

Faszination Analogrechnen

Bernd Ulmann
ulmann@vaxman.de

Kolloquium zur Geschichte der
Naturwissenschaften, Mathematik und Technik
2008

Überblick

Der folgende Vortrag soll eine Einführung in die Geschichte und Technik elektronischer Analogrechner geben. Dieses Thema wird im Rahmen einer Dissertation des Autors am SPGN unter Betreuung durch Frau Professor Wolfschmidt behandelt. Aufgrund des beschränkten Zeitrahmens dieses Vortrages können die meisten Punkte nur sehr grundlegend dargestellt werden – für weitergehende Ausführungen sei bereits an dieser Stelle auf die Promotionsschrift beziehungsweise auf folgende Webseite des Autors verwiesen:

http://www.vaxman.de/analog_computing/analog_computing.html

Alle Abbildung ohne Quellenangabe stammen vom Autor und stellen Exponate aus der Sammlung des Autors dar.

Überblick

Der vorliegende Vortrag gliedert sich in folgende Teile:

- Klärung grundlegender Begrifflichkeiten
- Mechanische Analogrechner
- Frühe elektronische Analogrechner
- Typische Rechenelemente
- Systembeispiele
- Programmierung
- Beispielprobleme
- Typische Anwendungsbereiche
- Ausblick und Zukunft

Abgrenzung Analog-/Digitalrechner

Im wesentlichen existieren zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen zur Abgrenzung des Analogrechnens von digitalen Methoden:

- 1** Abgrenzung durch die unterschiedlichen Wertebereiche von an Rechnungen beteiligten Variablen: Analogrechner verwenden kontinuierliche Wertebereiche, während Digitalrechner lediglich mit diskreten Werten operieren können. Analogrechner wurden mitunter auch als *messende* Maschinen, Digitalrechner als *zählende* bezeichnet.
- 2** Analogiebildung als Unterscheidungsmerkmal: Analogierechenanlage vs. Digitalrechenanlage – letztere wird algorithmisch durch ein Programm gesteuert, während erstere durch geeignete Verschaltung von Rechenelementen ein Analogon zu einem zu lösenden Problem bildet.

Wertebereiche als Merkmal

Gegen die Verwendung unterschiedlicher Wertebereiche als Unterscheidungsmerkmal sprechen folgende Punkte:

- Bei hinreichend genauer Messung stellen sich auch die als kontinuierlich angenommenen Wertebereiche, die einem Analogrechner zugänglich sind, als diskret heraus.
- Eine auf der Darstellung von Werten beruhende Abgrenzung würde sogenannte *digitale Differentialanalysatoren* nicht der Klasse der Analogrechner zurechnen, was nicht im Sinne der folgenden Abschnitte ist.

Analogiebildung als Merkmal

Besser geeignet ist die Verwendung des Analogiebegriffes zur Unterscheidung zwischen Analog- und Digitalrechnern.

Entsprechend handelt es sich bei einem *Analogierechner*, der im folgenden aus Gründen des gewohnten Sprachgebrauches stets einfach als *Analogrechner* bezeichnet wird, um ein System aus Rechenelementen, die zur Lösung in geeigneter Form miteinander verschaltet werden, um ein Analogon der zu untersuchenden Fragestellung zu bilden.

Direkte und indirekte Analogrechner

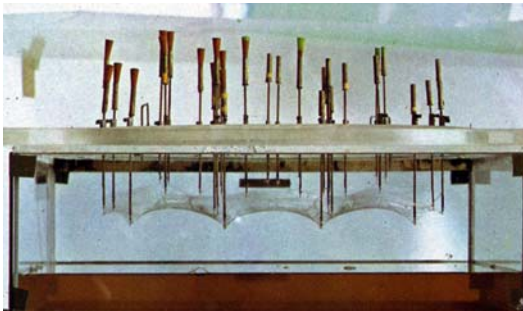
Bei der Bildung von Analogien ist zwischen sogenannten

- direkten Analogien** – hier kommen in der Regel maßstabsgerechte Modelle zum Einsatz, die auf denselben physikalischen Grundlagen wie das zu lösende Problem beruhen – und
- indirekten Analogien** – hier beruht die Analogiebildung auf dem Zwischenschritt einer exakten mathematischen Beschreibung mit meist vom eigentlichen Problem abweichender Umsetzung –

zu unterscheiden. Direkte Analogiebildungen kommen in der Regel zum Einsatz, wenn keine oder nur schwer eine mathematische Problembeschreibung möglich ist.

Direkte Analogiebildung

Die folgende Abbildung (nach [DRES72][S. 52]) zeigt eine direkte Analogiebildung im Rahmen einer Vorstudie zum Münchener Olympiastadiondach.



Implementationstechniken

Analog- bzw. genauer Analogierechner können unter Verwendung sehr unterschiedlicher Techniken implementiert werden. Zum Einsatz gelangen beispielsweise

- mechanische Rechenelemente,
- hydraulische Elemente,
- analogelektronische Rechenglieder sowie auch
- rein digitale Techniken.

So gesehen müssten die im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelten Rechner eigentlich als *analogelektronische Analogierechner* bezeichnet werden, der Einfachheit halber wird jedoch stets dem Begriff des *elektronischen Analogrechners* der Vorzug gegeben werden.

Mechanische Analogrechner

Im folgenden werden exemplarisch einige einfache mechanische Analogrechner behandelt, da durch ihre Anschaulichkeit eine Reihe wesentlicher Eigenschaften von Analogrechnern deutlich werden:

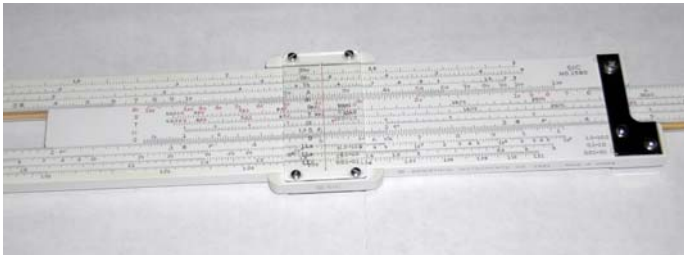
- Rechenschieber
- Planimeter
- Mechanische Integrierer
- Weitere Rechenelemente
- Mechanische Differentialanalysatoren
- Elektromechanische Entwicklungen

Mit zu den frühesten mechanischen Analogrechnern zählen die sogenannten Rechenschieber (zu ihrer Geschichte siehe beispielsweise [JEZI00]):

- Die grundlegende Operation besteht in der Addition von Strecken (bei Rechenschiebern) beziehungsweise von Winkeln (bei Rechendrehern).
- Durch geeignete Skalen lassen sich auch komplexere Operationen wie Multiplikation, Logarithmierung etc. darstellen.

Rechenschieber

Die folgende Abbildung zeigt einen typischen Rechenschieber, bestehend aus dem Körper, der *Zunge* sowie dem *Läufer*, mit dessen Hilfe Skalen auf der Vorder- und Rückseite miteinander verknüpft werden können.



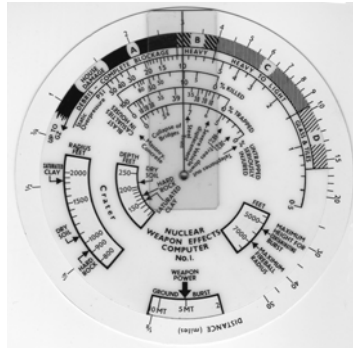
Spezialrechenschieber

In einigen Bereichen, beispielsweise der Luftfahrttechnik, kommen mitunter bis heute Rechenschieber bzw. -dreher zum Einsatz, wie das folgende Beispiel des E6-B Flightcomputers zeigt:



Spezialrechenschieber

Durch geeignete Skalenausbildung lassen sich auch Probleme behandeln, zu denen lediglich experimentelle Daten vorliegen, wie das folgende Beispiel eines recht seltenen *Nuclear Weapon Effects Computers* zeigt.



Planimeter

Mit Hilfe sogenannter *Planimeter* lässt sich durch einfaches Umfahren der Umrandung eines Gebietes dessen Flächeninhalt bestimmen – die folgende Abbildung zeigt ein typisches *Polarplanimeter*.



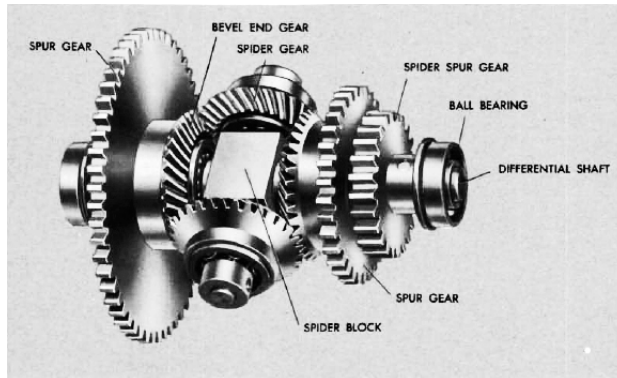
Komplexere mechanische Analogrechner

Neben solchen einfachen Analogrechnern wie Rechenschiebern und Planimetern entstanden im Laufe der Zeit auch komplexe Anlagen, die im folgenden kurz dargestellt werden.

Zunächst jedoch werden einige (wenige) grundlegende mechanische Analogrechenelemente dargestellt, die als grundlegende Bausteine solcher Anlagen Verwendung finden.

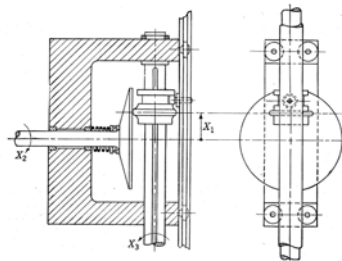
Differentialgetriebe

Die folgende Abbildung zeigt ein typisches Beispiel eines Differentialgetriebes, wie es zur Summen- und Differenzbildung eingesetzt wird (nach [BORD46][S. 174]).



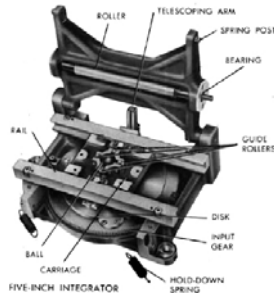
Mechanische Integrierer

Das Herzstück eines jeden Analogrechners, sei es mechanischer oder elektronischer Art, ist eine Integrationsvorrichtung. Die folgende Abbildung zeigt einen typischen Reibradintegrierer (nach [SVOB48][S. 24]), der durch Verschieben des Reibrades auf der rotierenden Integriererscheibe Ausdrücke der Art $x_3 = \int x_1 \, dx_2$ zu berechnen erlaubt:



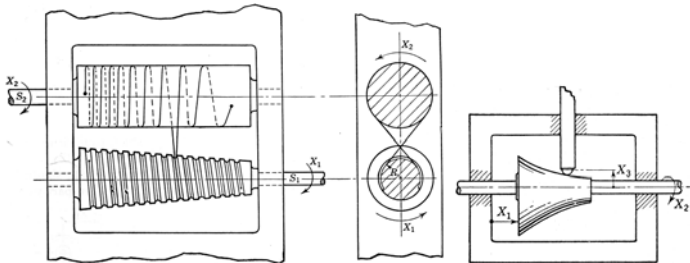
Double-Ball-Integrierer

Im folgenden wird ein praktisches Beispiel eines mechanischen Integrierers, wie er in amerikanischen Feuerleitrechnern des frühen zwanzigsten Jahrhunderts eingesetzt wurde, dargestellt (nach [BORD46][S. 287]):



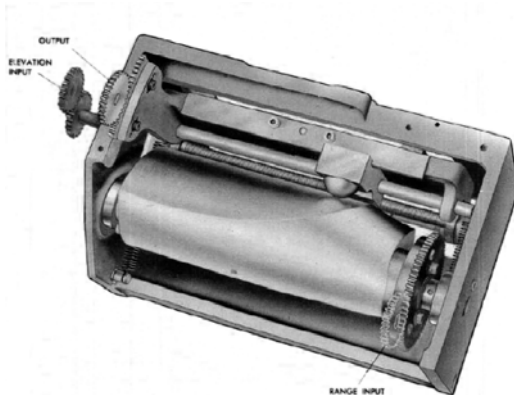
Funktionsgeber

Die beiden folgenden Bilder zeigen exemplarisch Methoden zur Erzeugung einer Quadratfunktion sowie einer von zwei Parametern abhängigen Funktion (nach [SVOB48][S. 22] bzw. [SVOB48][S. 23]).



Beispiel eines Funktionsgebers

Der im folgenden dargestellte Funktionsgeber wurde in beispielsweise in Feuerleitrechnern eingesetzt (siehe [BORD40][S. 54]):



Beispiele

Die folgenden Folien zeigen exemplarisch einige Beispiele mechanischer Analogrechner in steigender Komplexität – dargestellt werden

- Gezeitenrechner,
- Feuerleitrechner und
- mechanische Differentialanalysatoren.

Gezeitenrechner

Lord Kelvin befasste sich bereits in den 1870er Jahren mit dem Problem der Vorhersage von Gezeiten – eine Fragestellung, die von zunehmender Bedeutung vor allem für die rasch wachsende Dampfschiffahrt war.

Die Behandlung dieses Problems läßt sich auf eine Fouriersynthese, d.h. die Bildung von Summen harmonischer Funktionen unterschiedlicher Perioden, Phasen und Amplituden zurückführen, wobei die einzelnen Funktionen in diesem Zusammenhang als *Partialtiden* bezeichnet werden und beispielsweise Effekte wie

- die Rotation der Erde um ihre Achse,
- die Rotation des Mondes um die Erde,
- die Rotation der Erde um den Mond,
- die Präzession des Mondperigäums uvm.

repräsentieren.

Kelvins Gezeitenrechner

Den 1876 von Lord Kelvin fertiggestellten mechanischen Gezeitenrechner, der bereits 10 Partialtiden berücksichtigte, zeigt folgende Abbildung.



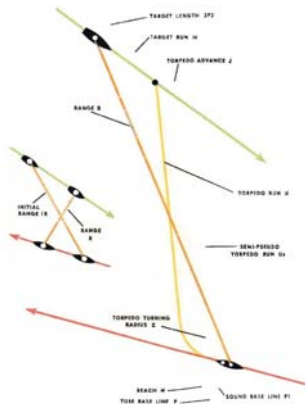
Feuerleitrechner

Ein weites Anwendungsfeld für mechanische Analogrechner fand sich ab dem ausgehenden neunzehnten Jahrhundert in sogenannten *Feuerleitrechnern*, mit deren Hilfe die Treffergenauigkeit weitreichender Geschütze gesteigert werden konnte.

Im folgenden wird exemplarisch das Problem anhand eines Torpedo-Feuerleitrechners, wie er im zweiten Weltkrieg zum Einsatz kam, dargestellt – die grundlegenden Probleme bei dem Einsatz weitreichender Waffen sind jedoch auch bei Boden-Boden- oder Boden-Luft-Geschützen im wesentlichen gleich.

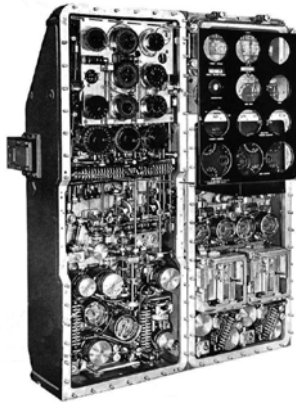
Feuerleitrechner

Eine vereinfachte Darstellung der Torpedofeuereleitproblematik zeigt folgende Abbildung nach [BORD44][S. 12]:



Feuerleitrechner

Folgende Abbildung zeigt den Torpedo Data Computer Mark 3 mit abgenommener Frontverkleidung (nach [BORD44][S. 150]):



Mechanische Differentialanalysatoren

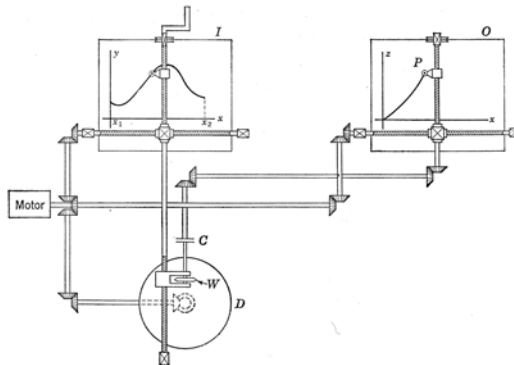
Alle bislang dargestellten Mechanismen, die nur einen geringen Teil des Spektrums mechanischer Analogrechner abdecken, wurden jeweils zur Behandlung eines einzigen Problems oder zumindest nur einer sehr eingeschränkten Problemklasse entwickelt.

Der Gedanke, solche und weitere grundlegende Rechenelemente mechanisch *beliebig* miteinander zu verkoppeln, um allgemeinere Fragestellungen zu lösen, führte zur Entwicklung sogenannter mechanischer *Differentialanalysatoren*.

Einen der ersten praktisch einsetzbaren mechanischen Differentialanalysatoren entwickelten Vannevar Bush et al. am MIT ab den späten 1920er Jahren.

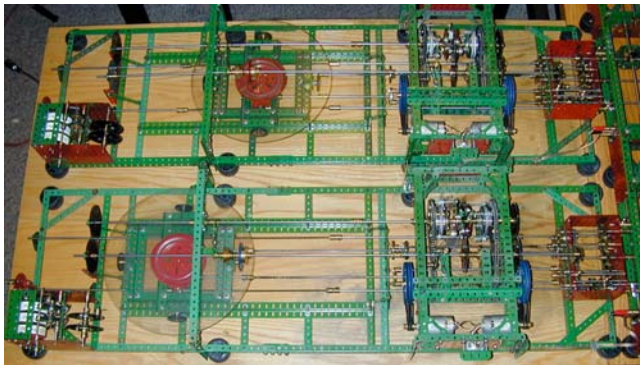
Ein einfacher Differentialanalysator

Den Aufbau eines einfachen mechanischen Differentialanalysators zeigt folgende Abbildung (nach [KARP58][S. 190]).



Mechanische Differentialanalysatoren

Das folgende Bild zeigt exemplarisch zwei Integrierer eines von Tim Robinson gebauten mechanischen Differentialanalysators (mit freundlicher Genehmigung von Tom Robinson):



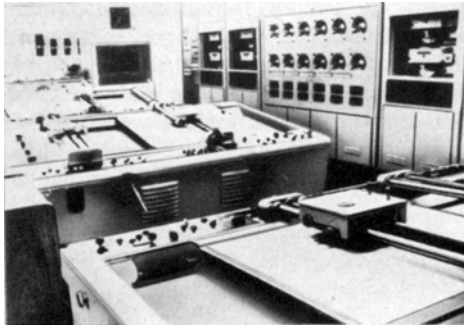
Elektromechanische Differentialanalysatoren

Von großem Nachteil beim Einsatz solcher mechanischer Differentialanalysatoren ist nicht zuletzt der hohe Aufwand bei Änderungen der Verschaltung der an einer Rechnung beteiligten Rechenelemente.

Die Entwicklung elektromechanischer Differentialanalysatoren, bei denen die eigentlichen Rechenoperationen auf mechanischem Wege, die Verknüpfung der Rechenelemente, deren Ein- und Ausgabewerte meist in Form von Achsrotationen vorliegen, jedoch auf elektrischem Wege unter Zuhilfenahme von Servosystemen geschieht, sollte diesen Nachteil beheben.

Die Integrieranlage *Minden*

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch eine von Schoppe und Faeser in Minden aufbauend auf Entwicklungen des IPM ab ca. 1948 entwickelte Integrieranlage:



Vor- und Nachteile (elektro-)mechanischer Analogrechner

Vorteile:

- Integrationen sind nach beliebigen Integrationsvariablen möglich.

Nachteile:

- Geringe Rechengeschwindigkeit
- Mechanik ist teuer, wartungsintensiv, fehleranfällig und bringt große Gewichte und Volumina mit sich.
- Änderungen der Rechenschaltung sind bei rein mechanischen Rechnern sehr zeitaufwändig, d.h. schnelle Programmwechsel sind nahezu unmöglich.

Die ersten elektronischen Analogrechner

Im Verlauf des 2. Weltkrieges beförderten vor allem zwei Entwicklungen Arbeiten an elektronischen Analogrechnern, da für diese Anwendungen mechanische oder auch elektromechanische Analogrechner in keiner Weise geeignet waren.

Bei diesen beiden befruchtenden Anwendungen handelte es sich um

- Feuerleitrechner (eine hauptsächlich bei den Bell Laboratories durchgeführte Entwicklung) sowie
- die Entwicklung der A4-Rakete sowie deren Steuerung (Helmut Hölzer).

Feuerleitrechner

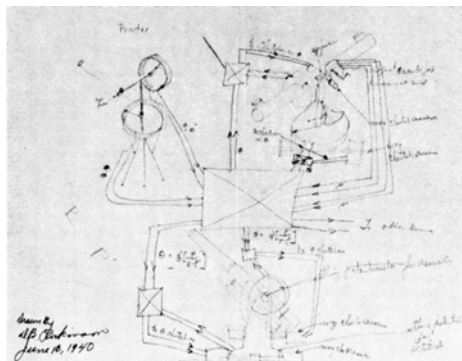
Die einem Feuerleitrechner zugrundeliegende Idee besteht darin, eines oder mehrere Artilleriegeschütze möglichst automatisch einem sich bewegenden Ziel nachzuführen.

Als Eingabedaten kommen beispielsweise Entfernungs- und Winkelinformationen von Radargeräten in Frage, aus welchen der Feuerleitrechner unter Berücksichtigung einer Reihe zusätzlicher Parameter die notwendige Ausrichtung des Geschützes errechnet.

Erste Entwicklungen in dieser Richtung fanden ab den späten 1930er Jahren – vornehmlich in den USA – statt.

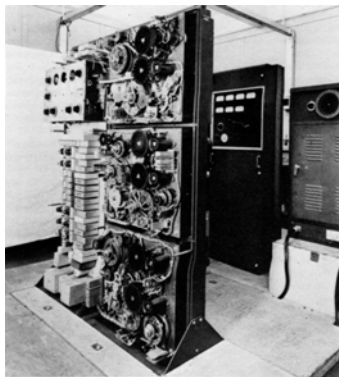
Feuerleitrechner

Die folgende Abbildung zeigt die erste Skizze eines elektronischen Feuerleitrechners (von D. B. Parkinson, nach [FAGE78][S. 135 f.]).



Feuerleitrechner

Das folgende Bild zeigt einen modifizierten Feuerleitrechner des Typs T-15, der auch gebogene Trajektorien berücksichtigen konnte (nach [FAGE78][S. 154]).

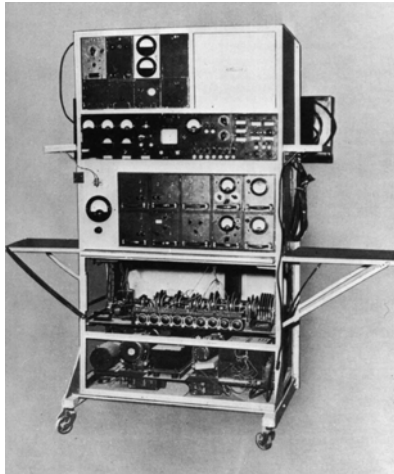


Helmut Hölzers Arbeiten

In den frühen 1940er Jahren entwickelte Helmut Hölzer den ersten elektronischen Analogrechner der Welt, der erfolgreich bei der Untersuchung einiger steuerungstechnischer Fragestellungen, die während der Entwicklung der A4-Rakete in Peenemünde auftreten, zum Einsatz gelangte.

Ein Bild dieses Analogrechners zeigt die folgende Abbildung (Quelle: NASA, Marshall Space Flight Center).

Helmut Hölzers elektronischer Analogrechner



Helmut Hölzers elektronischer Analogrechner

Dieser erste elektronische Analogrechner wies bereits fast alle Eigenschaften späterer kommerzieller Entwicklungen auf:

- Rein elektronischer Aufbau, Integration und Differentiation durch Verwendung geeigneter RC-Glieder.
- Einsatz von *Operationsverstärkern* (dieser Ausdruck wurde allerdings erst später geprägt).
- Programmierung durch Verschaltung der Rechenelemente durch einfache Steckverbindungen.

Das Mischgerät

Während dieser erste elektronische Analogrechner erfolgreich bei der Untersuchung von Fragen der Flugkörpersteuerung, die im Labor untersucht wurden, eingesetzt wurde, erforderte die eigentliche Steuerung der A4-Rakete eine über diesen Rechner hinausgehende Entwicklung.

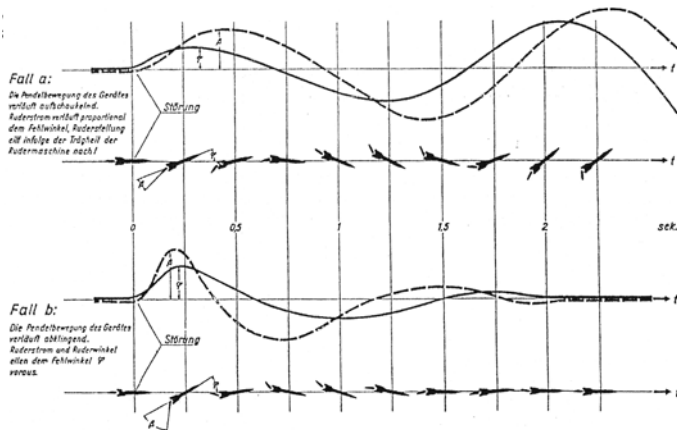
Die Steuerung eines so komplexen Fluggerätes wie der A4-Rakete erforderte die Entwicklung eines flugtauglichen elektronischen Analogrechners. Dieser musste klein, robust und möglichst wartungsfrei sein.

Der hierfür von Helmut Hölzer entwickelte Steuerrechner wurde als aus Gründen der Tarnung als *Mischgerät* bezeichnet.

Das Mischgerät

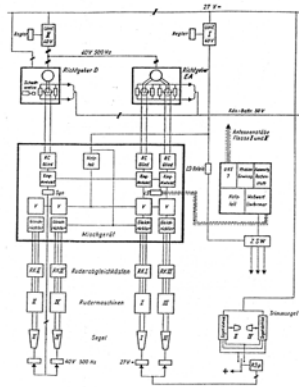
Die folgende Abbildung (nach [A4_45][Abb. 82]) zeigt das Problem der Fluglageregelung der A4-Rakete – eine rein proportionale Regelung führt aufgrund der Regelkreiszeitkonstanten zu einer Aufschaukelung und letztlich zur Zerstörung des Flugkörpers. Für eine erfolgreiche Steuerung müssen zumindest differentielle Terme zusätzlich betrachtet werden.

Das Mischgerät



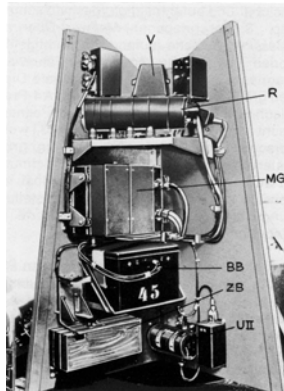
Das Mischgerät

Die folgende Abbildung gibt einen Eindruck von der Steuerung der A4-Rakete (nach [A4_45][Abb. 80]):



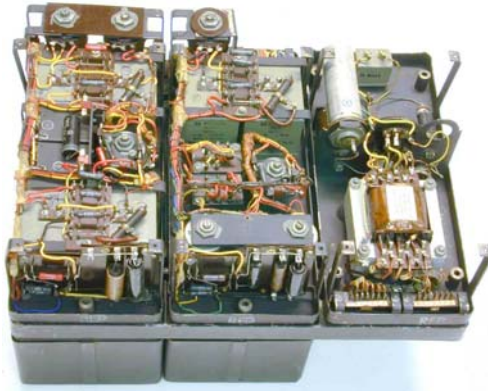
Das Mischgerät

Das in der Raketenspitze installierte Mischgerät zeigt die folgende Abbildung (nach [TREN82][S. 134]):



Das Mischgerät

Das vollständige Mischgerät zeigt folgende Abbildung (Photo: Adri de Keijzer, mit freundlicher Genehmigung):



Spätere Entwicklungen

In erster Linie ausgehend von diesen beiden Entwicklungslinien entstanden bereits in den ersten Nachkriegsjahren die ersten kommerziell verfügbaren elektronischen Analogrechner, die den Beginn einer bis in die späten 1980er Jahre reichenden Entwicklungslinie kennzeichneten.

Allen diesen elektronischen Analogrechnern, die im übrigen fast ausschließlich mit Gleichspannungen arbeiten, ist eine Reihe typischer Rechenelemente gemeinsam, die auf den folgenden Folien kurz beschrieben werden, bevor näher auf die Programmierung solcher Anlagen eingegangen wird.

Spätere Entwicklungen

Allen im folgenden betrachteten elektronischen Analogrechnern sind folgende Eigenschaften gemeinsam:

- Problemvariablen werden durch Spannungen repräsentiert.
- Diese Spannungen können eine bestimmte obere und untere Grenze nicht über- bzw. unterschreiten. Diese Grenze wird als *Maschineneinheit* bezeichnet und liegt in der Regel bei ± 100 V bzw. ± 10 V.
- Die Verschaltung der Rechenelemente erfolgt durch Herstellen entsprechender elektrischer Verbindungen zwischen Aus- und Eingängen von Rechenelementen.

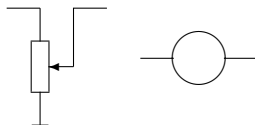
Grundlegende Rechelemente

Bei den im folgenden kurz beschriebenen Rechelementen handelt es sich um

- Koeffizientenpotentiometer,
- Operationsverstärker,
- Summierer,
- Integrierer,
- Funktionsgeber,
- Multiplizierer,
- Komparatoren sowie
- typische Ausgabegeräte.

Koeffizientenpotentiometer

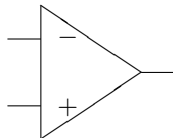
Das einfachste (passive) Rechenelement eines elektronischen Analogrechners ist das sogenannte *Koeffizientenpotentiometer*, dessen Schaltung und Rechenplansymbol im folgenden dargestellt sind:



Mit seiner Hilfe kann ein Eingangssignal mit einem frei wählbaren Multiplikator $0 \leq a \leq 1$ multipliziert werden.

Operationsverstärker

Das wichtigste aktive Element eines elektronischen Analogrechners ist der sogenannte *Operationsverstärker*:



Ein solcher (idealisierter) Operationsverstärker verfügt über zwei Eingänge, von denen einer invertiert, und stellt an seinem Ausgang die mit einem Verstärkungsfaktor $V = \infty$ multiplizierte Summe der beiden Eingangssignale zur Verfügung.

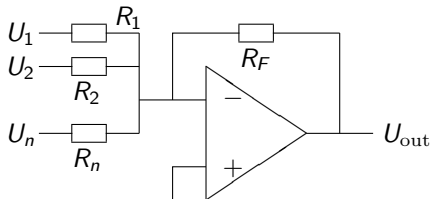
Operationsverstärker

Natürlich ist ein unendlicher Verstärkungsfaktor nicht realisierbar – um die folgenden Ausführungen jedoch einfach zu halten, wird im folgenden stets von idealen Verstärkern ausgegangen, die zudem keine Drift und keinen Eingangsstrom aufweisen.

Mit Hilfe von Operationsverstärkern können auf einfache Art und Weise Summierer und Integrierer aufgebaut werden, welche zu den wichtigsten Rechenelementen überhaupt zählen.

Summierer

Ein solcher (invertierender) Summierer hat folgende Prinzipschaltung:



Für einen idealen Operationsverstärker gilt hiermit

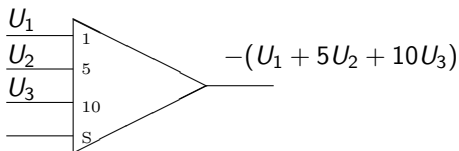
$$\sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i} = -\frac{U_{out}}{R_F}.$$

Summierer

Insgesamt berechnet ein solcher Summierer also

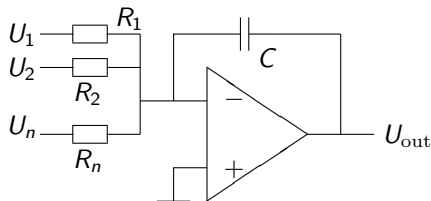
$$-U_{\text{out}} = \sum_{i=1}^n a_i U_i$$

mit $a_i = \frac{R_F}{R_i}$. In der Regel wird er durch folgendes Symbol dargestellt:



Integrierer

Die, ebenfalls auf einem (idealisierten) Operationsverstärker als aktivem Element beruhende Prinzipschaltung eines Integrierers zeigt folgende Abbildung:



Im Unterschied zu einem Summierer liegt hier eine Kapazität im Rückführungszweig des Verstärkers.

Integrierer

Mit dem durch den Kondensator fließenden Strom $I_C = C\dot{U}_{\text{out}}$ folgt entsprechend

$$\sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i} = -C\dot{U}_{\text{out}}.$$

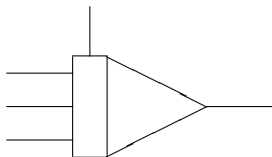
Mit a_i wie zuvor ergibt sich damit letztlich

$$-U_{\text{out}} = \int_0^t \sum_{i=1}^n a_i U_i(t) dt + U(0)$$

für die Operation des Integrierers. Man beachte, dass nur nach der Zeit t integriert werden kann!

Integrierer

Ein solcher Integrierer wird in der Regel durch folgendes Symbol dargestellt:



Er verfügt über mehrere Betriebsarten (vereinfacht):

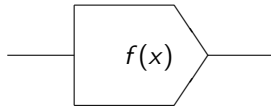
Anfangswert: Der Kondensator wird auf einen Anfangswert $U(0)$ geladen.

Rechnen: Die Integration läuft.

Halt: Die Integration ist unterbrochen, am Ausgang des Integrierers steht konstant der letzte Ausgangswert zur Verfügung.

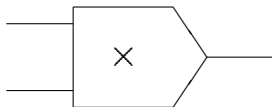
Funktionsgeber

Viele Aufgabenstellungen erfordern die Darstellung vorgegebener Funktionen. Hierfür stehen sogenannte *Funktionsgeber* zur Verfügung, für deren Implementation eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten entwickelt wurden. Das allgemeine Symbole eines solchen Funktionsgebers hat folgende Form:



Multiplizierer

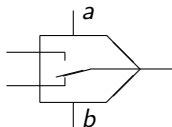
Die Multiplikation zweier Spannungen ist eine deutlich aufwendigere Operation als beispielsweise die Integration. Im Laufe der Zeit wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken zur Durchführung von Multiplikationen vorgeschlagen und umgesetzt – das allgemeine Symbol eines Multiplizierers besitzt jedoch in fast allen Fällen folgende Gestalt:



Mit Hilfe eines Tricks lassen sich mit einem Multiplizierer unter Zuhilfenahme eines sogenannten *offenen Verstärkers* auch Divisionen und Wurzeln berechnen, so dass hierfür in der Regel keine eigenen Rechenelemente zur Verfügung stehen.

Komparatoren

Einige Problemstellungen benötigen zu ihrer Behandlung Sprungfunktionen oder eine Möglichkeit, zwischen zwei Werten auswählen zu können etc. Hierzu bieten die meisten elektronischen Analogrechner sogenannte *Komparatoren* an, bei denen es sich um gesteuerte Schalter handelt. Das Symbol eines solchen Komparators zeigt folgende Abbildung:



Ist die Summe der beiden Eingangsspannungen a und b größer 0, so nimmt der Schalter die obere Position ein, ist sie kleiner gleich 0, ist die untere Position aktiv.

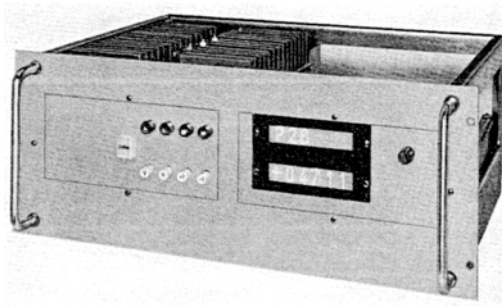
Ausgabegeräte

Da ein elektronischer Analogrechner mit Spannungen rechnet, bieten sich als Ausgabegeräte zunächst Oszilloskope und x, t - beziehungsweise x, y -Schreiber an.

Fortgeschrittenere Anlagen bieten auch die Möglichkeit, Messwerte zu digitalisieren und entweder anzuzeigen, auszudrucken oder einem angeschlossenen Digitalrechner weiterzuleiten (besitzt dieser Digitalrechner darüberhinaus die Möglichkeit, steuernd in den Ablauf des Analogrechenprogramms einzugreifen, spricht man von einem *Hybridrechner*).

Ausgabegeräte

Ein Beispiel eines frühen Digitalvoltmeters (Telefunken, 1960) zeigt die folgende Abbildung (nach [BALL60][S. 215]):



Ausgabegeräte

Einen typischen, einfachen Einkanal-x, y-Schreiber zeigt folgende Abbildung:



Ausgabegeräte

Ein typisches Oszilloskop mit Kameravorsatz, wie es häufig mit elektronischen Analogrechnern eingesetzt wurde, zeigt folgende Abbildung (nach [STEIN]):



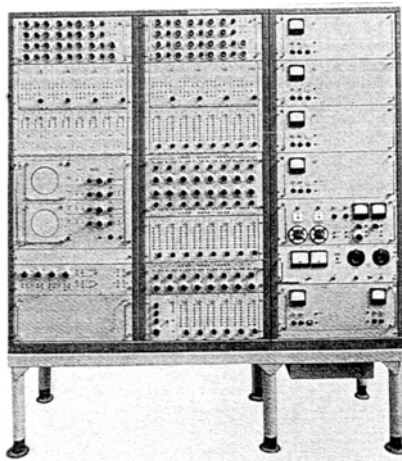
Systembeispiele

Auf den folgenden Folien werden exemplarisch einige typische elektronische Analogrechner vorgestellt, die einen Zeitraum von etwa 1950 bis in die 1980er Jahre hin repräsentieren.

Bedingt durch den Charakter der zugrundeliegenden Arbeit wird hierbei der Schwerpunkt auf Systemen des Herstellers Telefunken liegen.

Das folgende Bild (nach [KETT57][S. 129]) zeigt den ersten elektronischen Analogrechner von Telefunken, das System *RA 1* in seiner Ausbaustufe im Jahre 1957. Schön zu erkennen sind der modulare Aufbau ohne ein zentrales Steckfeld, sowie das Doppeloszilloskop zur Ausgabe von Rechenergebnissen.

RA 1



RA 1

Die RA 1, bei der es sich um einen Prototypen handelte, an dem bereits unterschiedliche Schaltungstechniken im Bereich der Multiplizierer erprobt wurden, war noch ausschließlich mit Röhren bestückt.

Der rechte Schrank beinhaltet die vier Anodenspannungsnetzteile, das Präzisionsnetzteil für die Rechenspannungen von $\pm 100\text{ V}$ sowie einen Spannungskonstanter.

Der mittlere Schrank enthält ausschließlich Rechenelemente (Funktionsgeber, Multiplizierer, Summierer/Integrierer, Koeffizientenpotentiometer etc.), während der linke Schrank neben einigen allgemeinen Rechenelementen das Doppeloszilloskop als zentrales Ausgabegerät enthält.

RA 463 und RA 463/2

Aus der RA 1 gingen schnell zwei Produktionssysteme hervor:

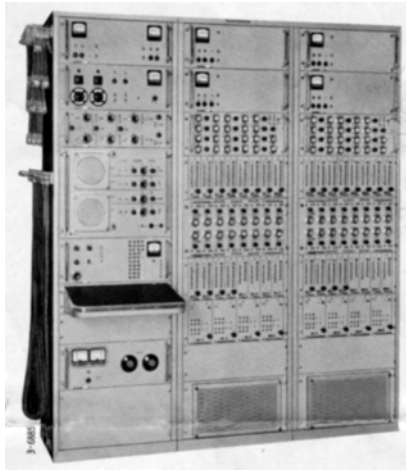
RA 463: Ein aus nur zwei Racks bestehendes Kleinsystem.

RA 463/2: Ein erweitertes System, das wie die RA 1 aus insgesamt drei Schränken besteht.

Beide Systeme wurden mit einigem Erfolg vermarktet, blieben aber die einzigen röhrenbestückten Analogrechner von Telefunken.

Die folgende Abbildung zeigt ein RA 463/2-System (nach [RA463_58]).

RA 463/2



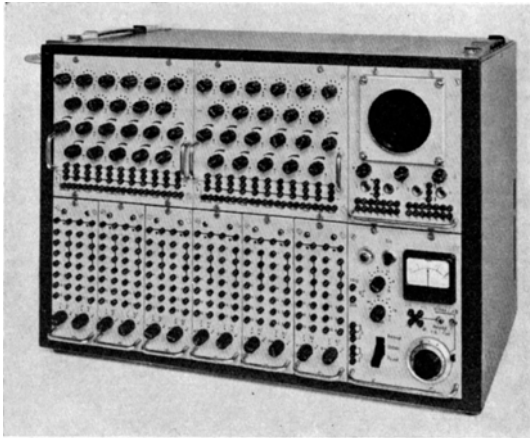
Der erste transistorisierte Analogrechner

Bereits Mitte der 1950er Jahre begann Dr.-Ing. Günter Meyer-Brötz bei Telefunken mit Untersuchungen zur Anwendung von Transistoren in Präzisionsoperationsverstärkern, wie sie auch für elektronische Analogrechner einsetzbare sein sollten.

Kein anderer Hersteller elektronischer Analogrechner wagte so früh den Schritt weg von bewährter Röhrentechnologie hin zu volltransistorisierten Schaltungen.

Aus diesen Untersuchungen entstand das im folgenden Bild dargestellte Labormuster eines transistorisierten Analogrechners (nach [ERNS60][S. 255]).

Der erste transistorisierte Analogrechner



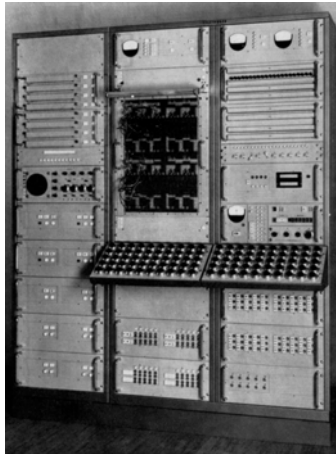
RA 800

Aus diesem kleinen Prototypen, der hinsichtlich seines Aufbaus die Nähe zu den Systemen RA 1 und RA 463 bzw. RA 463/2 nicht verleugnen kann, entstand in kurzer Zeit ein großes Präzisionsanalogrechensystem, das bereits 1960 auf der Hannover Industriemesse vorgestellt wurde.

Hierbei handelte es sich um den weltweit ersten kommerziell verfügbaren volltransistorisierten Präzisionsanalogrechner, der andere Hersteller, hierunter vor allem EAI, unter Zugzwang setzte, ebenfalls transistorisierte Systeme zu entwickeln.

Die folgende Abbildung zeigt ein solches RA 800-System (nach [KLEY64][S. 133]) – man beachte das zentrale, leicht austauschbare Programmierfeld.

RA 800



Tischrechner

Beruhend auf der Transistortechnologie der RA 800-Systems wurden im Verlauf der folgenden Jahre (bis zu Anfang der 1970er Jahre) auch kleine transistorisierte Tischrechnersysteme von Telefunken geschaffen, die eine hohe Verbreitung auf dem Markt fanden. Hierbei handelte es sich um folgende Systeme:

- RAT 700:** Allererstes Modell – direktes Nebenprodukt der RA 800-Entwicklung, wurde vor der RA 800 vorgestellt.
- RA 740:** Ein verbessertes Modell mit größerem Funktionsumfang und gesteigerter Genauigkeit.
- RA 741:** Nachfolgesystem der RA 740 – keine wesentlichen Neuerungen.
- RA 742:** Letztes Tischrechnermodell – neues Steckfelddesign, elektronische Schalter in den Integrierern.
- RA 710:** Preiswertes Modell mit geringer Genauigkeit.

RAT 700 und RA 742



RA 770

Spätere elektronische Analogrechner verfügten neben rein analogen Rechenelementen auch über digitale Elemente, mit deren Hilfe komplexe Rechenabläufe gesteuert werden können, wie sie beispielsweise bei Optimierungsaufgaben auftreten.

Das folgende Bild zeigt das letzte von Telefunken entwickelte Analogrechnersystem, die RA 770. Auf der linken Seite befindet sich die digitale Steuereinheit, in der Mitte sind die verschiedenen Bedien- und Auslesesysteme vereinigt, während das analoge Programmierfeld rechts angeordnet ist.

RA 770



Dornier 960

Den Abschluss der hier exemplarisch vorgestellten Systeme bildet mit der Dornier 960 eines der letzten entwickelten Analogrechensysteme überhaupt.

Bei der Dornier 960 handelt es sich um ein vollständiges Hybridsystem, d.h. einem Analogrechner ist ein Digitalrechner zugeordnet, der über DA- und AD-Wandler sowie entsprechende Steuerleitungen zusammen mit dem Analogrechner an einem Problem arbeiten kann.

Solche Hybridrechnersysteme wurden von Dornier bis in die späten 1980er Jahre hinein gebaut und werden vereinzelt noch heute in einigen Bereichen eingesetzt.

Die folgende Abbildung ist [DO960] entnommen.

Dornier 960



Beispielprobleme

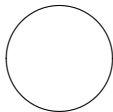
Im folgenden werden exemplarisch zwei Beispielprobleme mit Hilfe eines Analogrechners behandelt, um die Grundlagen der Programmierung solcher Systeme zu verdeutlichen.

Hierbei handelt es sich um

- ein Masse-Feder-Dämpfer-System sowie
- ein einfaches Räuber-Beute System.

Allgemein können alle Fragestellungen mit Hilfe eines (elektronischen) Analogrechners behandelt werden, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden können, was für die Mehrzahl technisch relevanter Fragestellungen zutrifft.

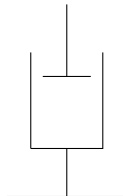
Grundelemente des Masse-Feder-Dämpfer-System



$$F_m = ma = m\ddot{y}$$

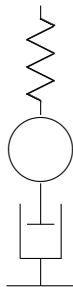


$$F_s = sy$$



$$F_d = d\dot{y}$$

Das Masse-Feder-Dämpfer-System



$$F_m + F_d + F_s = 0$$

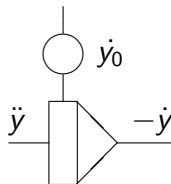
$$m\ddot{y} + d\dot{y} + sy = 0$$

Es gilt also

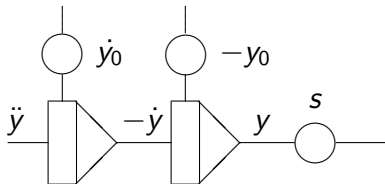
$$\ddot{y} = \frac{-(d\dot{y} + sy)}{m}.$$

Aufstellen des Rechenplans

Eine erste Integration liefert:

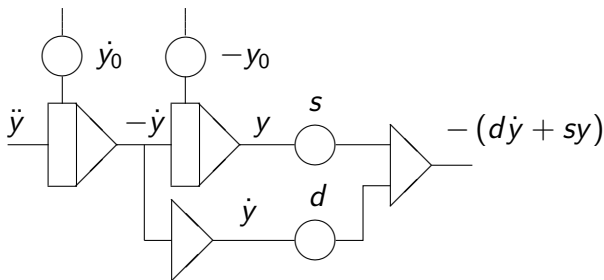


Nach einer weiteren Integration ergibt sich:

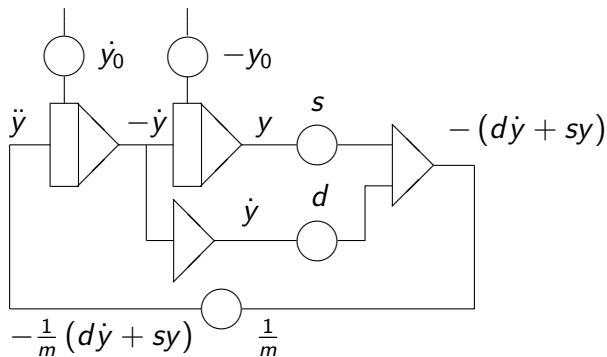


Aufstellen des Rechenplans

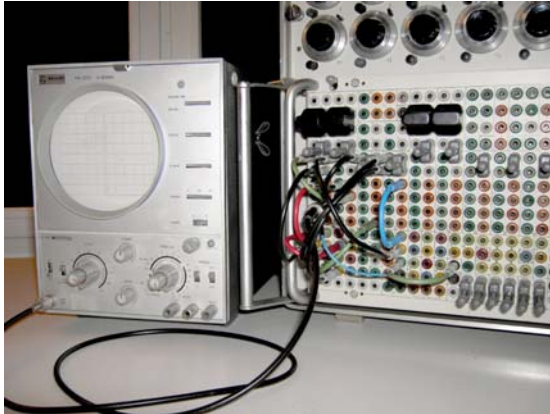
Bilden des Ausdruckes $-(d\dot{y} + sy)$:



Die vollständige Rechenschaltung

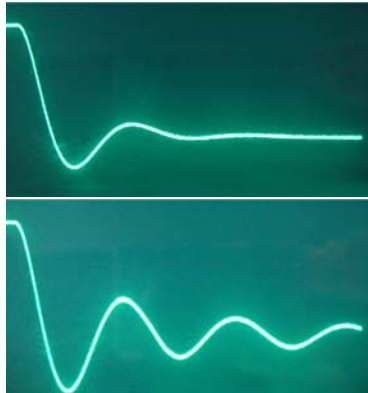


Realisierung



Ergebnisse

Die beiden folgenden Bilder zeigen Simulationsergebnisse für unterschiedliche Dämpfungswerte:



Räuber-Beute-System

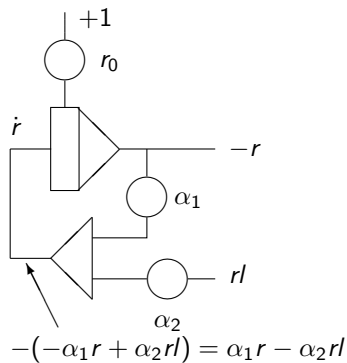
Das als zweites Beispiel dargestellte Räuber-Beute-System ist etwas komplexer als das Masse-Feder-Dämpfer-System, da hier erstmals zwei gekoppelte Differentialgleichungen auftreten.

Betrachtet wird ein abgeschlossenes Ökosystem, bestehend aus einer Luchs- (l) und einer Hasenpopulation (r), für das

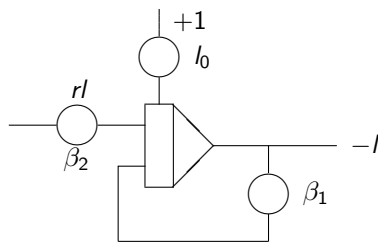
$$\begin{aligned}\dot{r} &= \alpha_1 r - \alpha_2 r l \\ \dot{l} &= -\beta_1 l + \beta_2 r l\end{aligned}$$

gilt. Hierbei ist α_1 die Geburtsrate der Hasen, α_2 die Rate der von Luchsen getöteten Hasen, β_1 die Sterblichkeitsrate der Luchse und β_2 der durch Futterzufuhr erzeugte Zuwachs der Luchspopulation.

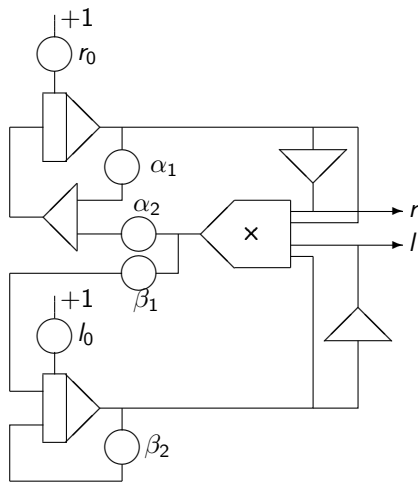
Berechnung von $-r$



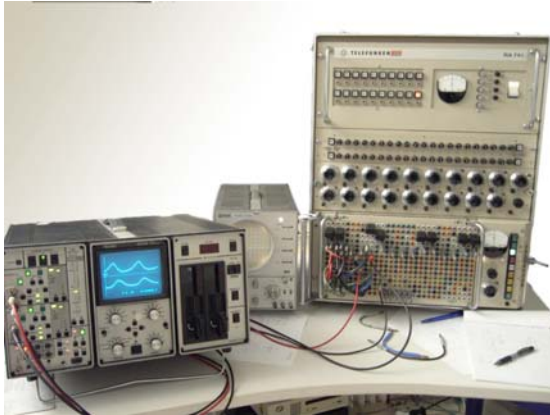
Berechnung von $-I$



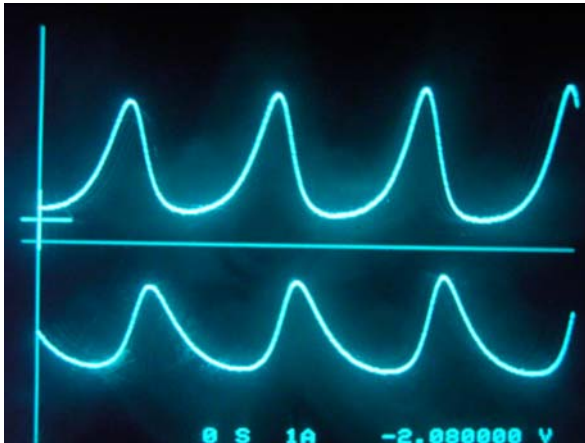
Die Gesamtschaltung



Realisierung



Ergebnisse



Anwendungsbereiche

In der Zeit von etwa 1950 bis 1980 waren elektronische Analogrechner aus kaum einem Bereich in den Ingenieurwissenschaften, Technik und Forschung wegzudenken.

Sie spielten eine wesentliche Rolle in der Raumfahrt, in der Luftfahrttechnik, bei der Entwicklung und Optimierung industrieller Prozesse, im Maschinenbau, in der Kerntechnik etc.

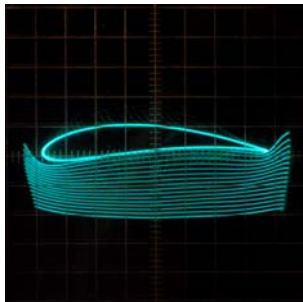
Im folgenden werden exemplarisch die wichtigsten Anwendungsgebiete des elektronischen Analogrechnens dargestellt, wobei keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird – aufgrund der Breite der Gebiete ist dies auch nicht möglich.

Mathematik

- Differentialgleichungen (gewöhnliche DGL, Randwertprobleme, nichtlineare DGL, partielle DGL)
- Integralgleichungen
- Konforme Abbildungen
- Fouriersynthese und -analyse
- Stochastik und Statistik
- Optimierungsprobleme
- Monte Carlo-Verfahren

Mathematik

Das folgende Beispiel zeigt die Anwendung einer konformen Abbildung zur Generierung von Strömungslinien um ein Joukowski-Profil mit Hilfe eines Analogrechners¹.



¹Siehe

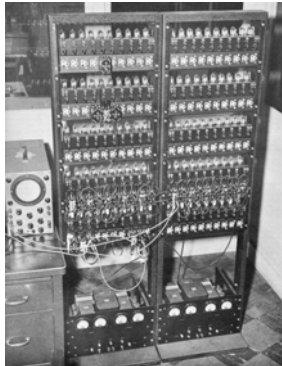
http://www.vaxman.de/analog_computing/joukowski/joukowski.html

Physik

- Planetenbahnen (Mehrkörperprobleme)
- Optik
- Magnetische Linsen
- Magnetlager
- Wärmeleitung
- Ferromagnetische Dünnschichten
- Halbleiterphysik

Physik

Die folgende Abbildung zeigt den *Electronic Analog Frost Computer* zur Untersuchungen von Frosteffekten in Bodenschichten (nach [ALDR55][S. 259]):



Mechanik und Maschinenbau

- Schwingungs- und Vibrationsuntersuchungen
- Stoßdämpferentwicklung (Fahrzeugbau)
- Rotierende Systeme (Lager, Kompressoren etc.)
- Materialwissenschaft (nicht destruktives Testen, Plasto- und Elastomechanik)
- Pneumatik und Hydraulik
- Servosysteme

Kerntechnik

- Grundlagenforschung (Na-Dampfblasensimulation, Xenon-Vergiftung, Brutvorgänge etc.)
- Simulation
- Steuerung und Regelung von Reaktoren

Kerntechnik

Die folgende Abbildung zeigt einen AEG Reaktorsimulator mit RA 463 Analogrechner (nach [GERW58]):



Biologie und Medizin

- Ökosysteme und Populationsdynamik
- Stoffwechseluntersuchungen
- Pharmakokinetik
- Kardiovaskulärsysteme
- Neurophysiologie

Biologie und Medizin

Die folgende Abbildung zeigt Richard FitzHugh bei der Lösung der Hodgkin-Huxley Gleichungen an einem Beckman-Analogrechner (mit freundlicher Genehmigung von Dr. Izhikevich):

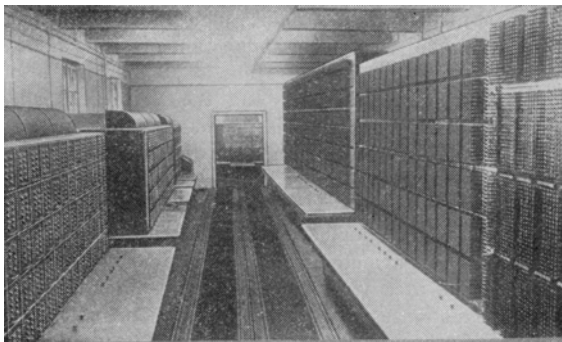


Geologie und Meereskunde

- Bodenschätze
- Erdbebensimulation
- Ausbreitung von Schallwellen

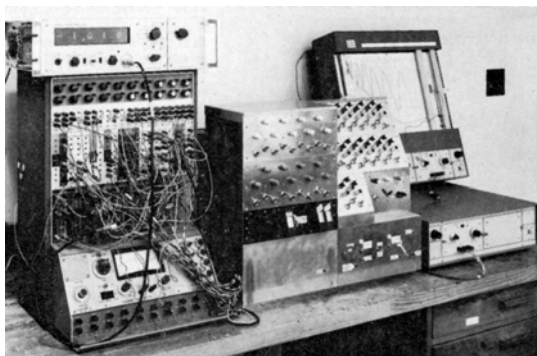
Geologie und Meereskunde

Die folgende Abbildung zeigt das russische ZIS-Analogrechensystem zur Untersuchung hydraulischer Fragestellungen im Umfeld der Lagerstättenforschung (nach [USHA58][S. 1812]):



Geologie und Meereskunde

Die folgende Abbildung zeigt den analogen Ray Tracer von Light, Badger und Barnes (nach [LIGH66][S. 724]):

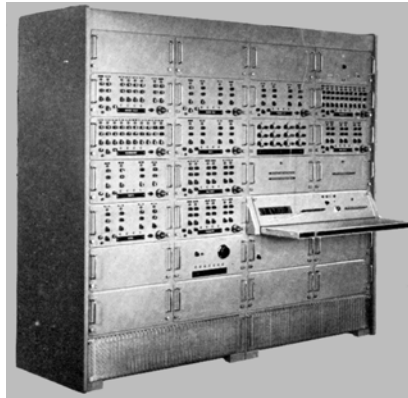


Energietechnik

- Übertragungsleitungen
- Elektrische Versorgungsnetze
- Netzsimulation
- Frequenzsteuerung und Netzsynchronisation, Verbundnetzregelungen
- Schaltspitzen
- Generatoren
- Scheduling von Kraftwerken
- Transformatoren, Wechsel- und Gleichrichter
- Gleichstromübertragung

Energietechnik

Folgende Abbildung zeigt den GEDA Power Dispatch Computer (nach [GEDA57]):



Elektronik und Nachrichtentechnik

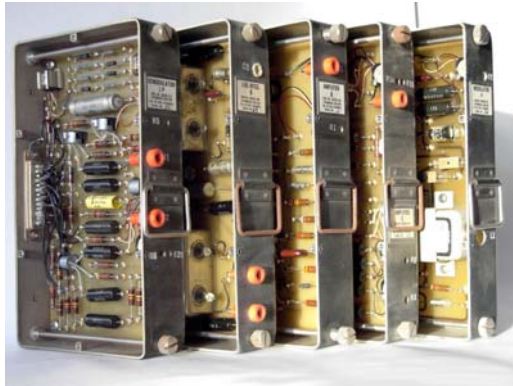
- Schaltungssimulation
- Frequenzverhalten und Resonanzuntersuchungen
- Spektralanalyse
- Filterentwurf
- Funknetze
- Korrelationsanalyse

Mess-, Steuer- und Regeltechnik

- Datenerfassung und -verarbeitung
- Regelkreise
- Servosysteme
- Abtastsysteme
- Dedizierte Rechner in Regelanwendungen

Mess-, Steuer- und Regeltechnik

Die folgende Abbildung zeigt einige typische Analogrechenmodule von General Dynamics, die in der Steuerung eines Kernreaktors Verwendung fanden:



Verfahrenstechnik

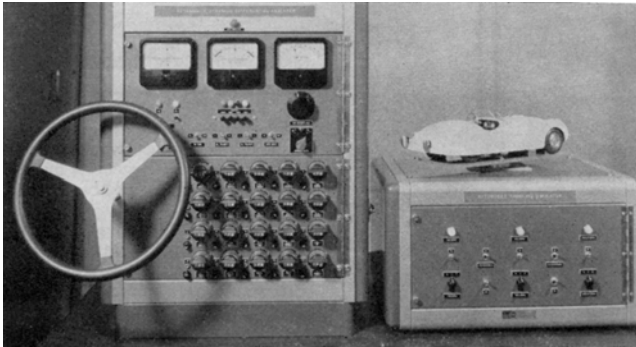
- Wärmetauscher, Verdampfer, Kolonnen
- Rückgewinnung von Lösungsmitteln
- Reaktionskinetik
- Prozesssteuerung
- Prozesssimulation
- Adaptive Steuerungssysteme
- Parameterbestimmung und -optimierung

Verkehrssysteme

- Federungs- und Stoßdämpfersysteme
- Lenksysteme
- Getriebeentwicklung
- Verkehrsflusssimulation
- Dynamisches Verhalten von Schienenfahrzeugen
- Magnetschwebbahnen
- Luftkissenfahrzeuge
- Schifffahrtstechnik

Verkehrssysteme

Folgende Abbildung zeigt einen einfachen Lenksystemsimulator (nach [MCLE58][S. 1995]):



Luft- und Raumfahrttechnik

- Flutische
- Entwicklung von Autopiloten
- Fahrgestellschwingungen
- Flugsimulation
- In-flight Simulationen
- Triebwerksentwicklung
- Hubschrauberrotoren
- Flugleitsysteme
- Fangseilsysteme
- Mensch-Maschineschnittstellenentwicklung
- Raketentriebwerke, mehrstufige Trägerraketen
- Flugverhalten und -steuerung von Raketen
- Startfensterbestimmung
- Rendezvousmanöver

Luft- und Raumfahrttechnik

Folgende Abbildung zeigt die EASE 2133-Installation bei MBB (520 Rechenverstärker, 72 Multiplizierer, 64 Funktionsgeber, 240 Servopotentiometer etc.) nach [MBB]:



Luft- und Raumfahrttechnik

Die Entwicklung des Steuersystems für die Mercury Raumkapseln erforderte ebenfalls den Einsatz elektronischer Analogrechner, wie folgende Abbildung zeigt:



Militärische Anwendungen

- Kampfsimulationen
- Geschossbahnen
- Flaksimulatoren
- Raketensteuerung (Nike, Atlas, Polaris etc.)

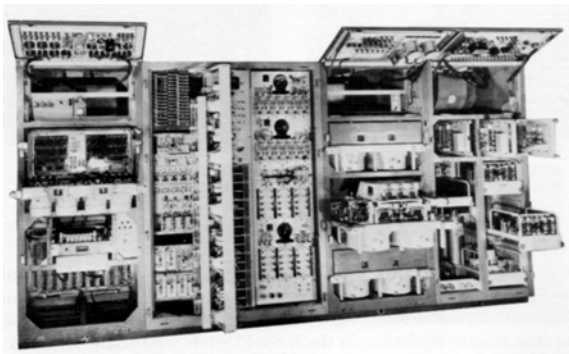
Militärische Anwendungen

Das folgende Bild zeigt den Tactical Avionics System Simulator (mit freundlicher Genehmigung von Bruce Baker):



Militärische Anwendungen

Einige frühe Raketensysteme wurden mit Hilfe bodengestützter Analogrechner gesteuert – ein Beispiel hierfür ist der im folgenden dargestellte Nike Research and Development-Rechner (ca. 1951) nach [FAGE78][S. 383] (Rechner geöffnet):



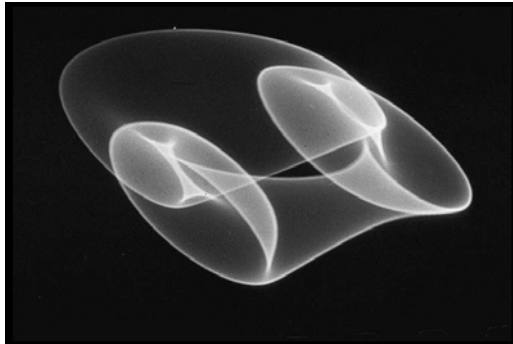
Kunst, Musik und Unterhaltung

Auch in den Bereichen Kunst, Musik und Unterhaltung wurden und werden zum Teil Analogrechner eingesetzt, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Im Bereich der Musik arbeitet beispielsweise der Komponist Hans Kulk (Niederlande) mit Analogrechnern, die er zur Steuerung analoger Synthesizer einsetzt.

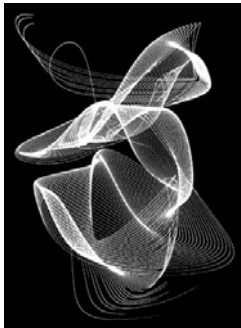
Kunst, Musik und Unterhaltung

Die folgende Abbildung zeigt eine mit Hilfe eines elektronischen Analogrechners erzeugte Graphik des Künstlers Prof. Herbert W. Franke (mit freundlicher Genehmigung des Künstlers):



Kunst, Musik und Unterhaltung

Auch Heinrich Heidersberger hat mit Hilfe mechanischer Analogrechner eine Vielzahl bekannter Kunstwerke geschaffen – ein Beispiel hierfür ist das im folgende dargestellte Bild „Prélude“ (mit freundlicher Genehmigung von Benjamin Heidersberger):



Niedergang des Analogrechnens

Bereits in den frühen 1970er Jahren begann sich der Niedergang des elektronischen Analogrechnens abzuzeichnen. Hauptsächlich Auslöser hierfür war der enorme Leistungszuwachs digitaler Rechenanlagen sowie deren Preisverfall und die rapide anwachsende Verbreitung.

Heutzutage sind elektronische Analogrechner fast vollständig aus dem Markt sowie aus Forschung und Lehre verschwunden, das Wissen um die Technik des analogen Rechnens droht, in Vergessenheit zu geraten.

Nichtsdestotrotz bieten Analogrechner gegenüber Digitalrechnern noch immer einige Vorteile, die durch Verwendung digitaler Implementationstechniken unter Vermeidung der Nachteile analoger Elektronik vielleicht zu einer Renaissance des Analogiegedankens in der Rechentechnik führen könnte.

Vorteile des Analogrechnens

- Extrem große Problemnähe – die Fragestellung wird nicht durch ihre algorithmische Beschreibung verschleiert.
- Hohe Interaktivität – in laufende Rechnungen kann jederzeit manuell oder automatisch eingegriffen werden.
- Extreme Parallelität der Rechenelemente, die von speicherprogrammierten Digitalrechnern prinzipiell nicht zu erreichen ist.

Zukunft des Analogrechnens

Unter Verwendung moderner Techniken, wie beispielsweise FPGAs, wären rein digitale Implementationen typischer Analogrechelemente im Stile früherer digitaler Differentialanalysatoren denkbar.

Mit Hilfe eines solchen Ansatzes könnten die Vorteile des Analogrechnens – allen voran die inhärente Parallelität – mit den Vorteilen moderner Digitalrechner – beliebige Rechengenauigkeit, programmgesteuerte Konfiguration – vereinigt werden. Eine solche Implementation könnte beispielsweise die Form eines Coprozessors besitzen, mit dessen Hilfe dynamische Simulationen durchgeführt werden könnten, die für herkömmliche Digitalrechner auch heute noch Schwierigkeiten aufwerfen.

In eigener Sache

Das elektronische Analogrechnen ist nicht nur Thema meiner Promotion sondern auch und vor allem meine große Leidenschaft – aus diesem Grunde an dieser Stelle eine Bitte:

- Sollten Sie von einem Analogrechner Kenntnis haben, der ein gutes neues Zuhause sucht, lassen Sie mich dies bitte wissen. Ich tue mein Möglichstes, solche Maschinen vor dem drohenden Schrott und dem Vergessen zu bewahren, wobei mich auch große Anlagen, wie beispielsweise eine RA 800(H), nicht abschrecken.
- Wenn Sie Literatur, Artikel, Aufzeichnungen etc. rund um das analoge Rechnen und/oder Anwendungen besitzen, würde ich mich freuen, wenn Sie mir diese zum Scannen leihweise zur Verfügung stellen könnten, um sie einem größeren Kreis zugänglich zu machen.

Ich bin jederzeit unter ulmann@vaxman.de beziehungsweise unter 0177/5633531 zu erreichen. Vielen Dank für Ihr Verständnis und Ihre Unterstützung.

-  [ALDR55] H. P. Aldrich, H. M. Paynter, „First Interim Report – Analytic Studies of Freezing and Thawing of Soils (for the Arctic Construction and Frost Effects Laboratory New England Division, Corps of Engineers“, in [PAYN55], S. 247–260
-  [BALL60] B. Ball, „Ein Digitalvoltmeter hoher Genauigkeit mit Transistoren“, in *Telefunken Zeitung*, Jg. 33 (September 1960), Heft 129, S. 211–216
-  [BORD40] Bureau of Ordnance (Hrsg.), *Basic Fire Control Mechanisms*, OP 1140, September 1940
-  [BORD44] Bureau of Ordnance Publication (Hrsg.), *Torpedo Data Computer, Mark 3, Mods. 5 to 12 inclusive*, June, 1944
-  [BORD46] Bureau of Ordnance (Hrsg.), *Basic Fire Control Mechanisms: Maintenance*, OP 1140 A, 1946

-  [DRES72] Fritz Dressler, „Das Dach“, in *hobby – Das Magazin der Technik*, Nr. 8/72, S. 50 ff.
-  [ERNS60] Dietrich Ernst, *Elektronische Analogrechner – Wirkungsweise und Anwendung*, R.Oldenbourg Verlag München, 1960
-  [FAGE78] M. D. Fagen (Ed.), *A History of Engineering and Science in the Bell System – National Service in War and Peace (1925–1975)*, Bell Telephone Laboratories, Inc., First Printing, 1978
-  [GERW58] Robert Gerwin, „Atom-Strom für deutsche Städte“, in *Hobby – Das Magazin der Technik*, Nr. 9, September 1958
-  [JEZI00] Dieter von Jezierski, *Slide Rules – A Journey Through Three Centuries*, Astragal Press, Mendham, New Jersey, 2000

-  [KARP58] Walter J. Karplus, Walter W. Soroka, *Analog Methods – Computation and Simulation*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1958
-  [KETT57] E. Kettel, „Übersicht über die Technik der elektronischen Analogrechner“, in *Telefunken Zeitung*, Jg. 30 (Juni 1957), Heft 116, S. 129–135
-  [KLEY64] Adolf Kley, „Analogrechner“, in *Kybernetische Maschinen*, hrsg. von Helmar Frank, S. Fischer Verlag, 1964, S. 174–183
-  [LIGH66] L. Light, J. Badger, D. Barnes, „An Automatic Acoustic Ray Tracing Computer“, in *IEEE Transactions on Electronic Computers*, Vol. EC-15, No. 5, October, 1966, S. 719–725

-  [MCLE58] John H. McLeod, Suzette McLeod, „The Simulation Council Newsletter“, in *Instruments and Automation*, Vol. 31, December 1958, S. 1991–1997
-  [A4_45] N. N., *Das Gerät A4 Baureihe B, Teil III, Gerätebeschreibung V2*, OKH/Wa A/Wa Prüf, Anlage zu Bb.Nr 19/45 gK, 1.2.1945
-  [RA463_58] N. N., „Elektronischer Analogrechner RA 463/2“, Telefunken, AH 5.2 Apr. 58
-  [MBB] N. N., *MBB Simulation*, Firmenschrift Messerschmitt Bölkow Blohm GmbH, Unternehmensbereich Flugzeuge
-  [GEDA57] N. N., „New GEDA Power Dispatch Computer“, in *Instruments and Automation*, Vol. 30, February 1957, S. 179
-  [DO960] N. N., „Simulationssystem Dornier 960“, Dornier System GmbH

-  [PAYN55] Henry M. Paynter (Ed.), *A Palimpsest on the Electronic Analog Art*, printed by Geo. A. Philbrick Researches Inc., AD 1955
-  [STEIN] N. N., „Steinheil Schirmbildphotographie“, Steinheil Söhne GmbH (Optische Werke C. A.), München
-  [SVOB48] Antonin Svoboda, *Computing Mechanisms and Linkages*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1948
-  [TREN82] Fritz Trenkle, *Die deutschen Funklenkverfahren bis 1945*, AEG-TELEFUNKEN AKTIENGESELLSCHAFT, 1982, Anlagentechnik, Geschäftsbereich Hochfrequenztechnik
-  [USHA58] V. B. Ushakov, „Soviet Trends in Computers for Control of Manufacturing Processes“, in *Instruments and Automation*, December 1958, S. 1810–1813