $i$ , der mit handelsüblichen elektrischen Registriergeräten direkt in Kurvenformaufgezeichnet werden kann" <Kley 1964: 175>. Hier fungiert ausdrücklich "der elektrische Schwingkreis als Analogrechner" <ebd.>. Zu einem universalen Rechner aber kommt es erst, wenn man mit mechanischen oder elektrischen Mitteln "ein analoges System aus einzelnen Rechenlementen aufbaut, wobei jedes Element eine bestimmte mathematische Operation auf die zugeführten Größen anwendet, z. B. über sie summiert, integriert, sie multipliziert usw." = ebd.

- Leistungsfähigkeit des Denkens in (indirekten) Analogiemodellen; die unterschiedliche Herangehensweise, verglichen mit algorithmischen Methoden

- Zukunft des Analogiegedankens im Zusammenhang mit digitalen Analogrechnerimplementationen; streng genommen nicht analoger Rechner digitalisiert, sondern die analoge Schaltung

---

32 A. Kley den "Analogrechner" (in: Helmar Frank (Hg.), *Kybernetische Maschinen*, 1964, 174-182 (177))

- Analogcomputer-Programm springender Ball (Ulmann):  
[http://www.youtube.com/watch?v=w\\_4vly7nFCU](http://www.youtube.com/watch?v=w_4vly7nFCU); Bilder der Schaltung:  
[http://www.analogmuseum.org/english/examples/bouncing\\_ball\\_box](http://www.analogmuseum.org/english/examples/bouncing_ball_box)

## **"Erfahrungen mit Analogrechnern und Modellregelkreisen"**

[Notizen zum gleichnamigen Vortrag Prof. em. Gunter Schwarze , 19. Oktober 2011, Medientheater]

- Analogrechner verbindet nicht (wie der Rechenschieber) einzelne Zahlen, sondern einzelne Funktionen und Operationen über diesen Funktionen; elektromechanische Integrieranlage

- mathematische Integrationsgleichung (einer Geschwindigkeit, also Integration über die Zeit) wird durch Umstellung in Diagramm umgesetzt; Blockbild (Grundprinzip Lord Kelvin 1876); Prinzip Rückführung / Rückkopplung. Für maschinelle Umsetzung wichtig: Rückwirkungsfreiheit (Messung am Ausgang muß diegleichen Ergebnisse zeitigen wie ohne Messung. Erheblicher technischer (und Programmier-)Aufwand, Rückwirkungsfreiheit zu erreichen, also Unschärferelation minimieren, z. B. Ladung eines Kondensators / allmähliches Aufleuchten einer Glühbirne

- Lösung einfacher Differentialgleichungen über Rückkopplung; praktische Anwendung: Stoffschieber in Papierherstellung; Rückkopplung in Echtzeit

- Modellelemente einer graphischen Beschreibungssprache und deren formale Semantik

- wenn an Eingang Sprungfunktion gelegt wird, verzögert durch Verzögerungsglied (verlangsamter Anstieg) oder Totzeitglied (absolute Pause); wird tatsächlich nur annähernd erreicht

- Schwarze zeichnet an: "zunächst etwas Totzeit"; Übergangsfunktion eines reinen Totzeitgliedes

- Funktionen jeweils durch große Tafeln mit mathematischer Funktion beschrieben; physikalische Realisierung einer mathematischen Symbolik: damit erst operativ

- Interface des Analogcomputers ein anderes

- Analogrechner UNIMAR I. Totzeitelement: Magnetband als Spule; Abstand variabel; vgl. Hall- und Echogenerator für elektronische Klangeffekte

- 1964 bei Gründung Rechenzentrum HU: teilweise Analog-, Digitalrechner

- Analogrechner arbeitet simultatn parallel wie menschliches Denken

- Wiederholung der Analogrechnung bis zu 50x/Sek. macht Darstellung am

Oszilloskop möglich; war zur damaligen Zeit mit Digitalrechner kaum möglich; Echtzeit-Interface

- Einsatz Analogcomputer bevorzugt zur Simulation dynamischer Systeme (Echtzeitbetrieb möglich); z. T. in Realsysteme eingesetzt (Beispiel Rakete); Peenemünde / Helmut Hölzer, Aggregat 4

- ENDIM 2000 mit auswechselbaren Programmier tafeln

- Ende 50er Jahre an damaliger Technische Hochschule Ilmenau, Zentrum Programmierung Analogrechner, u. a. Bau Dreiachsen-Flugsimulator (Institut für Regelungstechnik). Bei vorab bekannten Störeinflüssen Gegensteuerung möglich; anders bei stochastischen Störeinflüssen

- Elektronischer Analogrechner Modell der Super Constellation (Flugzeug)

- pneumatischer Modellregelkreis: mit pneumatischem Unterdruck (statt Elektrizität) arbeitend

- Registrierpapier (xy-Plotter) zum Thema Einnahme eines Medikamentes. "Konzentrationsverläufe eines Pharmakons in versch. Organen d. lebend. Organism."; für Ausdruck mußte Rechnung verlangsamt werden. Einmal matheamtisches Modell: Niere entspricht dem Integrierer; Magen = Verzögerungsglied

- die Zeit der Analogrechnerprogramm simulation (simuliert wird nur das mathematische Modell), beginnend 1966 mit Programm DIANA auf Computer ZRA 1; auch 1973 auf BESM 6

- Begriff "Simulation" und "Echtzeit" leitet sich aus Analogcomputerpraxis ab

- 1991 Doppeljubiläum: jeweils 50 Jahre Digitalcomputer Zuse (Z1) und Analogcomputer Hoelzer

- kleiner Analogrechner Hoelzers als Kriegsbeute in die USA. Nachbau heute im Technikmuseum Berlin

- Rede für Enthüllung Gedächtnisstein Forstamt Neu Pudugla (Usedom / Peenemünde); unter Inschrift auch eine Analogrechnerschaltung abgedruckt - wie auf Grabstein Ludwig Boltzmann, Berlin

- Dankbrief Hoelzer: "alles was ich getan habe, war, die Mathematik beim Lösen eines technischen Problems durch ein (simuliertes) Experiment zu ersetzen." Zitiert Sprichwort: "Man kann keinen überholen, wenn man immer nur in die Fußstapfen anderer tritt"

- Analogrechner zur "automatischen" (Zuse) Lösung einfacher Differentialrechnungen (Zuse-Brief aus Anlaß Enthüllung Gedenksteine)

## **Rechnen, Hören und Sehen mit klassischer Elektronik: Analogcomputer und Synthesizer in gegenstrebigter Fügung**

- Audiovisionen des Rechnens mit Elektronik: Verbrüderung von Analogcomputer und Synthesizer (eine medienarchäologische Experimentalanordnung); Hans Kulk: Musik mit Analogcomputern; Heinrich Heidersberger / Benjamin Heidersberger
- optische Muster mit Analogcomputern: Rhythmogramme (Heinrich Heidersberger / Benjamin Heidersberger)
- Herbert W. Franke: frühe Computergrafik auf dem Analogcomputer; Film *Tanz der Elektronen* (1962)
- Jenenser Zeiss-Planetariumsprojektor aus den späten 20er Jahren als mechanischer Analogcomputer; hinkt dem Differential Analyser von Vannevar Bush hinterher
- Datenflußrechner
- "kontinuierliche Digitaltechnik" (Horst Völz)
- transitive Mathematik: Unverzüglichkeit des Analogcomputers und das zeitliche Kriterium von Simulation
- Spiel mit dem Analogcomputer (*Tennis for Two*)
- medienarchäologische Verbrüderung von Analogcomputer und Synthesizer; Rechnen mit dem Synthesizer einerseits (harmonische Oszillationen, Frequenzteilungen); Musik und Bilder auf, aus und mit Analogcomputern andererseits (nicht-digital gerechnete Audiovisionen); wieder zusammenbringen, was zumeist im Rahmen von Computergeschichte einerseits und elektronischer Musik andererseits getrennt gedacht wird: technische Gleichursprünglichkeit von Analogcomputer und Musiksynthesizer; Analogcomputer auf eine erkenntniseröffnende Weise umnutzen und damit Musik darbieten (Kulk); Manfred Miersch (Subharchord); <http://www.subharchord.de>
- Fuchs' *Denkmaschinen*<sup>33</sup>: zum Thema Analogrechner (S. 281-286) Unterschied zwischen symbolischem (diskreten) und physikalischem (stetigen) Rechnen - also Zählen vs. Messen, womit auch das archaische pythagoräische Monochord zum Analogrechner wird. Zudem wird die Rolle der Leibnizschen Infinitesimalrechnung für die mathematische Epistemologie des Analogrechners transparent; Metapher auf S. 284: "Für die 'Melodie' der Zahlen setzt der Analogrechner gleichsam auf den geschmeidigen Klang der Zugposaune, während der Digitalrechner hier den 'harten' Anschlag des Cembalos vorzieht."
- Nachbau *Tennis for two*; daß medientheoretische Fragen wie die nach dem Analogcomputer am Besten am konkreten medienarchäologischen

---

<sup>33</sup> Walter R. Fuchs, Knauers Buch der Denkmaschinen. Informationstheorie und Kybernetik, München / Zürich (Droemer Knaur) 1968

Gegenstand erprobt werden; Erzeugung des Ball-Sprungs durch Relais = unerwartete Facette dieses Universalbausteins aus klassischer Elektrozeit

- Pure Data als graphische Programmiersprache ("operative Diagrammatik") nach dem Vorbild des modularen Synthesizers erschaffen; inversiv nun virtueller Synthesizer in PD

- *unconventional computing*; biochemische Mechanismen für die Lösung rechnerischer Probleme, ähnlich zum *analog computing*; die Zukunft des Analogcomputers: nicht als elektrotechnische Lösung, aber als Prinzip (Parallelrechnen); keine Verengung auf den Analogcomputer im rein technikhistorischen Sinne, sondern medienepistemologische Horizonterweiterung zu diagrammatischem "Think analog!"

erste beiden Studio-Alben von Klaus Schulze "Irrlicht" (1971) und "Cyborg" (1973); von Schulze aus dem Jahr 1980 ein Studio-Album namens "Dig-It", auf dem ein Titel namens "Death of an Analogue" mit 12 Minuten Länge enthalten ist

- Hinweis Edward Lorenz in den 60ern, dass Wetter sich nicht in transitive Mathematik übersetzen lässt (Edward N. Lorenz: *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere*. World Meteorological Organization 1967)

- Unmöglichkeit, Wetter mit Analogcomputer zu berechnen; die Grenzen der transitiven Mathematik (und im Gegenzug John von Neumanns dezidiert mathematische Option des Digitalcomputers)

- Planetarium Jena: in der Tat ein Makro-Analogcomputer; die Qualitäten des optomechanischen Sternprojektors als Analogcomputer ausloten

- Bernd Mahr, Kolloquium "Programmierbare Materie": Computer alternativ zur von-Neumann-Architektur; Arbeiten am "Datenflußrechner" (gemeinsam mit dem aus Analogcomputistik vertrauten Wolfgang Giloi); die "Gegenwart" und die "Zukunft" des Analogcomputers diskutieren - damit er nicht zum kuriosen Zwischenkapitel der Rechentechnik verkommt. Parallelrechner, an dem Herr Mahr mitarbeitete, war Suprenum

- Herbert W. Franke = [franke@zi.biologie.uni-muenchen.de](mailto:franke@zi.biologie.uni-muenchen.de): Einsatz Analogcomputer für künstlerische Experimente; auf Bildschirmaufnahmen beruhender Film *Tanz der Elektronen* (1962)

- Heinrich Heidersberger, 50er- und 60er-Jahren mit "Rhythmogrammen", auf mechanischem Analogcomputer erzeugt:  
<http://www.heidersberger.de/pages/index.html>

- Im Technischen Museum Warschau ein Prachexemplar von Analogcomputer: der ARR von 1954 (elektronischer Differentialanalysator, durchgängig bestückt mit Kathodenstrahlröhren)

- "nur sehr eingeschränkt sagen, dass der Analogrechner als Modell in

Digitalrechnern weiterlebt, da auch heutige Simulationssysteme zwar nach aussen das gleiche mathematische Framework zur Verfügung stellen, nach innen jedoch quasi traditionell hauptsächlich sequenziell arbeiten (müssen). "Ich denke aber (noch immer), dass die architekturelle Grundidee des Analogrechnens eine grosse Zukunft hat, da man anders kaum ein auch nur annähernd so grosses Mass an feingranularer Parallelität erzielen kann. Heutige Prozessoren verbringen erschreckend viel Zeit mit Speicherzugriffen fuer das Abarbeiten traditioneller Algorithmen. Dies koennte man zu einem grossen Teil quasi loswerden, wenn man den Schritt zu rekonfigurierbarer Hardware wagt, die durch ihre Struktur rechnet, nicht durch einen Algorithmus" = E-mail 11. Mai 2011 Bernd Ulmann

- Mark Titchener, hat Analogrechnersimulationssystem (PERTECS) entwickelt: <http://tcode.auckland.ac.nz/~mark/Signal%20Processing%3A%20PERTECS.html>

- [http://www.amazon.de/Analogrechner-Wunderwerke-Grundlagen-Geschichte-Anwendung/dp/3486592033/ref=sr\\_1\\_1?ie=UTF8&qid=1305118148&sr=8-1](http://www.amazon.de/Analogrechner-Wunderwerke-Grundlagen-Geschichte-Anwendung/dp/3486592033/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1305118148&sr=8-1)

- Hans Kulk experimentiert mit Analogrechnern, antikem Meßgerät und dem *analog modular synthesizer*; Klang als Oszilloskopien; Klangimprovisationen, verkleidet als 'data sonification' / 'auditory display': <http://www.log673.nl/sonifications.htm>

- Charles Care, Technology for Modelling Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing, Springer Verlag; "Empirical Modelling"-Ansatz in Warwick, der den aussergewöhnlichen Bezug zum "analogous computing" herstellt und das vertraute Planimeter wiederauferstehen läßt; die diagrammatische Modellierung als epistemologischer Brückenschlag zu "Think Analog!"

- "project at Warwick we call Empirical Modelling (EM): a wide-ranging reconceptualisation of computing for which we have developed distinctive principles and tools. The emphasis we put on the primacy of experience (rather than abstraction) gives our work (in principles and in practice) a strong affinity with analogue computing. While we have long been aware of this connection we have not really developed it to any extent" = Steve Russ - Associate Professor in Computer Science, University of Warwick, UK, E-mail 9. November 2011; <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/dcs/research/em/>

- Manfred Hild vom "Labor für Neurorobotik" am IfI; praktische Experimente zu analogen Implementierungen senso-motorischer Schaltungen; <http://www.neurorobotik.de>; Roboter mit Regelung in Analogtechnik

## **Diverse Notizen "Analogcomputer"**

- katechontische Medienepistemologie: den Begriff des "Analogen" offen halten, aufhalten, technisch wie epistemologisch. Zukunft des Analogrechnens liegt darin, ihn gerade von der engen technikhistorischen Bindung an den Analogcomputer zu lösen

- Unvergangenheit [respektive Aktualität] des Analogcomputers

- Philosophie des Analogen; mathematische Maschinen (allgemein); eine alternative Mathematik: Denkweisen der Analogrechnung

- Epistemologie von Analog- und Digitalsimulation; Fallbeispiel "Reaktorsimulator": Analogcomputers als alternative Weise, Mathematik operativ (im Sinne von "diagrammatic reasoning" und Modellierung) zu denken.

- im Namen des Analogen: Quantencomputer als Alternativen zur von-Neumann-Architektur

- Bernd Ulmanns Webseite zum "springenden Ball" mitsamt zum Nachbau einladendem Schaltplan:  
[http://www.analogmuseum.org/deutsch/examples/bouncing\\_ball\\_box/index.html](http://www.analogmuseum.org/deutsch/examples/bouncing_ball_box/index.html)

- gehört es zu den Eigenheiten der technologischen Medien, daß sie nur bedingt den normalen Rhythmen der historischen Zeit unterliegen; wird der Analogcomputer, obgleich zumeist als bizarre Sackgasse in der Geschichte des Computers beschrieben, durch die Fragestellungen des Quantencomputers wieder aktualisiert (zumindest als Modell)

- Rechenvorgang erfolgt im Analogrechner nicht aufgrund numerischer Verfahren, sondern es wird ein physikalisches Modell aufgebaut, in dem strukturanalog (und geradezu diagrammatisch im Sinne von Peirce) die gleichen Gesetze gelten, wie sie durch das zu lösende Problem vorgeschrieben sind

- Giloi 1960-64 Leiter des Analog und Hybrid Computer Department von AEG-TELEFUNKEN in Konstanz, dann Professor für Elektrotechnik und Computerwiss. an TU Berlin

- Mathematik der Analysis, für die der Analogrechner (zumindest in der harmlosen Variante gewöhnlicher Differentialgleichungen, weil primär mit Ableitungen nach der Zeit operierend) so optimal geschaffen war. Meisterung dynamischer Prozesse ist die große Leistung elektronischer Medien, und es stellt sich die Frage, inwieweit die gängige harte Dichotomie zwischen „analog“ und „digital“ nicht eine metaphysische Fiktion ist. Plancksches Wirkungsquantum: das vorgeblich Stetige, je genauer betrachtet, verhält sich sprunghaft, und damit prinzipiell numerisch berechenbar; Konrad Zuse spekuliert darüber in *Rechnender Raum*

- Nachbau Hölzer-Analogrechner Peenmünde entstammt der „Verstärkertechnik“
- Edmund Suschke, gemeinsam mit Biener ein Standardwerk über Automatisierungstechnik, unter ausdrücklichem Bezug auf Analogrechner MEDA
- "forschend Verstehen", so Johann Gustav Droysen in seiner *Historik*, über die historische Methode, die sich gleichermaßen von den reinen Geisteswissenschaften – dem Verstehen, der philologischen Hermeneutik – und ebenso von den Naturwissenschaften abgrenzt)
- modelliert der Analogrechner Mathematik? führt Mathematik mit Genauigkeit aus
- das technomathematische Verfahren, also die Übersetzungsarbeit vom Symbolischen ins Reale, die hier zum Einsatz kommt; Medienwissenschaft und technische Informatik treffen sich auf medienarchäologischer Ebene
- luzide Ausdifferenzierungen zwischen dem Wesen der Verschaltung respektive Programmierung analoger und digitaler Rechner
- verschiedene zeitlichen Modi, in denen Analog- und Digitalcomputer operieren; "zeitkritische Medienprozesse", also jene Prozesse, in denen kleinste zeitliche Momente entscheidend für den Gesamt Ablauf sind. Lange Zeit war der Analogcomputer, weil er mit der Geschwindigkeit von Elektrizität „rechnet“, gleich den live-Medien (Radio & Fernsehen) dem Digitalcomputer überlegen – bis daß die Taktleistung der Prozessoren auch diesen Rückstand aufgeholt hat
- "technikum29" in Kelkheim i. Taunus: einige Analogrechner, etwa die ersten Heathkit-Lerncomputer
- im OSI-Modell des Internet medienarchäologisch die unteren Schichten, konkret 1 und 2 am Interessantesten, da direkt mit der Bitsicht der Datenerübertragung befaßt
- Versuch, mangelhaftes elektronisches Wissen durch Hineinbringen nicht-elektronischer Fragestellungen zu kompensieren

### **Elektronische Modellierung neuronaler Prozesse / Simulation**

- Begriff des Zeitkritischen im medienarchäologischen Zusammenhang im Sinne der Forschungen Hermann von Helmholtz' gemeint, der sich mit der Laufzeit von Nervenreizungen beschäftigt; Unterschied zwischen Laufzeiten in Nerven und in elektrischen Leitungen ist - Helmholtz' eigener metaphorischer Parallelisierung beider zum Trotz - selbst ein zeitkritischer und gebietet einer vorschnellen Analogisierung von binärem Computer und Signaltransfer in neuronalen Systemen (McCulloch / Pitts) ebenso



Einhalt wie dem Vergleich mit dem elektronischen Analogcomputer (den John von Neumann in diesem Kontext alternativ einführt = John von Neumann, Allgemeine und logische Theorie der Automaten, in: Kursbuch 8 (März 1967), 139-175 (145); Impulsfolgen im neurologischen Hirn nicht regelmäßig: kein Takt also im Sinne des *clocking* im Computer, sondern vielmehr Rhythmus, resultierend in erheblichen Streuungen zwischen aufeinanderfolgenden Intervallen. "Jeder Nervenimpuls einer Faser führt <...> an der nachgeschalteten Nervenzelle, mit der sie in synaptischem Kontakt steht, zu einer postsynaptischen Potentialänderung. Diese dauert wesentlich länger als ein einzelnes Aktionspotential, das selbst nur eine 1/1000 sec lang ist. Das postsynaptische Potential dagegen beträgt 10 bis 20 msec. Während dieser Zeit fällt es gleichmäßig oder exponentiell auf den Ruhewert ab, wie die Entladung eines Kondensators über einen Widerstand. <...> Auf diese Weise integriert jede Nervenzelle die afferente Aktivität über die Zeit." = Otto Detlev Creutzfeldt, Bau- und Funktionsprinzipien des Gehirns und Vergleich mit Computermodell <sic>, in: Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften (Hg.), Hirnforschung und Psychiatrie, Berlin (Colloquium Verl.) 1971, 45-53 (46); erst ab einem bestimmten Schwellenwert des aufgeladenen Potentials signalisiert eine Nervenzelle weiter, daß sie durch afferente Fasern erregt worden ist; McCulloch / Pitts. "Diese nicht-lineare Aktivitätssummutation bedeutet einen wesentlichen Unterschied gegenüber digitalen Computersystemen, deren Operationen linear sind. Die Einführung der Schwelle andererseits, die es also ermöglicht, niederfrequentes Rauschen zu verwerfen, unterscheidet das Nervensystem von Analog-Computern, bei denen Signale ungeachtet ihrer Größe verarbeitet werden" = Creutzfeldt ebd.

- massive Parallelität der Kanäle (nämlich Nervenfasern) erzeugt im Hirn eine Gleichzeitigkeit in der Signalverarbeitung, die sich von der strikten Sequentialität der digitalen Datenverarbeitung (in der von-Neumann-Architektur des Computers) unterscheidet - weshalb auch die menschliche Bildverarbeitung alternativen Versionen des frühen Fernsehens (Arthur Korn) näher steht als dem finalen Kathodenstrahlbild

- entscheidend für Shannons Nachrichtentheorie der Kanal, über den die Signale laufen; die Speicheroption ist im Kanal implizit mit angelegt (meiner Interpretation nach stellt jede Leitung, jeder Kanal - den Shannon übrigens ausdrücklich als "the medium" bezeichnet - bereits eine zeiträumliche Verzögerung, also ein  $\Delta t$  dar, Laufzeit u. a., was eine Art dynamischer Zwischenspeicher ist, eine Verzögerung, wie sie wiederum für den Analogcomputer frei skalierbar ist - vom Repetiermodus für den Zweck der Oszilloskopie einmal ganz abgesehen). Für eine Mediendefinition, die den Kanal des Signalwegs zentral wählt, kommt also der Analogrechner infrage - fast sogar noch mehr als der digitale Computer, der als symbolverarbeitende Maschine ja alle anderen Medien zu simulieren vermag

- Aspekt des Analogcomputers, der ihn über seine rechentechnische Verwendung hinaus auch heute wieder umso mehr aus medienarchäologischer und erkenntnisorientierter Perspektive so

interessant macht: eine andere Form der mathematischen Modellierung von (physikalischer) Welt. Der Begriff der "Simulation" dynamischer Vorgänge (Sie nennen etwa die Einschwingzeit, und auf dem MEDA-Rechner im hiesigen Fundus haben wir eine gedämpfte Schwingung "programmiert") taucht in den frühen Schriften zum elektronischen Analogcomputer immer wieder auf - in einer Zeit, als Binärrechner noch viel zu viel Rechenzeit erforderten, als daß die Veränderung von Parametern in solchen Simulationen am Oszilloskop diagrammatische Darstellungen in "Echtzeit" erlaubt hätten. Auch der Einbau von analogrechnenden Reglern in tatsächliche Systeme stellt ein epistemisches Hybrid dar; hier wird die Modellierung der Welt gleichzeitig zum Teil derselben (systheoretisch gesprochen ein "re-entry" der Beobachtung). Und schließlich ist der Analogcomputer eine Art Chronopoeet, denn er bringt eigene Zeitwelten hervor (durch seine Fähigkeit, Zeitprozesse in der Simulation zu stauchen und zu dehnen)

Obgleich nun fast alle dieser Funktionen ihrerseits im Digitalcomputer implementiert werden können, bleibt die besondere Leistung des Analogrechners, daß er eine andere Art des mathematischen Denkens, eine andere Handhabung der Weltanalyse erlaubt hat, die nach wie vor in jeder Hinsicht modellbildend ist; Fachbegriff "modellbasierter Systementwurf"

- *online*-Artikel derStandard (Wien), "Rein mechanischer Steampunk-Rover soll der Venus-Hölle trotzen", 3. September 2017, über NASA-Konzept eines Landefahrzeugs, das rein ohne Elektronik auskommt; "haben sich Nasa-Wissenschaftler gedacht, es müsste eigentlich auch ohne Elektronik gehen: Die Techniker stellten nun das Konzept eines Venusrovers vor, der von außen einem frühen Panzer gleicht und über ein rein mechanisches Innenleben verfügt. Sowohl die Steuerung als auch die Datenübertragung basieren dabei auf Komponenten, für die analoge Uhrwerke und Rechner aus der Zeit vor der Erfindung des Mikrochips Pate gestanden haben"; der Automaton Rover for Extreme Environments (AREE) vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) der Nasa in Pasadena, Kalifornien, bezieht seine Energie von zentral gelagerten Windturbinen, die ein System aus Räderwerken und Hebeln antreiben. "Wie die mechanische Sammlung von Daten aussehen könnte, ließen die Ingenieure zwar offen, doch was die Kommunikation betrifft, haben sie eine Lösung gefunden, die ebenfalls ganz ohne Elektronik auskommt: Ein Bauteil, das von einer Venussonde per Radar aus dem Orbit erfasst werden kann, soll Daten mithilfe von Morsezeichen übermitteln - so ähnlich wie Schiffe, die über große Distanzen via Lichtsignale kommunizieren" = <http://mobil.derstandard.at/2000063362511/Rein-mechanischer-Steampunk-Rover-soll-der-Venus-Hoelle-trotzen>; Abruf 6. September 2017

## **Flugsimulation als Analogcomputing**

- Flugsimulator eine technologische Entwicklung der Luftfahrt im doppelten Sinne: einerseits zur Ausbildung von Piloten und andererseits zur Entwicklung von Flugzeugen; nicht auf Technikgeschichte reduzieren,

sondern den Flugsimulator als paradigmatische Konkretisierung eines medienepistemologischen Gegenstands: der Wesenswandel im Verständnis der "Simulation"; Begriff gehört zum Grundvokabular abendländischer Ontologie, heutzutage (allzu exklusiv) mit dem Digitalrechner verbunden

- Eskalation im medienepistemologisch prekären Hybrid von Analog- und Digitalcomputer liegt im zeitkritischen Feld (Echtzeit-Simulation und Zeitachsenmanipulation). Im Unterschied zum "inneren Scheinbild" (Heinrich Hertz) ist das analogtechnische Modell ein Nach- oder Mitvollzug der äußerlichen Wirklichkeit mit Mitteln der Physik selbst

- schiere Eskalation von Rechenleistung der Prozessoren läßt die digitale Simulation obsiegen

- über ein pragmatisches Instrument hinaus die Form der Simulation als "wissenstechnische Methode" (Masterarbeit HU Medienwissenschaft von Ines Liszko *Der Flugsimulator als Generator hybrider Wissensprozesse*); damit einher geht Verlagerung der multisensorischen Simulation hin zur "Aufheizung" (mit McLuhan) des visuellen Sinns durch virtuelles Display und Computer Generated Images (CGI)

- algorithmischer Weg und / oder partielle Differentialgleichungen

- Anton Hölzers "Erfindung" des Analogcomputers zur Simulation *und* Steuerung des A4 Raketenaggregats in Peenemünde zur Zeit des Zweiten Weltkriegs

- Episteme der Kybernetik: sowohl Wiener wie auch Shannon mit Pilot-Maschine-Kopplung als Systemverhalten befaßt; Traum vom Fliegen instrumentalisiert sich im wahrsten Sinne des Wortes in einem *Ensemble, in dem Mensch und Maschine eine Synthese bilden*

- Analogcomputer co-originär für Hydrodynamik *und* deren Simulation

## **Emulation oder Simulation?**

- Wolfgang Gilois Vorschlag, den Analogrechner als "Emulation" der zu modellierenden Prozesse zu definieren, der im Unterschied zur numerischen Abstraktion das reale Verhalten ("real" ganz Sinne der reellen Zahlen, also der stetigen, dynamischen Prozesse) des zu untersuchenden Systems nach- bzw. mitvollzieht, führt einen Gesichtspunkt ein, der in den Bemühen um eine epistemologische Wieder-Entdeckung des Analogcomputers mehr als hilfreich ist. Fraglich ist im Zusammenhang des Analogcomputers jedoch der Begriff der "Emulation", der eindeutig ein Kind des Digitalcomputerzeitalters und seiner Plattformwechsel ist

- "Ein Analogrechner bildet das Verhalten eines beliebigen dynamischen Systems, das durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben wird, dadurch nach, dass ein elektrisches Netzwerk (Widerstände,

Kondensatoren) hergestellt wird, so dass die Ladungszunahme in den Kondensatoren durch das gleiche Differentialgleichungssystem beschrieben wird, wie das nachzubildende System. Nach der Wikipedia-Definition ist dies eine Emulation (das elektrische Netzwerk verhält sich genau so, wie das nachzubildende System, das seinerseits physikalischer Natur (mechanisch, elektrisch, chemisch, usw.) oder auch nicht-physikalischer Natur sein kann. Ein Digitalrechner löst die Differentialgleichungen, die das Verhalten des interessierenden Systems beschreiben, nach einem numerischen Verfahren. Das zu lösende Differentialgleichungssystem ist somit das "abstract model" im Sinne der Wikipedia-Simulation. Die Frage ist hierbei natürlich, ob man sich der Wikipedia-Definition (die ich für sinnvoll halte) anschliessen will" = E-mail 13. November 2008 Wolfgang Giloi

- medientheoretische Ausdifferenzierung der Begriffe „Emulation“ und „Simulation“ - als zwei epistemologisch verschiedenen Weisen der Modellierung von Welt; damit auch die Differenz von Digital- und Analogcomputer hinreichend definieren?

- "An emulator duplicates (provides an emulation of) the functions of one system using a different system, so that the second system behaves like (and appears to be) the first system. This focus on exact reproduction of external behavior is in contrast to some other forms of computer simulation, which can concern an abstract model of the system being simulated" = <http://en.wikipedia.org/wiki/Emulator> (Stand: 2008); verhält es sich nicht genau umgekehrt?

## **Rhythmogramme und Analogrechnermusik**

- Verbrüderung von Analogcomputer und Musik- bzw. Bildsynthesizer, die aus medienarchäologischer Sicht Zwillinge sind, aber kaum als solche wahrgenommen

- Heinrich Heidersberger findet Physik-Buch von Felix Auerbach 1912, darin: Lissajous-Figuren (Überlagerungen zweier Sinus-Schwingungen, abhängig von Frequenz- und Phasenverhältnissen). Bis später Digitalrechner schnell genug prozessierten, um auf x- und y-Achse Lissajous-Figuren herzustellen

- "Luminogramme" von Peter Ketmann (Fadenpendel; daran befestigte Lampe / Langzeitbelichtung)

- Rhythmograph: vier gekoppelte Pendel (nicht interaktiv). Kopplung: Summation, Koeffizient <implizite Mathematik>; kippen / Drehen des Spiegels (Amplituden beeinflussen). Phasensteuerung (Mikroschalter verschieben). Auslösung durch modifizierte Fernmelde-Relais. Spiegelkasten. Mit Lichtpunkten Photoplatte belichtet. "Einmal auf den Fußboden getreten, und das ganze Gerät fängt an zu schwingen" (Benjamin H.). Herstellung 1955-1965. U. a. als Sendelogo für SWF

- 2006 Rhythmograph wieder zusammengesetzt. Ziel nicht neue Rhythmogramme, sondern Analyse der Bewegung
- Steuerung von U-Boot-Torpedos durch Analogrechner; Bauteile z. T. von Heidersberger erworben für Konstruktion Rhythmograph (Gewindestangen)
- Herbert W. Franke: Photographien vom Oszilloskop; Harmomograph (verschränkte Pendelbewegungen)
- Rhythmogramme keine Abstraktion, sondern indexikalischer > Beweis für die physikalischen Gesetze (Schwerkraft u. a.)
- Jean Concteau, Brief an H. 1962: angesichts der Rhythmogramme: seien Beweise dafür, daß der Zufall für Poeten nicht existiert (Hinweis Benjamin Heidersberger, Institut Heidersberger, Wolfsburg, Schloß)
- Benjamin H.: "cartesisch-digital"; selbstgebauter Analogrechner. u. a. mit Taktgenerator für bestimmte Laufeffekte. Multiplizierer. Summationsverstärker. Auch Experiment: anhören, wie das klingt (Wiederholrate); akustische Ereignisse aber nicht attraktiv; Einschubsystem; Videosynthesizer Abbe / Paik
- umschalten auf x/y-Ablenkung. Durch Taktfrequenzänderung Spirale "aufwickeln", bis hin zu 3-D-Effekten, Filter hinzufügen
- Heidersberger Vater: mechanisch. Sohn: elektronisch
- Hans Kulk: nicht mit einem Synthesizer rechnen, sondern elektronische Musik mit einem Analogcomputer erzeugen - vertauschte Rollen von Musiksynthesizer und Analogcomputer, um die Zwillingsnatur von Musik und Mathematik auf analogem Feld hörbar zu machen; ein Hybrid (analog/digital)
- Photographien von Oszilloskop mit Nachleuchtdauer; erzeugt durch Analogrechner
- vertraute Synthesizer-Schaltungen auf Analogcomputer nachgesteckt; koppelt Klanggeneratoren an Analogcomputer-Board
- "Resonator"-Schaltung (Oszillator oder Filter) spricht auf bestimmte Frequenzen an. Zusammengesetzt aus Integratoren, Inverter, Potentiometer. Alle Ausgänge anzapfbar; Schwingkreis
- Oszilloskop zusätzlich: z-Eingang (für Lichtstärke bzw. an/aus); damit wird Oszilloskop zur Graphik-Maschine; alles in Echtzeit regelbar
- Oszilloskop mit langer Nachleuchtdauer, "um Vergangenheit eines Signals anzuschauen" (Benjamin Heidersberger)
- Inspiration: x y, Practice of electronic music, darin Satz: Analogrechner =

## Analogcomputer

- Komposition / Oszillogramme "Neumen" (melodische Fragmente aufzeichnen): analog-computer to LF-oscilloscope, ARP 260, VHS recording, 2000
- Wiedergabe der auf Video aufgezeichneten Analogbilder / -töne, wenn von DVD auf Beamer, macht aus allem "digitale" Bilder
- Kompositon *scope* = "analog beeld et klaang"

## ANTIKYTHERA-MECHANISMUS

### **Beispiel: Mechanismus von Antikythera**

- Jahr 1900 Entdeckung eines antiken Zahnradgetriebes in einem Schiffswrack vor der griechischen Südküste; möglicherweise kurz nach 82 v. Chr. versank das Werk. Die teils bis zur Unkenntlichkeit deformierten Bestandteile wiesen zunächst die Grenzen der Analyse für Augen und Hände menschlicher Archäologen. Mit apparativer Hilfe der griechischen Atomenergiebehörde gelangen Peter de Solla Price 1971 Gamma-Radiographien des Mechanismus. Erst der aktive medienarchäologische Blick machte ihn durchschaubar. In späteren Untersuchungen entfaltete dann computergestützte 3D-Tomographie eine neue Lesbarkeit.
- *online*-Movies auf der Webseite des Nationalmuseums Athen
- medienarchäologischer Durchblick von Röntgenstrahlen verhalf Derek J. de Solla Price (Gears from the Greeks, 1974) zu seiner Deutung. Der Mechanismus diente nicht wie ein Astrolabium oder gar Planetarium der modellhaften Darstellung von Planetenstellungen, sondern das Räderwerk fungierte als Instrument zur multiplen kalendarisch-astronomischen Berechnung, vor allem dem Abgleich von Mond- und Sonnenjahreszyklus.
- "[A]n ancient 19-year cycle, linking Sun and Moon (called the Metonic Cycle, after the 4th Century BC astronomer Meton of Athens) is embodied in the gear trains" = Tony Freeth, The Antikythera Mechanism. Decoding an Ancient Greek Mystery, Katalog zur gleichnamigen Ausstellung im Whipple Museum of the History of Science der University of Cambridge, England, 2008, 6
- Momentum der Irritation bisheriger Technikgeschichte durch diesen Mechanismus. Erstaunen erregte der Fund, weil er aus der Zeit zu fallen schien: ein feinmechanisches Rechenggerät, wie es der Antike nicht zugetraut wurde und erst aus den Kunst- und Wunderkammern der Renaissance und des Barock vertraut, Anachronismus also; ist es gerade die (hier mechanisch und zugleich mit Symbolen markierte) mathematische Logik (gekoppelt an die Astronomie), welche zeitübergreifend wirkt

- "Der Fund des Mechanismus von Antikythera war insofern überraschend, als ein technisch so anspruchsvolles Gerät wie dieses und die in ihm enthaltene Technik und Herstellungsweise bisher aus Zeit der Antike nicht bekannt war" =

[http://de.wikipedia.org/wiki/Mechanismus\\_von\\_Antikythera](http://de.wikipedia.org/wiki/Mechanismus_von_Antikythera); Abruf 9. September 2014

- "Der Mechanismus von Antikythera stammt aus einer Zeit, aus der bisher die Existenz einer komplexen Zahnrad-Apparatur nicht nur nicht bekannt war, sondern aus einer Zeit, die man lange vor dem Beginn der technischen Entwicklung liegend hielt.[13] Die ursprünglich nur als philosophische Tätigkeit gedeutete griechische Wissenschaft hatte sich zwar auf die erfolgreich betriebenen Zweige Mathematik und Physik – hier vor allem die Astronomie – ausgedehnt, jedoch kaum „praktischen Nutzen“ zur Folge gehabt, wie man meinte. Mit dem hellenistischen Zeitalter, an dessen Ende der Mechanismus von Antikythera entstand, gingen die griechischen Wissenschaften zu Ende und für lange Zeit vergessen. Sie wären erst nach ihrer Wiederentdeckung (Renaissance) etwa 1.500 Jahre später in Apparate und Verfahren eingegangen und hätten erst jetzt die Kultur der Technik begründet. Eine kritische Meinung lautet hingegen, „... dass die Technologie des 18. Jahrhunderts in den hellenistischen Werken wurzelte, ...“.[3]" =

[http://de.wikipedia.org/wiki/Mechanismus\\_von\\_Antikythera](http://de.wikipedia.org/wiki/Mechanismus_von_Antikythera); Abruf 9. September 2014; Anm. 3 = Eine Schlussfolgerung lautet zum Beispiel: „... dass die Technologie des 18. Jahrhunderts in den hellenistischen Werken wurzelte, ...“. Vgl. Lucio Russo: Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt antiken Wissens. Springer, 2005, S. 156

- astronomisches Wissen nichts ursprünglich Griechisches; aus Babylon Tontafeln mit den astronomischen Werten überliefert. Die altgriechische Leistung liegt vielmehr in der Mechanisierung der Auswertung dieser Wertangaben und damit der Transformation von schlichten Listen (Archiv), die allein in menschlichen Köpfen zu sinnvollen Konfigurationen werden, in eine operative Berechenbarkeit (Maschine)

- verkörpert der Mechanismus von Antikythera jenseits der Berechnung von verzeichneten Meßwerten auch einen epistemologisch neuen Begriff von Rechenmedien als mechanischer Verwirklichung von bislang nur als Theorie formulierter Thesen zum Zweck der Vorhersage künftiger astronomischer Ereignisse. "These two revolutionary Greek ideas are embodied in the gears of the Antikythera Mechanism" <Freeth 2008: 18> - mithin ein implizites Wissen jener Art, die Heinz von Foerster auch an der Curta-Rechenmaschine definierte. Das antike Getriebe "<...> is the first known example where the predictions of a scientific theory are mechanized in a machine for predicting the future" = ibid.

- welche Erkenntnis stellt sich beim Erwerb eines rostigen, handlichen Wechselstromgenerators *anno* 1900 ein; nötige Kurbel fehlt, die aber läßt sich einem alten Edison-Phonographen entleihen. *Daß* dann nach 100 Jahren wieder Funken aus einem Gerät sprühen können, als sei keine Zeit vergangen, zeigt an, daß technische Medien ihre jeweils eigenen,

epochalen vielmehr denn evolutionären Zeitgesetze haben. Angesichts von Leibniz' Vierspezies-Rechenmaschine in ihrer techno-barocken Pracht stellt sich zum Einen die Frage, in welchem Verhältnis das mathematisch-mechanische Funktionale an ihr zur barocken Fassung (Diskurs, Ornament) steht. Quer zu diesen äußeren Merkmalen von Geschichte schreibt sich hier zum Anderen eine strikt mathematische Logik, vielmehr medienarchäologisch in anderem Rhythmus wirksam. Auf den zweiten Blick stellt sich angesichts dieser Rechenmaschine unverzüglich eine diffuse Wolke historischer Kontextassoziationen ein. An und in einem solchen Artefakt kristallisiert sich vergangene Denk- und Arbeitszeit; die schiere Geltung des Mechanismus aber lacht über seine Einhegung im Denkmodus der historischen Zeit. Eine Rechenmaschine (etwa die buchstäblich handliche Kurbelmaschine Marke *Curta*) speichert nicht etwa alle möglichen Tabellenwerte, sondern bringt sie durch die konkrete Operation jeweils wieder neu hervor. Und so stellt für Heinz von Foerster auch eine gedruckte Platine, also elektronische Leiterbahnen, ein diagrammatisches Gedächtnis von Verknüpfungen dar, das unter Strom operativ wird.<sup>34</sup>

- "anonymous history" (Siegfried Giedion) hier am Werk; kein Name eines Meisters kann dieser Maschine zugeordnet werden. Vermutungen deuten auf den Nachfolgerkreis um Archimedes in Syrakus, der laut textlicher Quellenüberlieferung solche Mechanismen verfaßt haben soll

- bislang ungeklärt, ob es sich tatsächlich um ein astronomisches Instrument handelte. Darauf deutet die Räderkonstruktion und die Anzahl der Zahnradzähne, deren feste Übersetzung medienarchäologisch zurückrechnen läßt, daß es sich hier um die Mechanisierung des Metonischen Zyklus handelte, in dem 19 Sonnenjahre 235 Mondmonaten entsprechen.<sup>35</sup> In der kinetischen Verzahnungslehre, die Archimedes in *Über die Konstruktion von Himmelsgloben* theoretisch behandelte, ist jene Mechanisierung von Mathematik angelegt, die später aus *computus* den Computer zu generieren vermag.

- Fig: Rekonstruktionsskizze des Antikythera-Getriebes, in: Whitrow 1991: 159

- tritt an die Stelle der modellhaften Rekonstruktion als Hardware (Price) konsequent die virtuelle Rekonstruktion des Räderwerks - als habe der antike Mechanismus seine Theoretisierung im Computer schon aufgerufen. Die universelle Turingmaschine vermag nicht nur jeden Mechanismus zu simulieren, sondern vor allem auch sich selbst als Computer zu emulieren.

---

34 "Ganz offensichtlich wird die Information im Rechner in struktureller Weise gespeichert": Heinz von Foerster, Gedächtnis ohne Aufzeichnung [Vortrag 1963], in: ders., Sicht und Einsicht. Versuche zu einer operativen Erkenntnistheorie, autorisierte dt. Fassung v. Wolfram K. Köck, Braunschweig / Wiesbaden (Vieweg) 1985, 133-172 (134); dort vorweg die Abbildung einer Platine.

35 Gerald J. Whitrow, Die Erfindung der Zeit, Hamburg (Junius) 1991, 158



Unter allen speziellen Turingmaschinen als Modellierung mathematischer Mechanismus ist hier die Rechenmaschine privilegiert.

- Zahl der 127 mechanischen Zacken enthüllte im Abgleich mit dem planetarischen Zyklus die Funktion des zentralen Rads. Dies stellt keine hermeneutische Argumentation dar, sondern folgt einer naturgegebenen Analogie, die auch über zwei Jahrtausende hinweg unmittelbar zuhanden ist und diese Rechenmaschine damit nicht - wie andere Objekte der vom kulturellen Kontext abhängigen Vergangenheit - der unwiederholbaren Historisierung und damit Distanzierung unterliegt.

- "Die Seinsart von Zeug, in der es sich von ihm selbst her offenbart, nennen wir die *Zuhandenheit*. <...> Das schärfste Nur-noch-*hinsehen* und das so und so beschaffene 'Aussehen' von Dingen vermag Zuhandenes nicht zu entdecken. Der nur 'theoretisch' hinsehende Blick auf Dinge entbehrt des Verstehens von Zuhandenheit. Der gebrauchend-hantierende Umgang ist aber nicht blind, er hat seine eigene Sichtart <...>. Der Umgang mit Zeug unterstellt sich der Verweisungsmannigfaltigkeit des 'Um-zu'" = Heidegger, *Sein und Zeit*, Ausgabe Tübingen 1993: 69

- Korrelation zwischen dem Mechanismus und der astronomischen Evidenz bedarf eines Interpretanten, mithin Forschung. Peter de Solla Price baute aufgrund seiner Deutung der antiken astronomischen Uhr auf der Basis eines Differentials ein funktionales Modell, der unverzüglich diskursmächtige Phantasien dieses Mechanismus' als antiken (Analog-)Computer in Gang setzte. Der Schock lag darin, das er die Entwicklungsfigur bisheriger Technik- und Kulturgeschichte wie ein elektrischer Kurzschluß zwischen distanzierten Zeiten unterließ und ein ganz anderer Funke übersprang; Bachofen im 19. Jahrhundert: "There is something about the walls of Rome that moves the inmost depths of man. When a metal plate is struck, the iron resounds and the echoing is stopped only by laying one's finger on it. In the same way, Rome moves the spirit that is in communication with antiquity ... all that was slumbering within him."<sup>36</sup> Die *classical tradition* liest sich hier als endloser Rückkopplungseffekt von Text und musealer Stätte, die in der Tat ihrerseits irreduzibel miteinander verstrickt sind. Die historiographische Applikation von Fachausdrücken aus der elektronischen Wissenschaft von den Schaltplänen soll hier nicht als attraktive Metaphorik, sondern als Konsequenz eines *close reading* der zitierten Texte verstanden werden, die selbst einen Hinweis darauf geben, daß es die Mediengeschichte ist, welche die Struktur von Gibbons Visionen von denen Bachofens trennt. Letzterer schreibt Klartext "There are two roads to every kind of knowledge, the longer, slower, more laborious one of intellectual combination, and the shorter one, the one we cover with the energy and speed of electricity - the road of the imagination when it is touched by the sight and the immediate contact of ancient remains and grasps the truth in a flash, without any intermediate steps."<sup>37</sup>

---

36 Zitiert nach Gossman, "Orpheus", 46f

37 Zitiert nach Gossman, "Orpheus", 49

"It is a bit frightening to know that just before the fall of their great civilization the ancient Greeks had come so close to our age, not only in their thought, but also in their scientific technology." <Derek de Solla Price, zitiert hier nach: Freeth 2008: 7> - die griechische Antike als unserer Gegenwart "nächste Ferne" (frei nach Christian Meier). So schließt sich an dieser Stelle die Lücke zwischen symbolischer Textüberlieferung und archäologischer Evidenz, die bislang die Altertumskunde bestimmte. Denn die Rechenmaschine ist die Hochzeit von Logik und Materie. In der Überlieferung altgriechischer Logik und Mathematik war die Maschine als Wissen schon angelegt, prädestiniert.

- Modellierbarkeit verkörpert einen gleichursprünglichen, nicht historisch distanzierten Nach- als Mitvollzug. "The Antikythera Mechanism has fundamental resonances for later scientific instruments" = Freeth 2008: 28  
- im Sinne einer Vorschleifspur, einer *Präsonanz*

"The machine rewrites the history of technology" <Mike Edmunds, zitiert in: Freeth 2008: 9>. Tatsächlich aber stellt sie ein nicht-historisches Verhältnis dar, vielmehr eine wissensarchäologische Lage in ihrer materiellen Verkörperung. Damit muß nicht nur Technikgeschichte neu geschrieben, sondern eine andere, archäographische Form solcher Zeitverhältnisse von in Maschinen verkörpertem Wissen entwickelt werden

- zwei Argumente des symbolischen Regimes, die den numerischen Computer definieren, im Antikythera-Mechanismus am Werk: einmal die verzahnten Räderwerke als operatives Rechnen (Hardware), dann die vielen abgekürzten Textfragmente und Buchstabenkombinationen zur Anleitung und Bezeichnung der diversen Unterfunktionen (Software) - ein operatives Alphabet (und damit eine technische Erweiterung der bislang triadisch gedeuteten Nutzung des altgriechischen Vokalalphabets für Schreiben, Rechnen und musikalische Notation).

- Karsakof 1832: mechanisierte Buchstaben = Ideenmaschine

- "The Antikythera Mechanism is a very rare original text" = Agamemnon Tselikas, zitiert in: Freeth 2008: 13

- Mechanismus in seiner archäologisch uneindeutigen Form erlaubt den zweiten Anlauf eines verbesserten Modells, ohne selbst ein anderer zu werden. Geborgen in den Eisenklumpen ist ein latentes Wissen, das der Explizierung harret. Price war auf zweidimensionale Röntgenaufnahmen angewiesen, dies formierte und begrenzte seine Deutung. Erst durch die Eskalation der 3D-Röntgenstrahlen-Computertomographie war eine Neudeutung möglich und nahegelegt

- gelang es dem Antikythera Mechanism Research Project, den funktionalen Sinn der 223 Zähne eines weiteren Rades zu enthüllen und jenseits der Hypothese des Differentials eine zugleich ergänzende und alternative Deutung vorzuschlagen: die Vorhersage von Sonnen- und Mondfinsternis (Saros-Zyklus). Ein interner Mechanismus konnte als Rechenwerk zur Datierung der sportlichen Olympiaden gedeutet werden

und erweiterte damit den Horizont des Mechanismus vom naturgegebenen zur kulturgegebenen Zyklik: "The new results of the Metonic Calendar and Ptolemy's Dial link the cycles of human institution with the celestial cycles embedded in the Mechanism's gearwork: a microcosm of the temporal harmonization of human and divine order in the Classical world" = Alexander Jones, zitiert in: Freeth 2008: 24; Mechanismus stellt dies Harmonie erst her

- Was dieses Instrument von der mechanischen Uhr der Neuzeit unterscheidet, die fehlende Hemmung

- Rolle des Mechanismus von Antikythera in der sogenannten *object-oriented ontology*; Entdeckung bereichert das Wissen nicht geschichtlich, sondern wissensarchäologisch. Dem *aus* und *über* antike Rechenmaschinen überlieferten Textwissen (etwa der Traktat des Archimedes über Himmelsgloben), das der editionswissenschaftlichen Kritik bedarf, weil es in der Überlieferung mehrfach symbolisch und narrativ gebrochen wurde, tritt nun die unmittelbare Präsenz eines operativen Gegenstands zur Seite oder gar gegenüber, das durch modellhaften Nachbau in Vollzug gesetzt werden will, um sein implizites Wissen als generatives Gedächtnis - im Sinne von Foersters über die Curta-Rechenmaschine - zu entbergen. "Yet much about the Mechanism still remains a mystery" <Freeth 2008: 28>. Ein gezacktes Rad in Fragment D "does not fit in our new model" = *ibid.*

### **A/historizitäten: Materiale Entropie versus symbolischer Kode**

- Fund des Mechanismus von Antikythera in archäologischer Hinsicht etwas, das schon halb der Entropie verfallen war, als korrodierte Eisenklumpen. Es gelang, diese Masse wieder in einzelne Zahnräder zu unterscheiden - doch nicht-invasiv: "Die korrodierten Zahnräder waren zu fest ineinander verbacken, um sie zerstörungsfrei auseinander zu nehmen. Immerhin konnte <der zunächst damit befaßte griechische Archäologe Spiridon> Stais Fragmente von Inschriften auf Skalenblättern entziffern, und er erkannte die Namen von Himmelskörpern und Tierkreiszeichen. offenbar handelte es sich um eine Art astronomischen Rechner."<sup>38</sup> Solche Inschriften stellen keine Textquelle im Sinne altphilologischer Quellenkunde dar, sondern operative Symbole. Die vier korrodierten Bronzefragmente sind nicht Quellen im Droysenschen Sinn, sondern Überreste. Sie sprechen nicht im semantischen Sinn zum aktuellen Leser, sondern werden in Hinblick auf Maschine und Astronomie dekodiert. Operative Schriften lassen sich als Maschine realisieren (Babbage, Karsakov); eine andere Philologie, die hier antreibt: die Liebe zum *logos* als symbolischer und materieller Mechanismus

- spalten sich hier entropische, zunächst undurchschaubare Zeit und symbolisch kodierte Information; offenbar ausgebesserte Stellen an den

---

<sup>38</sup>Tobias Hürter, Das Urwerk <sic>, in: Die Zeit Nr. 49 v. 30. November 2006, S. 39

Zahnradern weisen nicht nur auf die interne Entropie, sondern den tatsächlichen Gebrauch und damit die Historizität dieses Differentialgetriebes

- die tatsächlichen Friktionen eines Mechanismus (wie die allmähliche Verhakung von Blechen an Konrad Zuses Z1 - auch im Nachbau), welche das Veto der wirklichen Zeit, das Veto der physikalischen Welt gegenüber einem idealisierten Reich zeitinvarianter logischer Maschinen darstellt. Damit wird das fortwährende Drama des "Computers" ursprünglich eröffnet: eine Aushandlung zwischen logisch-mathematischer Operationen (Software) und ihre Implementierung in einer widerständigen realen physikalischen Welt (Hardware)

- stillgestellte Zeit - das *Pompeji premise*, eine kinematographische Situation. Das Artefakt datiert sich selbst: "Weil die beweglichen Skalen seit dem antiken Schiffsunglück in ihrer letzten Stellung festsaßen, konnte Stais den Fund sogar datieren, auf das Jahr 80 vor Christus", wie es durch unterwasserarchäologische Münzfunde aus demgleichen Wrack später bestätigt wurde = Hürter 2006: 39

### **Der Mechanismus von Antikythera als Analogcomputer**

- Mechanismus, der offenbar der Vorausberechnung astronomischer Verhältnisse galt und - jenseits der pythagoreischen Harmonielehre - auch nichtharmonische Epizyklen faßte, wurde (vor-)schnell als antiker Computer bezeichnet. Wahr daran ist, daß er einen Analogcomputer darstellt. Die Stärke dieses *special purpose* astronomischen Rechners besteht darin, gerade auch die Unregelmäßigkeiten in der Mondumlaufbahn berechnen zu können

- Während Projektionsplanetarium medienästhetisch astronomisches Wissen durch Bewegungszeit, Visualisierung und Räumlichkeit (re-)präsentieren soll, wird es von Mechanismen wie dem von Antikythera vielmehr medienarchäologisch *errechnet* und abgelesen; er stellt also ein funktionales Planetarium dar; Analogcomputer ist einem Planetarium als Projektionsmechanismus implizit, während er im Mechanismus von Antikythera explizit ist

- Astrolab: Nachempfinden von Planetenbahnen im Kleinen (Mikrokosmos); "Mechanismus von Antikythera" recht eigentlich ein Analogrechner; Schweizer Uhr mit Kreisrechenwerk "Chronomat"

### **Medien als aktive Archäologen solcher Artefakte**

- "Price erreichte, dass der Mechanismus 1972 an seinem Aufbewahrungsort, dem Archäologischen Nationalmuseum in Athen, mit Röntgen- und Gammastrahlen untersucht wurde, um die Zahnradgetriebe im Inneren erkennen und beurteilen zu können. Obwohl mit dieser Aufnahmemethode nicht unterschieden werden konnte, welches der

mehrfach übereinander liegenden Zahnräder vorn beziehungsweise hinten angeordnet ist, gelang Price eine erste Rekonstruktion der Anzeigen"; Fig. 33: Sectional diagram of complete gearing system, in: Derek de Solla Price: Gears from the Greeks. The Antikythera Mechanism. A Calendar Computer from ca. 80 B. C., Science History Publications 1975, 43

- Nachvollzug durch operative Modellierung, funktionstüchtiger Nachbau: eine archäologische Methode, kein *reenactment* im Sinne von Collingwood als mentale Operation des nachvollziehenden Menschen, sondern als Eigenlogik der apparativen Welt, *Eigenwelt der Apparatwelt* (Videokatalog Dunn): siehe object-oriented ontology; Heideggers Zuhandenheit. Die Antike kommuniziert mit uns auch durch ihr verdinglichtes Wissen

- medienarchäologische Forschungsmethode negentropisch im Sinne der (erst kinematographisch wieder vertrauten) Zeitumkehr:

- liegt die eigentliche Gebrauchsanweisung implizit im Gerät selbst angelegt, so etwa in der schieren Zahn-Zahl 223 eines der Getrieberäder. Dies entspricht exakt der Zahl der Lunarmonate zwischen zwei Mond- oder Sonnenfinsternissen im sogenannten Saros-Zyklus. Eine Anachröologie des Wissens tut sich hier auf. "Deshalb bleibt den Forschern nur Reverse Engineering, wie es Technologiefirmen mit den Produkten der Konkurrenz machen. Sie müssen die Konstruktionsarbeit der antiken Ingenieure rückwärts nachvollziehen, vom fertigen Räderwerk bis zum Konzept dahinter" = Hürter 2006: 40

## Das Differential

- "Mechanismus von Antikythera" recht eigentlich ein Analogrechner. Die antike pythagoreische *epistémé* (sonisch experimentiert am Monochord) sucht die Verbindung von Natur und Mechanik im gemeinsamen Nenner einer beiden zugrundeliegenden Mathematik. Was dieses Artefakt mit den Planetarien der Moderne nicht im Sinne einer technikhistorischen Vorläuferschaft, sondern strukturell verbindet ist sein Mechanismus als (impliziter) Analogcomputer; analoges Meßgerät und analytisches Rechnen fallen hier zusammen. Das kontinuierliche Zahnradgetriebe (gleich dem Rechenschieber) "rechnet" nicht im Sinne numerischer Mathematik, sondern setzt Zahlen ins Verhältnis, rechnet mit Verhältnissen. Der Mechanismus, der im Projektionsplanetarium der optischen Darstellung astronomischer Konfigurationen dient, ist ein implizites mathematisches Getriebe, ein Differential.

Im technischen Begriff des Planeten(rad)getriebes als spezieller Ausformulierung eines kompakten Zahnradgetriebes wird es jenseits aller astronomischen Zweckorientierung manifest.

- kinematisches Räderwerk eines sogenannten Planetengetriebes; Zeit verzweigt sich hier als Differentialgetriebe = <http://de.wikipedia.org/wiki/Planetengetriebe>, Zugriff 23. August 2010; zeitigt ebenso die leichte Bewegung des Drehknopfs eines Kurzwellen-

Radios sofortige Veränderungen, nämlich Senderwechsel; die Apparatur als solche aber ist grundsätzlich angelegt auf den Empfang breitester Bänder. Eine besondere Rolle spielt die Mechanik von klassischen Planetenradgetrieben seit der Antike wie der Mechanismus von Antikythera (als Modell rekonstruiert ausgestellt etwa im Deutschen Museum München) in Form von Astrolabien als Ikonen der Invarianz zyklischer Zeitprozesse: Newtonsche Zeit im Unterschied zu der in Norbert Wieners *Kybernetik* definierten „Bergsonsche“ Zeit thermodynamischer Vorgänge - Wolkenzeit. "Die Newton'sche Mechanik betrachtet <...> die Vorgänge in der Natur, insofern den Körpern <...> eine feste Masse und ein zu jedem Zeitpunkt bestimmter Ort in einem Raum euklidischer Metrik zugeschrieben werden kann."<sup>39</sup> Diese Metrik entspricht dem Koordinatensystem chronologischer Geschichtszeit. Demgegenüber formuliert die Quantenphysik ein anderes, nicht-historisches Zeitmodell

- Astrolabium dient dem Nachempfinden von Planetenbahnen im Kleinen (Mikrokosmos), erlaubt aber nicht deren modellhafte Zeitachsenmanipulation; im Umkehrschluß: Natur selbst nach dem Modell der astronomischen Maschine und Uhr zu konzipieren, wie es in Vitruvs *De architectura* zum Ausdruck kommt. Hebel und Rad sind *natura* als *machinata* = Vortrag Giovanni Di Pasquale, "Vitruvius' Image of the Universe: Architecture and Mechanism", Tagung *Vitruvianismus. Ursprünge und Transformationen*, Berlin (Humboldt-Universität / Pergamonmuseum) 14. / 15. Juli 2011

- Chronomechanismus von Antikythera selbst ein Anachronismus, weil er die lineare, evolutionäre Modellierung techno-logischer Zeit als Technikhistoriographie untertunnelt. Der Eisenklumpen, der vor gut einhundert Jahren aus dem Meer vor der Insel Antikythera geborgen wurde, ist in seiner offensichtlichen Korrosion unerbittlich der physikalischen Entropie unterworfen. Andererseits erlaubt es die Modellierung als logische Anordnung, die Bestandteile zu separieren und zu rekonfigurieren. Im logisch-Symbolischen ist eine Invarianz gegenüber den historischen Kontingenzen am Werk, eine andere Gegenwärtigkeit, welche einen gleichursprünglichen Nachvollzug des antiken Geräts erlaubt.

- antike Computer im Unterschied und in Allianz zu klassischen archäologischen Objekten; unterliegen wie die letzteren als Hardware dem "Zahn der Zeit", der physikalischen Entropie, und sind somit in der vertrauten "historischen" Zeit. Beispiel Cimerman / ZKM: Schimmel aus den alten Kondensatoren. Andererseits ist ihrer operativen Diagrammatik, also der gelöteten Schaltung, die Zeitlosigkeit der Logik eingeschrieben oder gar eingebraunt, was es ermöglicht, dieses Wissen auch heute wieder zu verhandeln, neu zu verhandeln, klug zu mißbrauchen, umzunutzen - all das, was gemeinhin unter "Retro-computing" firmiert

- ist der kulturgeschichtlichen "Antike" (im Sinne Walter Benjamin) die Antike der Gegenwart beiseitegestellt, die "Jetztvergangenheit" des digitalen Zeitalters - ein Begriff, der zugleich andeutet, daß diese

---

39Werner Heisenberg, *Ordnung der Wirklichkeit*, München 1989, 61

Vergangenheit nicht historisiert, sondern in der Gegenwart gleichsam "aufgehoben" ist wie frühere Prozessoren in heutigen Mikrochip-Architekturen; programmatischer Einblick in die Prähistorie heutiger Computertechnik; diese Von der Antike des Digitalcomputers nicht durch Jahrtausende getrennt; diese Antike ist nicht einmal *historisiert*, sondern aktuell. Anders als antike Statuen nämlich wollen *vintage computer* in Vollzug gesetzt werden. Sie als Objekt anzuschauen erschließt nicht ihr Wesen, sondern allein ihre operative Archäologie

- medienarchäologischer Akzent liegt von daher auf *computing*, nicht schlicht dem "Computer", "auf der Lauffähigkeit der Systeme, die auf diese Weise die Computergeschichte real erfahrbar machen" = Stefan Höltgen, Vintage Computing Festival Berlin

- "Das Muster aller Vorgänge im Sonnensystem bildete die Umdrehung eines Rades oder einer Reihe von Rädern, entweder in Form der Ptolemäischen Epizykeltheorie oder der Kopernikanischen Bahntheorie, und in jeder dieser Theorien wird die Vergangenheit in der Zukunft gesetzmäßig wiederholt. Die Sphärenmusik ist ein Palindrom, und das Buch der Astronomie liest sich in gleicher Weise vorwärts wie rückwärts. <...> Wenn wir also die Planeten filmen würden, um ein wahrnehmbares Bild ihrer Bewegung zu zeigen, und den Film rückwärts ablaufen ließen, so ergäbe sich noch, übereinstimmend mit der Newtonschen / Mechanik, ein mögliches Bild der Planeten. Wenn wir dagegen die Turbulenz der Wolken in einem Gewitter filmen und den Film rückwärts ablaufen ließen, erschiene er gänzlich verkehrt. Wo wir Aufwinde erwarteten, würden die Abwinde sehen, die Turbulenz würde an Intensität abnehmen, das Blitzen ginge den Veränderungen der Wolke, die ihm gewöhnlich vorausgehen, voran" = Norbert Wiener, *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*, übers. v. E. H. Serr, Reinbek b. Hamburg (Rowohlt) 1968, 54 f.; Wiener akzentuiert dies als Erkenntnismodell, Unterschieds zwischen Planetenumlaufbahnen ("Kosmos") und Wolken; Zeitästhetik als die Differenz zwischen Newtonscher (absoluter) und Bergonscher (subjektiver) Zeit. Für Astronomie in ihrer überschaubaren Abzählbarkeit (von Planeten) gilt die klassische Newtonsche, also reversible (Räderuhr-)Zeit, die folglich auch mechanisch (der Antikythera-Mechanismus) modellierbar war; demgegenüber "enthält das meteorologische System eine ungeheure Zahl annähernd gleicher Partikeln, von denen einige sehr eng miteinander gekoppelt sind" <55> - dem Magnetband ebenso nahe wie der Brownschen Molekularbewegung eines in einem Gas oder einer Flüssigkeit durch die thermische Stöße bewegten Teilchens, jene Familie von Zeitreihen, für die eine eigene statistische Zeitlichkeit entwickelt wurde (Ergodensatz, nicht-lineare Vorhersage). Auf dem Spiel steht hier das Modell einer reversiblen (Newton) und einer irreversiblen (Gibbs) Zeit, der zugleich der von Physik und Biologie (Bergson) ist. "So lebt der moderne Automat in der gleichen Bergsonschen Zeit wie der lebende Organismus" <Wiener 1948/1968: 68>, in thermodynamischer, sprich: entropischer Zeit

- "Weder der griechische <sc. Heron> noch magische <sc. Rabbi Löw> Automat liegen auf den Hauptentwicklungslinien der modernen Maschine

<...>. Ganz anders ist es mit dem Uhrwerkautomaten" = Wiener 1948/1968: 64; erst mit dem Aufkommen der Räderuhr mit Hemmung wird die abendländische Kultur sensibel für Schwingungen anstelle von starren Proportionen

- für epistemologischen Unterschied zwischen Planetengetriebe und Wolken stehen Vitruv (Symmetrie) und Lukrez (Wolken, Begehren)

- seit der Scholastik (und im Grunde schon mit dem antiken Zackenradwerkbetrieb des "Mechanismus von Antikythera" als Astrolab) das Universum mechanistisch als Uhrwerk modelliert; tritt dementsprechend heute ein Schwingungsmodell: *Der Klang der Superstrings* Buchtitel von Frank Grotelüschen, München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 3. Aufl. 2001

- Platon (*alias* Sokrates) an Glaukon): Mathematiker und Geometriker behandelten Kreis und Linie wie gegeben; sie reden aber gar nicht über die tatsächliche Linie, sondern die dahinter gedachte. In diesem Sinne auch Aristoteles: "Das ist nicht wahr, dass es die Geometrie mit sichtbaren und vergänglichen Größen zu tun hat. Denn dann ginge sie ja zugrunde, wenn diese zugrunde gehen. <...> von den sichtbaren Linien ist keine so gerade oder so gebogen, wie sie sich der Mathematiker denkt. <...> und die mathematischen Punkte haben durchaus nicht dieselbe Natur wie die sichtbaren Gestirne"; Parameter der Richtigkeit ist hier ganz offensichtlich die Tatsächlichkeit des medientechnischen Vollzugs, nicht die historisch relative Deutung; anders als das "Vetorecht" (Koselleck) historischer Quellen liegt hier das Korrektiv im nicht-menschlichen Bereich

- hat der Apparat zuweilen das bessere Wissen als seine technische Beschreibung im Patent. "Es gibt eine technische Praxis, innerhalb derer sich die *Thermionic Tube* wie eine Diode verwenden lässt" <Kassung ebd.>, auch wenn im Text davon keine Rede ist. Technologische Praxis macht etwas nicht auf der symbolischen Ebene lesbar, sondern artikuliert Aussagen nach eigenem Recht. Symbolische Darstellung und gegenständlicher Vollzug fallen auseinander. Lässt sich jene "höchst eigenwillige Temporalität des Wissens" <Kassung a.a.O.: 164> am Plausibelsten in der diskursiven Form der sogenannten Wissensgeschichte fassen, die im Anschluß an Bruno Latour inzwischen Konjunktur hat?<sup>40</sup> Im Unterschied zur Wissensarchäologie betont sie - wie schon die Technikgeschichte bislang - den im Rahmen von Geschichtsforschung vertrauten historischen Kontext, die "kulturelle Praxis eben auch das Apparativen und Technischen" <Kassung a.a.O., 164>. Tatsächlich wird jede erfinderische Idee "in ein weites Möglichkeitsfeld technisch-ökonomischer Realisierung hineingeboren" = Klaus Mauersberger, Technische Neuerungen am Schnittpunkt von Physik und praktischer

---

40Bruno Latour, *Die Hoffnung der Pandora. Untersuchungen zur Wirklichkeit der Wissenschaft*, Frankfurt/M. (Suhrkamp) 2002, bes. Kap. 5 ("Die Geschichtlichkeit der Dinge"), 175-210) sowie Kap. 6 ("Ein Kollektiv von menschlichen und nicht-menschlichen Wesen"), 211-264



Mechanik - ein Beitrag zu vergessenen Erfindungen, in: Dresdener Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften, Heft 20 (1992), 29-39; liegt dieser Schnittpunkt in medienarchäologischer Perspektivverschiebung vielmehr zwischen physikalischer Mechanik und kulturhistorischem Kontext; ist epistemogen ein anderes, ahistorisches Gestell mit am Werk, nämlich die Fügung aller Realisierung in ein technisch-mathematisches Apriori. Nur in den Grenzen, welche Materie und mathematische Logik den Techniken unvordenklich setzen, sind dieselben diskursiv konstruierbar. Der historische Index erlärte den spezifischen Zeitpunkt einer Erfindung respektive deren Diskurswerden

- hinterfragt Mauersberger "zu früh gekommene" Erfindungen und Mehrfacherfindungen, für die etwa Leonardos Skizze des Fahrrads mit Transmissionskette ebenso steht wie der antike Mechanismus von Antikythera: "Wie und auf welche Weise konnte dies oder jene Idee nur so frühzeitig in die Welt treten?" = Mauersberger 1992: 29; medienarchäologischer Index benennt die unabdingbaren und invarianten Voraussetzungen dessen, was als Denkbare dann kulturwirksam werden kann. Diese historisch-ahistorische Doppelbindung läßt sich als temporales Gefüge formulieren: Einmal sind die Dinge in die historische Zeit gestellt, zum Anderen aber gehören sie Zeitweisen an, die - in Anlehnung an einen Begriff Latours - *non-human chrono-agencies* darstellen

- was heutige mathematische Wahrnehmung und Rechenmaschinen mit dem antiken Mechanismus von Antikythera verbindet: keine direkte historische Wissensüberlieferung, sondern ein non-historischer Kurzschluß, der im impliziten Wissen solcher techno-mathematischen Konfigurationen selbst liegt

- gerät im technischen *close reading* die Frage in den Blick, ob es sich bei solch naheliegenden Erscheinungen wie dem antiken Antikythera-Mechanismus und den neuzeitlichen Astrolabien um Transfer von Kulturtechniken handelt oder um die Ko-Emergenz logisch konsequent verwandter Artefakte in unabhängigen Epochen Kultursystemen. So wäre es "ein Fehler anzunehmen, daß jede Entwicklung nur einen Ursprung habe. Wir können die Möglichkeit nicht ausschließen, daß es vollkommen unabhängige, parallele Linien des Denkens gibt, die in weit voneinander getrennten Teilen der Welt auftreten".<sup>41</sup> Dies gilt nicht minder für voneinander getrennte Zeiten im Abendland selbst; dafür steht ein medienarchäologisches Artefakt *par excellence*, der antike Mechanismus aus einem Schiffswrack vor Antikythera. Was in der Rekonstruktion aus einem zunächst korrodierten Eisenklumpen zutage trat, war ein hochkomplexer Rädermechanismus zur astronomischen Kalkulation. Nichts Vergleichbares ist aus Antike (und seither bis in die frühe Neuzeit) bekannt - ein medienarchäologischer Anachronismus, die singuläre Protention eines Analogcomputers als medienepistemologisches Monument. "The machine is an aberration; it seems out of place in the manual technology of the ancient world" = David Bolter, *Turing's Man. Western Culture in*

---

<sup>41</sup> Joseph Needham, *Wissenschaft und Zivilisation in China*, Frankfurt/M. (Suhrkamp) 1984, 80

the Computer Age, Chapel Hill (The University of North Carolina Press) 1984, 21. Siehe Derek J. de Solla Price, An Ancient Greek Computer, in: Scientific American, Juni 1959, 62.

Tatsächlich deutet sich hier eine Erkenntnis an, die sich der konformen Mediengeschichte entzieht: eine Eigenzeit der apparativen Welt, ein Gewußtwerdenwollen technologischer Konfigurationen, das über die kulturhistorischen Zeiten hinweg wiederholt an die menschliche Neugierde appelliert, um nahezu gleichursprünglich ge- und erfunden zu werden. Hinsichtlich seiner operativen Gegenwärtigkeit unterscheidet sich ein kulturhistorisches oder klassisch-archäologisches Artefakt von einem technisch-medialen Ding. Eine Räderuhr mit Hemmwerk aus dem 14. Jahrhundert spricht die Zeitlichkeit selbst an. Wenn sie, wie am Beispiel der Astrologischen Uhr von St. Marien in Rostock, heute immer noch tickt, und dies prinzipiell nach dem alten Mechanismus, dann ist hier, allem historischen Kontextverlust zum Trotz, eine Unvergangenheit in Funktion. Im Moment ihres Funktionierens ist eine spätmittelalterliche Räderuhr heute in einer unhistorischen Seinsweise und stellt damit eine spezifische Form von Anachronismus dar. Wird eine solche Uhr nicht erst im Sinne der neuen Rahmung im Museum, sondern selbst schon vor Ort museal, durch das pure Vergehen "historischer" Zeit? Diese tickende Uhr stellt ein empirisch-transzendentes Artefakt dar: Ihre Operativität liest sich als etwas anderes, als es die historische Rahmung meint. Für technikhistorische Museen stellt sich diese Frage sehr konkret: operative Präsentation des technischen Altertums oder aus konservatorischer Rücksicht das Primat ihrer Unberührbarkeit, damit auch Unrepariertheit des Artefakts? Gewiß kann ein historisches Medienartefakt nicht auf Dauer in operativer Präsenz erhalten werden, doch ergibt sich durch systematische Aufzeichnung seiner Operativität die Möglichkeit, die wesentliche, genuin mediale Information in der symbolischen Form kinematographischer Diagrammatik auf Dauer zu stellen. Wie anachronistisch also ist eine funktionierende Räderuhr in der Gegenwart?

- gibt es Medien und gab es sie als reale Artefakte, als Gegenstände der Kultur, die z. T. materiell (als Museum) als sie selbst überliefert sind - wie etwa jene Zahnräder aus dem antiken Wrack, gefunden vor der menschenleeren Insel Antikythera in der Ägäis, von denen bis heute nicht klar ist, ob sie die Ur-Form eines astronomischen Computers oder schlicht eine Uhr darstellen. Erst der tatsächliche Nachbau der verkrusteten Eisenklumpen dieses submarinen Fundes ermöglichte eine Entfesselung ihrer Deutung (ausgestellt im Deutschen Museum, München)

## **Planetarische Zeit (und jenseits)**

- hat Norbert Wiener Zeit als Naturgeschehen auf zwei Niveaus angesiedelt: Planetenumlaufbahnen einerseits - das mechanische Modell der getakteten Uhrzeit - und die mikrothermischen, stochastischen Prozesse von Molekülen in Wolken. Planetenbahnen im Sinne der Keplerschen Gesetzen lassen sich - wie vermutlich im antiken Mechanismus von Antikythera angelegt und von Huyghens 1682 nachgewiesen - durch ein mechanisches Getriebe (als Analogcomputer,

der Kettenbruchrechnung mit ineinandergreifenden Zahnrädern durchführt) nicht nur simulieren, sondern auch in ihrer zeitlichen Richtung umkehren - Zeitachsenmanipulation als das Kriterium, welches die Simulation vom tatsächlichen Sternenhimmel unterscheidet. Das Zeiss-Planetarium von Jena ermöglichte über ein Zählwerk jeden beliebigen Zeitpunkt der Sternzeit auf Abruf als Konstellation einzustellen, invariant gegenüber dem Zeitpfeil der Boltzmann-Entropie. So kommentiert Max Wolf nach einem Besuch die ahistorische Zeitweise dieses Planetariums: "Weiter aber spielt 'Zeit' bei ihm im Gegensatz zur Natur keine Rolle. Der Himmel ist sozusagen dem Experiment zugänglich gemacht, und man braucht nicht auf die Vorgänge zu warten" = Max Wolf in der Neuen Mannheimer Zeitung v. 18. April 1927, zitiert nach: Das Zeiss-Planetarium, Jena 1930, 3, von: Joachim Krause, Architektur aus dem Geist der Projektion. Das Zeiss-Planetarium, in: Wissen in Bewegung. 80 Jahre Zeiss-Planetarium Jena, hrsg. v. de. Ernst-Abbe-Stiftung (Konzeption / Redaktion: Hans-Christain von Herrmann), Jena 2006, 51-78 (59); Gegenstück zu dieser Zeit ist die Unwahrscheinlichkeit meteorologischer Prozesse

- "Wenn immer man die Zeit zur Bewegung in Beziehung gesetzt, das heißt sie als Maß der Bewegung definiert hat, fanden sich zwei Aspekte der Zeit, beide Chronozeichen: einmal die Zeit als Ganzes, als großer Kreis oder Spirale, die die Gesamtheit der Bewegung im Universum aufnimmt; dann die Zeit als Intervall, das die kleinste Bewegungs- oder Aktionseinheit bezeichnet<sup>42</sup> - die Ebene des Zeitkritischen. Epochen und Intervalle werden auf kleinste Momente zusammengestaucht, zusammengepreßt wie verdichtete Materie in Schwarzen Löchern. Schon die Räderuhr brach im Grunde mit der kulturtechnischen Anbindung an natürliche Zeitläufe: "Eine Uhr <...> liefert nicht einfach die Abbildung irgendwelcher natürlicher Bewegungen, der Planeten, Gezeiten, biologischer Rhythmen z.B. Umgekehrt: sie bildet ein Modell - von modus, Maß, modello, kleines Maß -, eine Form, einen Entwurf, über den es überhaupt erst möglich wird, ein Ereignis zu fixieren, es nicht einfach hereinbrechen oder vorbeirauschen zu lassen" = Peter Gendolla, Zwischenzeiten. Zur Kultur und Technik der Zeit in der Moderne, in: Zwischen-Bilanz. Eine Festschrift zum 60. Geburtstag von Joachim Paech, Abschnitt II: "Der Zeitsinn", *online* [www.uni-konstanz.de/paech2002](http://www.uni-konstanz.de/paech2002)

- Planetenzeit (die "Ephemeriden" als der Umlauf der Erde um die Sonne) stellt also nur eines unter vielen Phänomenen von Zeit dar. Angeregt durch seine astronomischen Beobachtungen, verwandte Huyghens viel Mühe auf, um die Zeitmessung zu verbessern, vor allem zum Zweck der unabhängigen Zeit- als Positionsbestimmung auf See. Erst das Dazwischentreten der Quarzuhr aber (er)löst kulturtechnische Zeitbegriffe von der unmittelbaren Bindung an Astronomie und Theologie des "Kosmos" - ein letztendliches Medienwerden und die Autonomisierung einer Zeit, die aus der *physis* selbst entnommen wird. Die Loslösung der Zeit vom astronomischen Maßstab der natürlichen Zeit zeitigte ihrerseits einen epistemologischen Bruch: Kultur setzt sich eine eigene Zeitbasis, genuine Medienzeit. Mit der Cäsium-Atomuhr aber kehrt die *physis* wieder in die Zeit zurück, insofern hier ein Energiepotential mit Zeit verrechnet wird. Das (bundesgesetzlich gültige) Zeitnormal wird dabei von einer Quarzuhrengruppe hergestellt und deren Frequenz mit der des Cäsium-Atomresonators abgeglichen - eine naturzeitliche Referenz, heute noch

---

42 Gilles Deleuze Das Bewegungs-Bild. Kino 1, Frankfurt/M. (Suhrkamp) 2. Aufl. 1990, 52

Überboten von Pulsaren als Schwingungsreferenz; zugleich das *re-entry*  
"astronomischer Zeit" zweiter Ordnung