

Gedankengeschichte der Analogrechengenräte

Daniel Blum, Till Bovermann

Ausarbeitung des Vortrags vom 11. Mai 2001

1 Begriffsbildung

Neben digitalen von-Neumann Rechnern existieren in der Geschichte der Informatik auch andere Arten von Rechnern. Dieses Skript beschäftigt sich vornehmlich mit der Entwicklung von sogenannten *analogen Rechenmaschinen*. Eine Definition derselben findet sich in [6]:

Analogrechner
(*Analogierechenmaschine, Analogierechenautomat*):
moderne Rechenanlage, die auf der Grundlage des Analogieprinzips arbeitet.[...]

Analogie wird an selber Stelle so beschrieben:

Analogie:
Beziehung zwischen zwei [...] Prozessen, Systemen, die auf gewissen übereinstimmungen in funktioneller oder struktureller Hinsicht beruht.
[...]

Nachfolgend werden wir uns mit der Gedankengeschichte dieser Lösungsmethode auseinandersetzen, also uns nicht nur auf die “modernen” Maschinen konzentrieren, sondern uns auch mit älteren Geräten vertraut machen.

2 Funktionsweise Analog

Wie in vorigem Abschnitt angedeutet wird für ein ungelöstes Problem ein analoges Modell gesucht, mit dem dann die Lösungserarbeitung einfacher ist, bzw. automatisch geschieht. Meistens wird dabei auf ein physikalisches Modell zurückgegriffen. Es wird ein Versuch durchgeführt, in dem die Eingangsvariablen als physikalische Größen verwendet werden. Das Meßergebnis wird dann wieder in das ursprüngliche Modell rücktransformiert, und repräsentiert somit die Lösung des Problems. Im Allgemeinen sieht ein Lösungsweg also so aus (vgl. auch Abbildung 1):

mechanisch	Getriebe, Zahnrad
elektromechanisch	Drehmelder, Relais
elektronisch	Röhren, Transistoren, integrierte Schaltkreise
optisch	optische Bank, Fotozelle
pneumatisch	Venturi-Drossel, Düse-Prallplatte
hydraulisch	Doppelkolbenschieber

Tabelle 1: Hilfsmittel zum Rechnen und Modellieren

1. Repräsentation der Eingangsvariablen in phys. Größen
2. Finden von Analogien in physikalischen Gesetzen
3. phys. Versuch mit Eingangsvariablen ausführen
4. Messen der Ausgangsgröße ¹
5. übertragen der Ausgangsgröße in mathematischen Wert

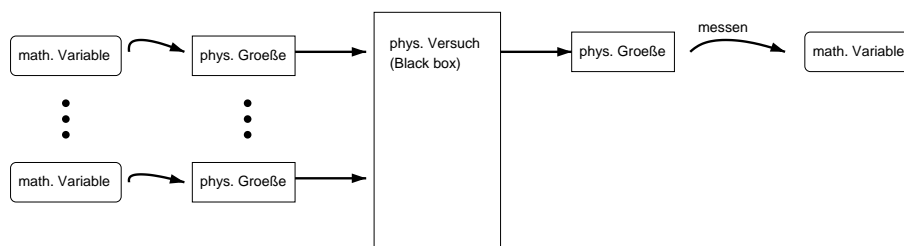


Abbildung 1: Schema eines Analogverfahrens

3 Prinzipien

Um ein geeignetes Modell für das zu lösende Problem zu finden, bietet sich ein modulares Vorgehen an. Indem man gut untersuchte physikalische Phänomene so hintereinander schaltet, daß sie ein

Hierbei kann versucht werden die Grundrechenarten als physikalische Module so genau wie möglich nachzubilden, aber auch komplexere Funktionen, wie z. B. das Integral, oder trigonometrische Funktionen sind denkbar (vgl. 1).

Nachfolgend sind einige Beispiele für solche Module beschrieben.

3.1 Addition

Eine geeignete Repräsentation für die Addition ist leicht gefunden; man denke hier nur an Strecken, die aneinandergelegt die Summe der durch sie repräsentierten Summanden bilden. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau zweier unterschiedlicher Module mit mechanischen Mitteln.

¹Messungen und Einstellungen sind immer approximativ!

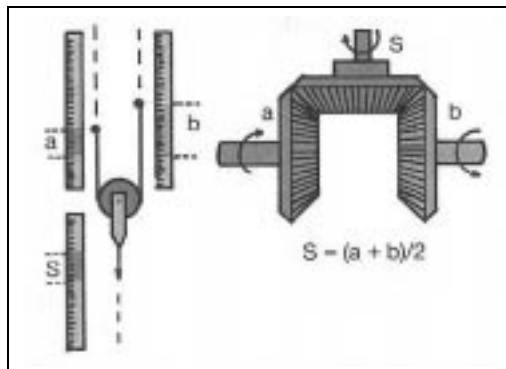


Abbildung 2: Addition (nach [1])

3.2 Multiplikation

Im Jahr 1620 bohrte Edmund Gunter in logarithmischen Abständen Löcher in ein Messingplättchen, um dann mit einem Zirkel durch Abtragen zweier Längen eine Multiplikation durchführen zu können. Der Logarithmus wurde von John Napier (1550-1617) erfunden, um komplizierte Berechnungen mit großen Zahlen einfacher durchführen zu können. Folgendes Gesetz bildet die Multiplikation auf die Addition ab:

$$\log(a * b) = \log(a) + \log(b), a, b \in \mathfrak{R}$$

Im weiteren Verlauf der Geschichte ist aus dem Messingplättchen dann nach und nach der Rechenschieber entstanden, welcher bis in die 1970er Jahre noch rege Verwendung fand (vgl. Tabelle 2), und heute in Kalifornien wieder als Notbehelf bei Stromausfall dient (siehe hierzu [13]).

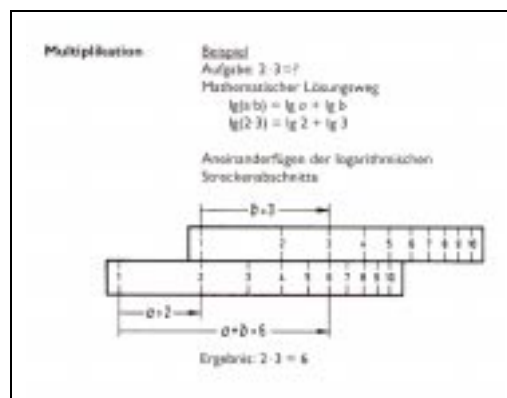


Abbildung 3: Multiplikation mit Hilfe eines Rechenschiebers (nach [2])

1620	logarithmische Skala in einem Messingplättchen von Gunter
1622	erster beweglicher Rechenschieber von W. Oughtred
1657	Rechenstab mit beweglicher Zunge

Tabelle 2: Entwicklung des Rechenschiebers

3.3 Integration

3.3.1 Planimeter

Reibrad gesteuerte Mechanismen dienen seit Anfang des 18. Jahrhunderts zur Bestimmung von Kurvenlängen. Sie wurden weiterentwickelt zu den sogenannten Planimetern, mit deren Hilfe Flächen durch Umfahren bestimmt werden konnten. Hierbei kam schon ein einfacher Datenspeicher in Form von Zeigern und Zahnrädern zum Einsatz, der die einzelnen Teilflächen der umfahrenen Fläche aufsummierte. Erwähnt sei hierbei Jacob Amsler, der 1856 das Polarplanimeter entwickelte, das aus einem festen Teil, der durch ein Gewicht fixiert wurde, und weiterhin aus einem beweglichem Arm, mit dem die Fläche umfahren wurde, bestand, und das in ähnlicher Art und Weise noch heute eingesetzt wird, z. B. zur Flächenbestimmung mittels einer Karte.

3.4 Gezeitenrechner

1876 baute William Thomson (später Lord Kelvin) einen Gezeitenrechner, der die Pegelstände der Themse berechnete. Dabei wurden Mond, Sonne, Erdrotation, und einige weitere Parameter berücksichtigt. Hier wurde der Analogrechner zur beschleunigten Berechnung von Vorgängen in der Natur eingesetzt. Mechanische Getriebe dienten als Integratoren, die über Seilrollengetriebe miteinander gekoppelt wurden.

3.5 Analog vs. Digital

Der Unterschied zwischen analoger und digitaler Repräsentation der Werte liegt darin, dass es bei der digitalen Darstellung nur endlich viele diskrete Werte gibt, während bei der analogen Darstellung prinzipiell jeder Wert angenommen werden kann, und somit theoretisch eine beliebig exakte Darstellung möglich ist. In der Praxis ist jedoch die Genauigkeit des analogen Rechnens auf etwa 10^{-3} begrenzt, da Messungenauigkeiten eine größere Genauigkeit nicht zulassen.

4 Analogrechner — eine Zeitleiste

Nach Aufkommen der Rechenschieber und Planimeter herrschte erst einmal Ruhe um die Entwicklung weiterer Verfahren, bis um den ersten Weltkrieg herum die ersten Überlegungen zu einer besseren Berechnung von Flugbahnen von militärischen Objekten gemacht wurden. Wie so häufig waren militärische Überlegungen ausschlaggebend für die weitere Entwicklung. Doch zunächst noch einige Beispiele aus der Antike.

4.1 Frühe Analogrechenmaschinen

4.1.1 Antikythera

Das älteste bekannte Beispiel eines Analogrechners geht auf die Griechen zurück. Der sogenannte Antikythera-Mechanismus war eine Art analoger astronomischer Rechner, der etwa um 80-90 v.Chr. gebaut wurde. Er stellt vermutlich eine Einzelleistung dar, da keine ähnlichen Fundstücke oder Aufzeichnung einer Technik in dieser Richtung bekannt sind. Der Antikythera-Rechner wurde auf einem Wrack gefunden, das um 75 v. Chr. vor der Insel Antikythera sank, und welches 1901 von Tauchern entdeckt wurde. Seine Leistung besteht darin, dass er Sonnen und Mondstand berechnen, sowie die Stellung der den Griechen bekannten Planeten (Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn) anzeigen konnte. Realisiert wurde dies über ein komplexes mechanisches Getriebe aus 39 Teilen. Der maximale Fehler lag bei 13,5 Prozent.

4.1.2 Wegemesser

Auf Heron von Alexandria geht ein Wegemesser aus dem 1. Jahrhundert n. Chr. zurück, der zum Messen größerer Entfernungen geeignet war. Vom Aussehen ähnelte er einer Schubkarre, wobei das Rad über Zahnräder eine Platte drehte, auf der sich Holzstifte befanden, die dann durch die Drehung und einen Abnehmer in einen Sammelbehälter gestoßen wurden. Die Zahl der gefallen Stifte war dann proportional zum Weg, abhängig von der Übersetzung. Man kann dieses Gerät als den ersten Analog-Digital-Wandler betrachten. Die analoge Eingangsgröße Raddrehung wird in den digitalen Wert der Stiftanzahl umgewandelt.

4.2 Mechanische Analogrechner

Wie schon angedeutet waren um die Jahrhundertwende militärische Zwecke bzw. Problemstellungen maßgebend für die weitere Entwicklung von Maschinen zur automatischen (meist numerischen) Lösung von mathematischen oder physikalischen Problemen. So war die Forschung von Vannevar Bush am MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) nicht zuletzt auch von der Hoffnung auf schnelle Lösung von Geschossbahngleichungen hin gerichtet. In Folge dessen wurden von 1927 – 1931 am MIT verschiedene mechanische Analogrechner entwickelt, die unter anderem dazu genutzt werden konnten folgende Dinge zu berechnen bzw. zu lösen:

- Differentialgleichungen
- Geschossbahnen (“Feuerleitrechner”, ...)
- Formeln der Elektrophysik
- ...

Insbesondere das Ermitteln von Formeln der Elektrophysik verdient einige Aufmerksamkeit, da dadurch Dinge klarer wurden, durch die die Entwicklung von elektronischen Analogrechnern erst möglich wurde.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Maschinen gänzlich auf mechanischen Prinzipien beruhten. Insbesondere die im vorigen Abschnitt vorgestellte Reibradgetriebe-Technik wurde hier ausgenutzt.

Auch in Deutschland wurde bis 1948 an einer elektromechanischen Integriermaschine gearbeitet: Die IPM-OTT. Heute stehen Teile von ihr im *Deutschen Museum* (vgl. [3]).

4.3 Serienmäßige Fertigung

Ab 1928 wurden in der USA Analogrechenmaschinen in Serie gefertigt. Sie wurden hauptsächlich für militärische Zwecke eingesetzt (Flakrechner, Feuerleitrechner, ...), kamen aber auch in wissenschaftlichen Einrichtungen zum Einsatz. Auch die Regelung von Industriellen Maschinen wurde zunehmend automatisiert. Dies wurde mit analogen Rechenanlagen realisiert (Prozessrechner). 1956 gab es 80 Hersteller elektronischer Analogrechner in den USA.

4.4 Elektronische Analogrechner

Bezeichnung	Symbol	Schaltung	Mathematische Formulierung
Hochverstärkender Gleichspannungsverstärker			$x_o = -V \cdot x_i$ mit $V \gg 10^4$
Potentiometer			$x_o = K \cdot x_i$ mit $0 < K < 1$
Koeffizientenverstärker			$x_o = -k \cdot x_i$ mit $0 < k = \frac{R}{R_i}$
Vorzeichenumkehrer			$x_o = -1 \cdot x_i$
Summierer			$x_o = - \sum_{i=1}^n k_{oi} \cdot x_{i1}$ mit $0 < k_{oi} = \frac{R_o}{R_{i1}}$

Abbildung 4: Schaltzeichen

Bei elektronischen Analogrechnern werden Prinzipien der Elektrodynamik genutzt, um Bauteile zu erstellen, die Addition, Integration, usw. für Größen wie Strom oder Spannung durchführen können. Wie bereits in Abschnitt 2 gesagt wird die Lösung einer Aufgabe meist als Hintereinanderschaltung von diesen Elementarbauteilen realisiert. So auch bei elektronischen Analogrechnern. Wie in Tabelle 4 zu sehen, sind alle grundlegenden Rechenoperationen vorhanden.

Durch die Erfindung des Transistors Ende 1947 wurde es möglich die anfälligen Röhren, aus denen die bis dato hergestellten Rechner hauptsächlich bestanden zu ersetzen. Es mussten jedoch erst einige Schwierigkeiten, wie die hohe Temperaturanfälligkeit etc. aus dem Weg geräumt werden. 1960 wurde dann der RA 800 der Öffentlichkeit

als erster transistororientierter Analogrechner vorgeführt. Gegenüber seinem röhrenbasierten Vorgängermodell hatte er viele Vorteile:

- Kleiner (1/9 des Platzbedarfes)
- Genauer
- Energiesparender (1/35 des Stromverbrauchs)
- Billiger

Mit der aufkommenden Technik der Transistoren kam aber auch die konkurrierende Technik der Digitalrechner.

5 Niedergang des Analogverfahrens

Schon J. Napier hatte seinerzeit mit einem anderen Verfahren versucht Berechnungen auszuführen. Die Idee bei der Digitaltechnik besteht darin, die Zahlen nicht, wie in der Analogwelt durch physikalische Größen zu repräsentieren, sondern als diskrete Werte aufzufassen. Durch die Abstraktion vom kontinuierlichen ins diskrete werden bestimmte Rechenoperationen (z.B. Addition) relativ einfach realisierbar. Komplexe Operationen (zu denen schon die Multiplikation zählt, erst recht aber die Integration) müssen hier jedoch durch mehrschrittige Operationen nachgebildet werden. Hierbei hängt die Schrittheitigkeit von der Größe der Eingangsvariablen ab. Eine Diskretisierung heißt außerdem immer auch eine gewisse Fehlerbehaftung der Ergebnisse. Vorteil hier ist jedoch die berechenbare Fehlergröße.²

Durch den langsamen Übergang von Hybridrechnern (von-Neumann Rechner mit analogem Rechenwerk) zu vollwertigen Digitalmodellen wurde die gegenüber der Digitaltechnik aufwendige Technik des analogen Rechnens zunehmend in den Hintergrund gedrängt. Mit der ENIAC, einem der ersten voll digitalen Computern war der Durchbruch 1965 in das *digitale Zeitalter* vollends geschafft. Aber bereits 1958 gab es in den USA 6000 elektronische Digitalrechner, und nur die Hälfte elektronische Analogrechner. Dieser Wechsel kam nicht zuletzt durch das bessere Preis/Leistungsverhältnis von Digitalrechnern zustande.

Digitalrechner sind

- billiger
- einfacher zu programmieren
- dynamischer

6 Ausblick

Heute sind analoge Verfahren zunehmend wieder im Gespräch. Als Beispiel sei hier die Simulation von neuronalen Netzen³ genannt. Hier wird durch Diskretisierung (Digitalisierung) ein Verlust von vielleicht maßgeblichen Informationen in Kauf genommen,

²Hier sei auf das Arithmeum in Bonn verwiesen ([12]), bzw auf weiterführende Literatur zu Numerik

³Literatur zu Neuronalen Netzen [10], [8]

die vielleicht entscheidend für das Verhalten von selbigen ist. Als Beispiele seien hier Aufschaukelung, Rückkopplung und Signallaufzeiten genannt.

Literatur

- [1] *dtv-Atlas der Informatik*, dtv-Verlag München 1995
- [2] Horst Rode, Klaus-Henning Hansen: *Die Erfindung der universellen Maschine*, Metzler Schulbuchverlag Hannover 1992
- [3] *Informatik und Automatik*, Deutsches Museum München 1990
- [4] W. Ameling, *Aufbau und Wirkungsweise elektronischer Analogrechner*, Vieweg 1963
- [5] Bernhard, *Analoge Rechentechnik*, Vogel-Verlag, Würzburg 1968
- [6] Prof. Dr. G. Klaus (Hrsg.): *Wörterbuch der Kybernetik*, Fischer Bücherei 1969
- [7] Dipl.-Math. W. Schwarz: *Analogprogrammierung*, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1974
- [8] Dipl.-Phys. Patrick Hamilton: *Künstliche neuronale Netze: Grundprinzipien, Hintergründe, Anwendungen*, vde Verlag GmbH Berlin; Offenbach 1993
- [9] Analog-Computer: <http://www.science.uva.nl/faculteit/museum/AnalogComputers.html>
- [10] Neuronales Netz: <http://wwwmath.uni-muenster.de/SoftComputing/lehre/material/wwwnscript/>
- [11] Geschichte und Funktionsweise der (HP-)Computer, Planimeter, Rechenschieber:
<http://www.hpmuseum.org>
- [12] Geschichte des Rechnens: <http://www.arithmeum.uni-bonn.de/>
- [13] Rechenschieber in Kalifornien: <http://www.heise.de/newsticker/data/ea-08.07.01-002/>