

PRINZIP ANALOGRECHNER

Prinzip Analogrechner (nach von Neumann)

Die aktuelle Transformation der Computerarchitektur (jenseits der strikten Serialität der Symbolverarbeitung in der von-Neumann-Architektur) resonniert mit Aspekten dessen, was (erst nach dem Siegeszug des Digitalcomputers überhaupt) "Analog"rechnen hieß: der Trend zur Parallelverarbeitung. Seitdem scheinen alle Signalflüsse auf binäre Datenverarbeitung abbildbar zu sein.

Analogcomputer sind - im Gegensatz zur universellen Turing-Maschine - als Spezialrechner stark. In Analogcomputern ist jede mathematische Operation durch eine eigenständige technische Einheit realisiert - als physikalische Verkörperung eines mathematischen Verhältnisses (implizite, d. h. nicht-symbolisch formulierte Mathematik). Dies war die Möglichkeitsbedingung für Parallelverarbeitung (so wie Fernsehbildübertragung alternativ auch einmal in parallelen Kanälen für jeden Bildpunkt gedacht war), mithin die Lösung von Echtzeitproblemen.

„Man kann eine Rechenmaschine auf dem Prinzip aufbauen, Zahlen durch bestimmte physikalische Größen darzustellen. Als solche Größen können wir z. B. die Stärke eines elektrischen Stromes, die Höhe eines elektrischen Potentials oder die Anzahl der Bogengrade verwenden, um die eine Scheibe gedreht wird (evtl. in Verbindung mit der Anzahl der vollen Umdrehungen der Scheibe) etc. Man kann dann Operationen wie Addition, Multiplikation und Integration so ausführen, daß man verschiedene natürliche Prozesse findet, die diese Größen in der gewünschten Weise steuern. Ströme mag man multiplizieren, indem man sie den beiden Magneten eines Dynamometers zuführt, wodurch man eine Drehung erzeugt. Diese Drehung kann dann durch Verknüpfung mit einem Regulierwiderstand in einen elektrischen Widerstand umgewandelt werden; und schließlich kann man den Widerstand in einen Strom umwandeln, indem man ihn an zwei Quellen festen (aber verschiedenen) Potentials schaltet. Das ganze Aggregat wird so zu einem »schwarzen Kasten«, dem man zwei Ströme zuführt und der einen Strom erzeugt, der gleich dem Produkt der beiden Ströme ist.“¹

[Also kann man auch mit einer Waschmaschinentrommel, angetrieben durch den Transmissionsriemen eines an das Wechselstromnetz angeschlossenen Elektromotors, rechnen.]

„Die kritische Frage jedes Analogverfahrens ist also diese: Wie groß sind die unkontrollierbaren Schwankungen des Mechanismus, die das »Rauschen« ergeben, im Verhältnis zu den signifikanten »Signalen«, die die Zahlen ausdrücken, mit denen der Rechner arbeitet? Die Brauchbarkeit jedes Analogverfahrens hängt davon ab, wie niedrig der »Rauschpegel«, also die relative Stärke der unkontrollierbaren Schwankungen, gehalten werden kann. Es gibt, anders gesagt, keinen Analogrechner, der wirklich das Produkt zweier Zahlen bildet. Er bildet vielmehr das Produkt plus einer kleinen, aber unbekanntem Größe, welche das »weiße Rauschen« (random noise)

¹ John von Neumann, Allgemeine und logische Theorie der Automaten, in: Kursbuch 8 (1967); Nachdruck von »The General and Logical Theory of Automata«, veröffentlicht 1951 in einem Symposium der Hixon Foundation »Celebration Mechanisms in Behavior« Druck: John Wiley&Sons, New York)

repräsentiert, das vom Mechanismus und den beteiligten physikalischen Prozessen herrührt“ <ebd.>.

Die kybernetische Epistemologie des Analogrechners (OP)

Es fällt sofort ins Auge, daß den von Helmar Frank 1964 herausgegebenen Band *Kybernetische Maschinen* das Photo eines klassischen Analogcomputers zierte. Die Frage nach der Aktualität des Analogcomputers ist eng mit dem kybernetischen Denken verknüpft. In den Beiträgen wird das Analoge (als das "Nicht-Digitale") gleichberechtigt neben dem numerischen Rechner behandelt. Im Rahmen der Medienarchäologie ist es von größtem methodischen Interesse, an diese Gleichrangigkeit beider techno-mathematischen Zugangsweisen im Diskurs der Kybernetik zu erinnern.

Es ist ein Kernanliegen der medienarchäologischen Wissens, das Erbe der Kybernetik nicht schlicht wissenschaftsgeschichtliche zu historisieren, sondern in seiner medienarchäologischen Aktualität weiterzuführen; in dem Zusammenhang soll der Analogcomputer kein Zwischenspiel der Rechengeschichte sein, sondern als alternative Form der mathematischen Modellierung re-aktualisiert werden.

Die Anfänge der Kybernetik sind mit dem Kernelement des Analogrechners, dem Operationserstärker, im Konstrukt des Feedback wesentlich verknüpft. Durch Rückkopplung wird ein Output dem Eingang als Input wieder zugeführt (und sei es unter verkehrten Vorzeichen zum Ausgleich). Norbert Wiener hat dieses Element als den entscheidenden Schritt des elektronischen Analogrechners über die Elektromechanik von Vannevar Bushs Differential Analyzer hinaus definiert. Ziel war "to gear it to the high speed of electrical circuits instead of to the much lower one of mechanical shafts and integrators"².

In (Elektro-)Physik implementierte Mathematik ist - anders als die rein symbolische Notation - anfällig für die Eigentümlichkeiten und Eigenzeiten eben jener Physik. Die jeweils zur Realisierung mathematischer Funktionen verfügbaren Einheiten - etwa die Integratoren - müssen im Analogcomputer "so verkoppelt werden können, wie man sie als mathematische Operationen benötigte. Während es innerhalb der Mathematik dabei gar keine Probleme gibt, mußten ja die technischen Rechengrößen - es waren im Regelfall Spannungen oder besser Spannungsverläufe - verkoppelt werden. Und beim Zuführen von Spannungen zu einem Gerät gelten die physikalisch-technischen Grundgesetze - bekannt nach Kirchhoff als Maschensatz und Knotensatz. Diese erzeugen sogenannte Rückwirkungen, die so klein gehalten werden müssen, daß sie im mathematischen Sinne vernachlässigbar sind. Das war möglich unter Verwendung der elektronische Verstärkertechnik"³ - im damaligen Fall (Helmut Hoelzer) zunächst Elektronenröhren.

2 Norbert Wiener, *I am a Mathematician. The Later Life of a Prodigy*, Doubleday, Garden City, New York 1956, 190 (zitiert in: Masani 1990, 168 f.)

3 Gunter Schwarze (seinerzeit Professor für Systemanalyse an der Humboldt-Universität zu Berlin) in seiner Rede zur Enthüllung einer Gedenktafel für Dr.-Ing. Helmut Hoelzer auf der Halbinsel Peenemünde (Typoskript Berlin, den 25. Oktober 1995)

Die Zukunft liegt im Hybrid: Analogcomputing und Neurobiologie

Der Analogcomputer weist nicht zurück, sondern voraus. Von Interesse ist hier Hava T. Siegelmanns Buch *Neural Networks and Analog Computing - Beyond the Turing Limit*.

John von Neumann höchstselbst kritisierte ein neurologisches Modell, das biologische Funktionen auf binäre Gatter und Operationen (im Sinne von McCulloch / Pitts) reduziert; vielmehr handelt es sich um analog/digital-Hybride.

Spiegelneuronen vollziehen eine "constant mental simulation of perceived action" (Rolf Inge Godoy) - und damit genau das, was Modellierung am Analogcomputer bedeutet.

"Für die Zukunft wird <...> ein verstärkter Einsatz von hybriden Computersystemen für biologisch-medizinische Zwecke prognostiziert (Gilois <sic> 1970). Einer der Gründe dafür mag sein, daß die Natur, die den besten aller existierenden Computer, das menschliche Gehirn, hervorgebracht hat, selbst eine hybride Form der Datenverarbeitung benutzt."⁴

In der Lesart John von Neumanns ist das Gehirn des Menschen als zugleich mit Anteilen des Digital- und des Analogcomputers ausgestattet. Sein notorische Beitrag zum Thema computer/brain stellt auch aus heutiger Sicht noch einen wesentlichen Referenztext dar, weil er den Unterschied von numerischer und neuronaler Signalverarbeitung zum Einen im zeitkritischen Bereich aufdeckt und zweitens das menschliche Gehirn als das beschreibt, was in der Medienarchäologie der "Hybridcomputer" ist, also die Kombination aus Analog- und Digitalcomputer, wobei die Stärken beider Systeme gegen ihre gegenseitigen Schwäche ausgespielt werden - etwa durch den beliebig hinter alle Kommatellen präzisen, aber rechenzeitaufwändigen Digitalcomputer die begrenzte Genauigkeit analogrechnerischer Ergebnisse, die dafür aber unverzüglich geliefert werden können.

Analogcomputer und -synthesizer: Ein anderes Verhältnis von Musik & Mathematik

Im elektroakustischen Synthesizer entbirgt sich der Kehrwert der Zeitlichkeit des Tons: seine mathematischen Bemessung als Frequenz (die aristotelische Definition von Zeit als Maßzahl einer Bewegung zwischen dem Früheren und Späteren). Es war diese mathematische Ästhetik, mit der Karlheinz Stockhausen seine ersten elektronischen Kompositionen unternahm: entweder als Addition von reinen Sinustönen zu stationären Klängen, oder aber auch subtraktiv durch Zerlegung des weißen Rauschens in farbiges Rauschen unter Anlegung von Filtern.⁵ Die medienarchäologische Ästhetik früher elektronischer

4 Wolfgang A. Knorre, *Analogcomputer in Biologie und Medizin*, Jena (VEB Gustav Fischer) 1971, 25

5 Karlheinz Stockhausen, *Elektronische Studien I und II (1953/54)*, in: ders., *Texte zu eigenen Werken, zur Kunst Anderer, Aktuelles*, hg. v. Dieter Schnebel, Köln (DuMont Schauberg) 1964, 22

Musik tritt das Erbe der Helmholtzschen *Lehre von den Tonempfindungen* (1863) an.

Der Dokumentarfilm *Die vergangene Zukunft des Klangs* erinnert an Oskar Sala; analog sollte ein Film über Analogcomputer „die vergangene Zukunft des Computers“ behandeln. Tatsächlich teilt der Analogcomputer mit dem Synthesizer nicht nur die konkrete Elektronik, sondern auch deren operative (eher affektive denn kognitive) Handhabung.

Die Sprache der Musikelektronik ist durchwirkt von in- und expliziter Mathematik. So definiert sich etwa der Ringmodulator als Modul in Synthesizern als Mischgerät zweier beliebiger Klangquellen (im einfachsten Falle Sinustöne), die entweder addiert oder subtrahiert werden und damit eine Frequenzverschiebung vornehmen.⁶ Das Ohr vernimmt am Ende Rechenergebnisse. "Der R. ist ein Spannungsmultiplizierer" <ebd., 264> und damit ein Analogcomputer.

Der modulare Synthesizer beruht auf der "komplexe<n> Verdrahtung unterschiedlichster spannungskontrollierter Module, die sich wechselseitig beeinflussen"⁷. Trennt oder verbindet das Algorithmische Analogcomputer und Analogsynthesizer?

"Eine solche individuelle Urverdrahtung, der Entwurf eines Netzwerks mit genauer Festlegung des Signalflusses und der Signalgrößen, ist gewissermaßen der Algorithmus, um eine Komposition automatisch zu generieren. Mit dem Terminus Algorithmus werden meist Computerprogramme und somit Digitaltechnik assoziiert. Doch so wie das Arbeiten mit einem Rechenschieber ein analoges algorithmisches Rechnen ist, wurden bereits 1930 analoge Computer gebaut, deren Rechenschritte und Ergebnisse auf unterschiedlichen Spannungspotentialen basieren."⁸

Der Analogcomputer als Synthesizer

Was bedeutet es in medienepistemologischer Hinsicht, wenn die gleiche elektrotechnische Schaltung einmal zu „rechnen“ vermag, und (alternativ) Töne, mithin Musik generiert (der Operationsverstärker und der Oszillator im Analogcomputer und im Synthesizer)? Eine Gleichursprünglichkeit von Zahl und Musik in der Schwingung, oder eine Gleichursprünglichkeit von Schwingung und Mathematik in der Zahl?

[Martin Heidegger bezeichnet das „Mitsein“ und das „In-der-Welt-Sein“ als „gleichursprünglicher“ Seinscharakter des Daseins.⁹]

Das ehemalige Siemens-Studio für elektronische Musik (jetzt positioniert im Deutsches Museum, München) erzeugt u. a. ein Frequenzvibrato durch

⁶ Bernd Enders, *Lexikon Musikelektronik*, 3. Aufl. Mainz (Schott) 1997, 263f

⁷ Martin Supper, Gibt es kybernetische Musik? Das Beispiel Roland Kayn und Peter Vogel, in: Esselborn (Hg.), 2009, 200-204 (202)

⁸ Supper 2009: 202, unter Bezug auf das CEMS System (Coordinated Electronic Music Studio, realisiert durch Robert Moog an der State University of New York, Albany, 1969)

⁹ Martin Heidegger, Prolegomena zur Geschichte des Zeitbegriffs (Marburger Vorlesung SS 1925) = GA Bd. 20, Frankfurt/M. (Vittorio Klostermann) 3. Aufl. 1994, 328

Multiplikation des Tones – ein implizites Rechnen, ohne Zahlen verarbeiten zu wollen. Tatsächlich, Synthesizer "can <...> be viewed as a form of analog computer; their technology was originally based on electronic analog computer technology."¹⁰

Die tatsächliche Erfahrung mit dem Maxi-Moog ist Gold im Sinne von Hardware wert, weil sie in dieser materiellen, geradezu elektrotechnischen Form nicht durch eine der vielen Software-Emulationen von Synthesizern ersetzbar ist.

War das Keyboard ein allzugroßes Zugeständnis an die Musiker und hat mithin den Charakter der Stellknöpfe freier Parameter nicht eher vermischt? Synthesizer-Töne sind wirkliche Meßtöne, und das Interface (keyboard) vernebelt dies. Herr Steinke, der in Berlin-Adlershof im ehemaligen DDR-Studio für experimentelle Musik in den 70er Jahren das „Subharchord“ baute, erzählt immer wieder gerne, daß es die Komponisten waren, die auf einer nachträglichen Ergänzung des keyboards beharrten.

Der Radioempfänger als impliziter Analogrechner (Wadley Loop)

Es gibt eine Vielzahl unbeabsichtigter, impliziter Formen von Analogrechnung, etwa die spezielle Kurzwellenradio-Schaltung, der Wadley Loop als Alternative zum Überlagerungsempfänger, entwickelt von Trevor Wadley in den 1940er Jahren zunächst zu Zwecken der Frequenz*messung*. Sie dient der Vermeidung jener Drift, die (meßtechnisch) die allmähliche Verschiebung eines Meßgeräts um seinen Nullpunkt meint, was besonders im Hochfrequenzbereich gravierend wird:

In a traditional superheterodyne radio receiver, most oscillator drift and instability occurs in the first frequency converter stage, because it is tunable and operating at a high frequency. <...> Unlike drift-reducing techniques (such as crystal control or frequency synthesis), the Wadley Loop does not attempt to stabilize the oscillator. Instead, it cancels the drift mathematically.¹¹

Das System operiert also als quasi-Analogrechner. Dies geschieht durch folgenden Operation:

- (1) combining the first oscillator with the received signal in a frequency mixer to translate it to an intermediate frequency that is above the receiver's tuning range,
- (2) mixing the same oscillator with a comb of harmonics from a crystal scillator <ebd.>

Es handelt sich mithin um Rundfunk im mathematischen Fließgleichgewicht.

Implizite Mathematik: Modellhaft rechnen

Mathematik wird durch Rechenmaschinen radikal verzeitlicht; ihr operativer Vollzug wird nicht mehr allein durch Menschen in Kopplung an Papier und Bleistift, sondern durch die Apparatur selbst geleistet.

¹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Analog_computer (Stand 29. April 2007)

¹¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Wadley_Lop; Zugriff August 2008

"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* <italics W. E.> gewinnt, nämlich durch die Messung des Zustandes oder des zeitlichen Ablaufes der physikalischen Größen des aufgebauten Systems."¹²

In der analogtechnischen Maschinerie aber "wird <...> gar nicht im eigentlichen Sinne 'gerechnet', sondern die Lösung durch Aufbauen eines Analogons, eines Modells erzeugt."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."¹⁴

Ein erfahrener Anwender von Analogrechnern "ist oftmals bereits vor der Analogrechnung in der Lage, qualitative Aussagen über das Verhalten des Modells zu machen"¹⁵ - ein Triumph der intuitiven, modellierenden, diagrammatisch-kognitiven Mathematik.

Bleibt das "symbol grounding"-Problem: Wie gelingt es dem Digitalcomputer, das Symbolischem im Realen zu implementieren? Indem dabei die Eigenwilligkeit der wirklichen Welt elektronischer Bauteile in Kauf genommen wird. Jedes binäre Signal verrät an seiner Flanke, daß es (im Sinne Fouriers) die Superposition harmonischer Schwingungen ist. So erscheint das Digitale als Extremwert des Analoges.¹⁶

Diagramm versus Algebra?

"Ikonisch" im Sinne der Visualisierung einer Abstraktion, stellt ein Diagramm nicht die physikalisch-geometrischen Eigenschaften eines Objekts dar, sondern seine strukturellen und relationalen Eigenschaften. Damit ist der Analogcomputer eine diagrammatische Maschine.

Eine logische Schlußfolgerung läßt sich dermaßen modellieren; Charles S. Peirce erklärt den Syllogismus als eine Form von *diagrammatic reasoning*: "<...> deduction consists in constructing an icon or diagram the relations of whose parts shall present a complete analogy with those of the parts of the object of reasoning, of exercising upon this image in the imagination, and of observing the result so as to discover unnoticed and hidden relations among

12 E. Kettel, Übersicht über die Technik der elektronischen Analogrechner, in: Telefunken-Zeitung Jg. 30 (Juni 1957) Heft 116, 129-135 (129)

13 Wolfgang Giloi / R. Herschel, Rechenanleitung für Analogrechner, hg. v. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft AEG-Telefunken, Fachbereich Anlagen Informationstechnik, Konstanz o. J., 12f

14 Wolfgang Giloi / R. Herschel, Rechenanleitung für Analogrechner, hg. v. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft AEG-Telefunken, Fachbereich Anlagen Informationstechnik, Konstanz o. J., 12f (13)

15 Achim Sydow, Elektronisches Analogrechnen, 3., neuverfaßte Aufl. Berlin (VEB Verl. Technik) 1971, 10

16 Dazu Bernhard Siebert, Passage des Digitalen; ferner Wendy Hui Kyong Chun, Programmed vision. Software and Memory, Cambridge, Mass. / London (MIT Press) 2011, 143-152

the parts."¹⁷ Dieser (mentale) Vollzugscharakter korreliert mit der Eigenschaft eines operativen Mediums; sobald der Betrachter ein Diagramm erfaßt, wird der dargestellte Prozeß in ihm kognitiv in Funktion versetzt.¹⁸

Es gibt zwei Weisen, diagrammatisch Mathematik zu treiben: einmal algebraisch (Formeln), einmal elektrotechnisch (Schaltpläne). Aufgrund eines Schaltplans kann eine Analogcomputer-Anordnung (etwa gedämpfte Schwingung) erzeugt werden; der Schaltplan selbst ist die mathematische "Formel". Ganz anders der Digitalrechner: Ihm werden algebraische Formeln eingegeben. In beiden (isomorphen) Fällen bleibt die eigentliche "mathematische" Operation opak.

Die Analogie beim "Analogrechner" - der besser Analogierechner hieße - wird über eine gemeinsame mathematische Analyse zweier Systeme mit Hilfe einer Differentialgleichung hergestellt - oder ist sie naturweltlich im Sinne von Pythagoras' These "Die Welt ist Zahl" gegeben (die Frage der *mimesis*)?

Heinrich Hertz beschreibt das *me/diagrammatical reasoning*: "Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Übereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserem Geiste."¹⁹

Eine implizit mathematische Medienphysik

Der Analogrechner simuliert nicht nur dynamische Vorgänge; er simuliert Mathematik selbst. Alternativ zum Rechnen mit Zahlen (Digitalcomputer) rechnet der Analogcomputer etwa mit Kurven als Funktionsgebern (per Kathodenstrahlröhre). Ein anderes Rechnen: Gleichungssysteme werden gesteckt; dann werden jeweils Parameterwerte an Drehknöpfen geändert.

Die Grundlage des Analogcomputers ist der Akt der Messung; dagegen basiert der Digitalcomputer auf Numerik.

Die Methode der direkten Analogie stellt eine Form impliziter Mathematik dar; demgegenüber geschieht die indirekte Analogie durch einen Dreischritt: erst die Analyse des Phänomens in mathematischen Begriffen, die dann äquivalent etwa durch elektronische Bauteile realisiert werden.²⁰

17 Charles Sanders Peirce, *On the Algebra of Logic. A Contribution to the Philosophy of Notation* [*1885], in: *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Bd. III (C.P. 3.359–3.403), Cambridge, Mass. (Harvard University Press) 1933/1961, 182

18 Dazu Michael May, *Diagrammatic reasoning and levels of schematization*, *online xxx*

19 Heinrich Hertz, <Mechanik>, zitiert nach: Rüdiger Inhetveen, *Bilder und Zeichen in der Mathematik*, in: Peter Bernhard / Volker Peckhaus (Hg.), *Methodisches Denken im Kontext. Festschrift für Christian Thiel*, Paderborn (mentis) 2008, 404–424 (404)

20 Siehe Small 2001: 30 f.

Ingenieure bevorzugen die intuitive Modellierung eines Systems (stetige Quantitäten), im Unterschied zur mathematischen Analyse (numerische Ergebnisse).²¹ Physikalische Wahrheit trifft auf mathematische Folgerichtigkeit.

Mit Unschärfe rechnen

Analogrechnen gewährt dem Stochastischen und Kontingenten Raum <Small 2001: 237>; dem gegenüber steht die digitale Präzision. Der Digitalcomputer erlaubt die exakte Reproduktion des Rechenvorgangs, während sie beim Analogcomputer (bedingt durch Unschärfen durch Drift u. a.) variiert <Small 2001: 258>.

John von Neumann beurteilt das Wesen von Analogrechnern aus der Perspektive der mathematischen Theorie der Kommunikation, nämlich den Störpegelabstand (*signal-to-noise ratio*); daraus resultiert „die kritische Frage jedes Analogverfahrens“ <ebd.>:

"Wie groß sind die unkontrollierbaren Schwankungen des Mechanismus, die das "Rauschen" ergeben, im Verhältnis zu den signifikanten "Signalen", die die Zahlen ausdrücken, mit denen der Rechner arbeitet? <...> Es gibt <...> keinen Analogrechner, der wirklich das Produkt zweier Zahlen bildet. Er bildet vielmehr das Produkt plus einer kleinen, aber unbekannt GröÙe, welche das "weiÙe Rauschen" (random noise) repräsentiert, das vom Mechanismus und den beteiligten physikalischen Prozessen herrührt"²²

- und damit die Welthaftigkeit des Analogrechners (eine Welt der Signale) begründet, der gegenüber alle Digitalrechnung symbol- und modellhaft bleibt.

21 Siehe Small 2011: 236 f. u. 251

22 John von Neumann, Allgemeine und logische Theorie der Automaten, in: Kursbuch 8 (März 1967), 139-175 (145)