

Humboldt-Universität zu Berlin

Seminar für Medienwissenschaft

SoSe 2008

**Der Analogcomputer als Medium  
der Zeitmanipulation**

Veranstaltung: Medienzeit als Provokation von  
Mediengeschichte

Dozent: Prof. Dr. Wolfgang Ernst

eingereicht von:

Teresa Busjahn  
teresa@busjahn.de

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Überblick Analogrechentechnik.....	4
2.1. Unterscheidung analoger und digitaler Rechentechnik.....	4
2.2. Meilensteine analoger Rechentechnik.....	6
3. Die A4-Rakete .....	10
3.1. Theoretische und technische Grundlagen der Raketensteuerung.....	10
3.2. Mathematische Grundlagen der Raketensteuerung.....	15
3.3. Die Raketensteuerung als Echtzeitsystem.....	17
4. Der Peenemünder Analogcomputer.....	19
4.1. Grundlegende Funktionsweise des Analogcomputers.....	19
4.2. Das Mischgerät.....	24
5. Analoge Gegen-Zeit.....	28
5.1. Das T-6.....	28
5.2. Das T-10.....	31
5.3. Das T-15.....	33
6. Schlussbetrachtung.....	34
7. Abbildungsnachweise.....	37
8. Bibliographie.....	38
8.1. Literatur.....	38
8.2. Webseiten.....	40

## 1. Einleitung

Im Laufe des Zweiten Weltkrieges wurden im Bereich der analogen Rechentechnik bedeutsame Fortschritte erreicht. Dabei lösten diese Geräte nicht einfach nur Gleichungen, sondern historische Probleme. Sie trugen zudem zur Erforschung von Mensch-Maschine-Interfaces, Feedbackschleifen und Regelungstechnik bei, die inzwischen einen wesentlichen Teil der uns umgebenden Technik bilden.<sup>1</sup> Auch der Einsatz von Computern im Krieg ist mittlerweile Normalität geworden.<sup>2</sup>

Zentrales Thema dieser Arbeit ist die Implementierung von Zeit in Analogrechengern. Es werden vor allem die Möglichkeiten der Antizipation zukünftiger Lagen bzw. Positionen von Flugkörpern analysiert. Zunächst wird die Entwicklung der analogen Rechentechnik bis hin zum ersten elektronischen Analogcomputer betrachtet. Dieser wurde maßgeblich von dem deutschen Ingenieur Hoelzer<sup>3</sup> zur Steuerung und Laborerprobung der A4<sup>4</sup>-Rakete entwickelt und später zu einem Universalcomputer erweitert, der zur Lösung von Differentialgleichungen eingesetzt wurde. Ein entscheidendes Konzept hierfür ist der Phasenvorlauf. Anschließend werden die in den USA zur Flugabwehr entwickelten mechanischen bzw. elektromechanischen Spezialanalogcomputer T-6, T-10 und T-15 betrachtet.

Sowohl für die Steuerung der Rakete als auch für die Flugabwehr mussten Berechnungen in Echtzeit durchgeführt werden. Hierfür war eine enorme Rechengeschwindigkeit nötig, welche nur von Analogcomputern geleistet werden konnte. Digitalcomputer erzielten diese Qualitäten erst Jahre später.<sup>5</sup>

Wann immer eine Maus bewegt oder eine Simulation auf einem Digitalcomputer durchgeführt wird, zeigt sich auch bei heutigen Computern noch die Philosophie des Analoggen und Spuren früherer Technologien wie mechanischer Analoggeräte und Radare.<sup>6</sup> Darüber hinaus finden Analogcomputer auch heute noch spezielle Anwendungen.

---

1 Vgl. Mindell 2002, S. 12 und S. 317

2 Siehe Bernhardt/Ruhmann

3 Hoelzer schrieb später seine Dissertation über den Analogcomputer und bekam den ersten Dokortitel im Bereich der elektronischen Informatik verliehen. (Vgl. Tomayko, S. 236)

4 Die A4-Rakete wurde später von Reichspropagandaministerium in „Vergeltungswaffe 2“ (V2) umbenannt. (Vgl. Lange, S. 340). Hier wird die neutralere Typenbezeichnung A4 beibehalten.

5 Vgl. Lange, S. 325 und Reisig, S. 385

6 Vgl. Mindell 2002, S. 319 und S. 321

## 2. Überblick Analogrechentchnik

### 2.1. Unterscheidung analoger und digitaler Rechentechnik

Die analoge Rechentechnik ist durch eine kontinuierliche Arbeitsweise gekennzeichnet. Dafür werden mathematische Variablen in physikalische Größen übertragen. Nach Hartree können derartige Geräte auch als Instrumente bezeichnet werden. Der Term „analog“ bezieht sich zudem auf die Äquivalenz von Struktur bzw. Verhalten des Rechengeräts mit einem zu untersuchenden System. So sind das mechanische und elektrische Schwingungssystem in Abb. 1 in ihrer Struktur und ihrem Verhalten analog. Somit kann das elektrische Netzwerk als Simulation des mechanischen Pendels herangezogen werden, welche die Schwingungsgleichung in Echtzeit mit unterschiedlichen Koeffizienten und Anfangswerten lösen kann.

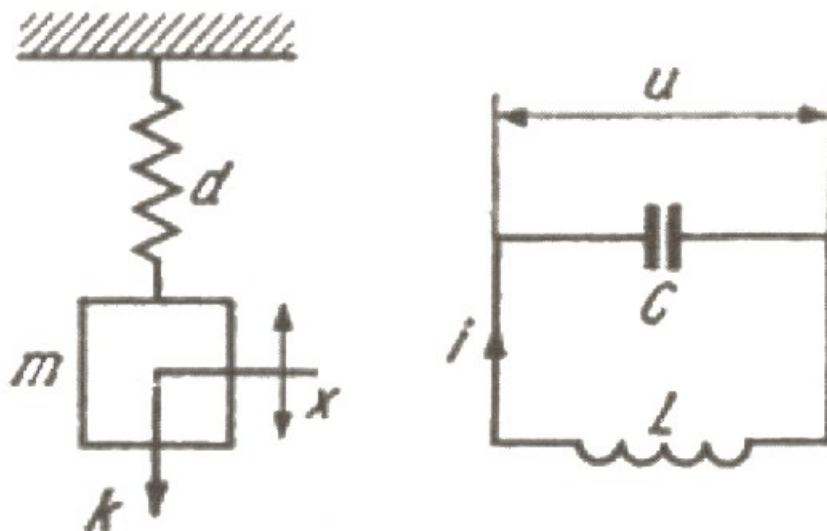


Abb. 1: Mechanisches und elektrisches Schwingungssystem

Bei mechanischen Analogrechengeräten erfolgt die Darstellung der Variablen im Wesentlichen durch Strecken und Drehwinkel von Getrieben. Mithilfe von geradlinigen und Drehbewegungen werden dann die Rechenoperationen durchgeführt. In elektronischen Analogrechengeräten werden die Variablen durch Spannungen und die Zeit repräsentiert. Zur Ausführung der Rechenoperationen wird ein implementiertes physikalisches Modell eingesetzt.

Digitale Rechengeräte, Hartree nennt sie Maschinen, arbeiten diskret. Die Repräsentation der mathematischen Größen wird dabei durch digitale Ziffern realisiert. Bei mechanischer Arbeitsweise gibt die Anzahl der Zähne spezieller Zahnräder oder Zahnstangen die Ziffer an. Die Rechenoperationen erfolgen wie bei mechanischen Analoggeräten durch geradlinige und Drehbewegungen. Elektromechanische bzw. elektronische Digitalrechengeräte generieren so-

wohl die Ziffern, als auch die Rechenoperationen durch Impulsfolgen oder Magnetisierungszustände von Relais, Röhren, Transistoren etc.

Digitale Rechengeräte zeichnen sich gegenüber Analoggeräten durch eine höhere Genauigkeit aus. Allerdings können sich hier, bedingt durch die begrenzte Stellenzahl, Rundungsfehler aufsummieren. Analogcomputer arbeiteten dagegen lange Zeit schneller als Digitalcomputer, sind jedoch weniger frei programmierbar. So können sie bspw. keine Buchstaben verarbeiten. Auch die Bearbeitung audiovisueller Medien ist nur eingeschränkt möglich.<sup>7</sup>

Das Analoge und das Digitale stehen in enger Beziehung zueinander. Beide Konzepte dienen zur Abbildung der Welt in Maschinen und entstanden parallel zueinander. Auch wenn Analogcomputer ihre Blütezeit in den 1950er und 60er Jahren hatten und heute vielfach als obsolet angesehen werden, haben sie durchaus noch Einsatzgebiete und wurden nicht einfach durch digitale Systeme ersetzt. Analoge Rechengeräte stehen den von ihnen zu lösenden Problemen näher, sie sind in gewisser Weise natürlicher. In der digitalen Technik ist die bauliche Struktur des Geräts dagegen von seiner Funktion getrennt. Die strukturelle Nähe des Analogrechners zum Problem, das er löst und das Verhältnis zu digitaler Technik wirft nach wie vor interessante Fragestellungen auf.<sup>8</sup>

Die hier skizzierte Unterscheidung analoger und digitaler Rechentechnik soll nicht darüber hinweg täuschen, dass letztendlich immer eine analoge Technologie zu Grunde liegt. Die ständig steigende Taktfrequenz digitaler Computer macht dies besonders deutlich, da hier das Verhältnis der Flankenzeit zur eigentlichen Signaldauer ansteigt, die (Pseudo-)Rechteckwelle mit Werten von 0 und 1 sich somit immer mehr einer Sinuskurve annähert, bei der die Extremwerte als Trigger wirken.<sup>9</sup>

Erweitert man den Kontext dieser Überlegungen, so betritt man den philosophischen Problembereich der Frage der Kontinuität: Ist Realität (und damit auch Zeit) kontinuierlich (wie kann dann Neues entstehen) oder diskret (wo ist dann die Realität in den Zwischenräumen)? Diese Problematik und potentielle Lösungsansätze wie bspw. fraktale Grenzwerte können an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.<sup>10</sup>

---

7 Vgl. Ernst, S. 26; Fischer, S. 106 f. und 110; Hartree, S. 1 - 3; Krause, S. 1 und Tomayko, S. 227

8 Vgl. Mindell 2002, S. 7, S. 10, S. 295 und S. 318 f.

9 Vgl. Ernst, S. 20

10 Zu den philosophische Grundmauern derartiger Überlegungen siehe bspw. Eisenhardt et al.

## 2.2. Meilensteine analoger Rechentechnik

Die Anfänge analoger Rechengeräte finden sich bereits vor dem Beginn unserer Zeitrechnung. Um ca. 80 v.Chr. entstand mit dem Räderwerk von Antikythera ein erster Analogrechner, mit dem die Bewegung der Himmelskörper bestimmt werden konnte. Es stellt nicht nur ein Kalender-Rechengerät, sondern auch das erste Planetengetriebe dar.



*Abb. 2: Nachbildung des Antikythera-Mechanismus*

Die ab etwa 700 existierenden Astrolabien sind zweidimensionale Himmelsgloben und bilden die Positionen von Sternen und Planeten ab. Sie wurden zur Navigation, aber auch für astrologische Weissagungen verwendet. Ab dem 14. Jahrhundert wurden aufgrund der entwickelten Feinmechanik astronomische Uhren möglich, die neben astronomischen Daten wie dem Sonnenzyklus auch Kalender-Informationen wie das Jahr lieferten.



*Abb. 3: Astrolabium*

Etwa drei Jahrhunderte später kamen mit den Proportionalzirkeln Geräte auf, mit denen Berechnungen auf Strecken und Streckenverhältnissen verschiedener Skalen übertragen werden konnten. Zudem vereinfachten logarithmische Rechenschieber, Rechenwalzen und Rechen-

scheiben Operationen wie die Multiplikation sowie den Umgang mit trigonometrischen Funktionen.

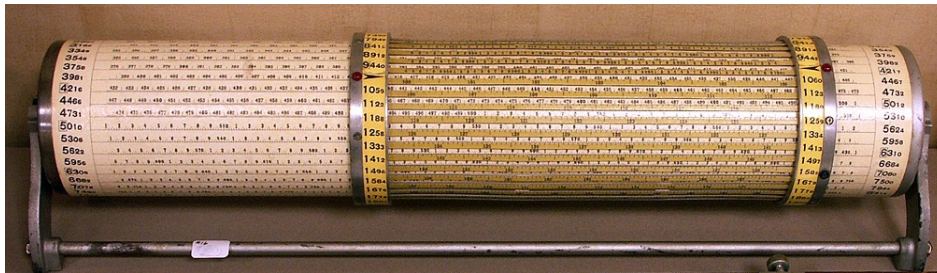


Abb. 4: Rechenwalze

Im 19. Jahrhundert konnten mit Planimetern und Integraphen bestimmte bzw. unbestimmte Integrale berechnet werden. Da hierbei frühere Werte berücksichtigt werden, verfügen sie in gewisser Weise über einen Speicher. Es wurden verschiedene Integrationsmechanismen entwickelt, wie die Kombination aus einer Scheibe und einem Rad, die später in den Differential Analyzern Anwendung findet (s.u.).

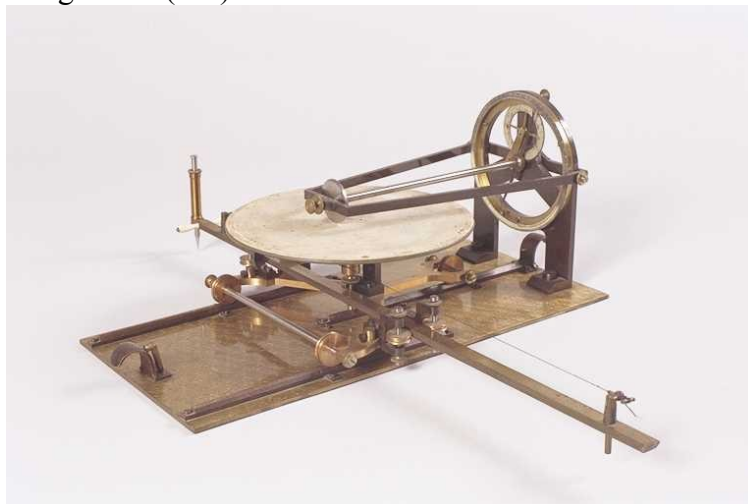


Abb. 5: Scheibenplanimeter

In den 1870er Jahren beschäftigte sich Lord Kelvin mit solchen Integrationsmechanismen und entdeckte, dass sie sich durch Feedbackschleifen zum Lösen von Differentialgleichungen eignen. Mit einer solchen Reihe von Integratoren ließen sich prinzipiell Gleichungen beliebiger Ordnung lösen, ein derartiges Gerät ließ sich jedoch zu dieser Zeit noch nicht realisieren. Kelvin war zudem an der Entwicklung von harmonischen Analysatoren und Synthesatoren beteiligt, die auf einer Sequenz periodischer Funktionen mittels Sinus- bzw. Kosinus nach Fourier arbeiteten.

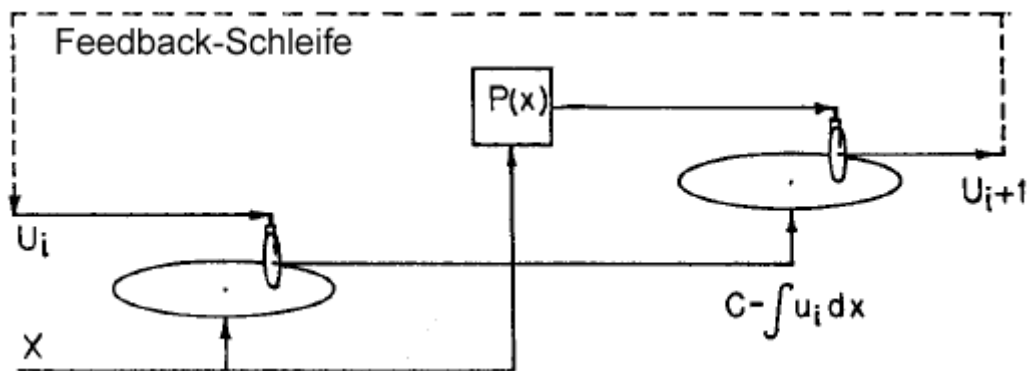


Abb. 6: Konzept zur Lösung einer Differentialgleichung zweiter Ordnung nach Kelvin

Einen der bedeutendsten Vorgänger des elektronischen Analogcomputer stellt der um 1930 entwickelte Differential Analyzer dar, ein Instrument, das zunächst rein mechanisch Differentialgleichungen auswertet. Er beruht auf dem Konzept Lord Kelvins, löst jedoch mittels eines Drehmomentverstärkers das Problem der zu geringen Reibung von Scheibe und Rad. Erste Geräte wurden von Bush und Hartree gebaut. Spätere Aufbauten verfügten über elektrische Verbindungselemente, die zentralen Recheneinheiten blieben jedoch mechanisch. Während frühere analoge Rechengерäte im Wesentlichen nur eine feste Funktion ausführen konnten, lässt sich der Differential Analyzer für eine Vielzahl von Problemstellungen umprogrammieren.

Differential Analyzer arbeiten im Allgemeinen mit einem vertikal aufgestellten Rad, das von einer horizontalen Scheibe angetrieben wird. Der Abstand  $y$  zwischen dem Rotationszentrum der Scheibe und dem Kontaktpunkt mit dem Rad ist variierbar. Wird nun die Scheibe  $x$ -mal gedreht, bewegt sich das Rad aufgrund der Reibung ebenfalls. Die Umdrehungen des Rades bilden die Ausgabe des Integrators.

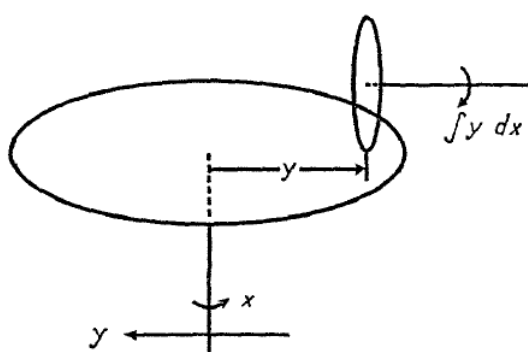


Abb. 7: Integrationsmechanismus des Differential Analyzer schematisch und fotografisch



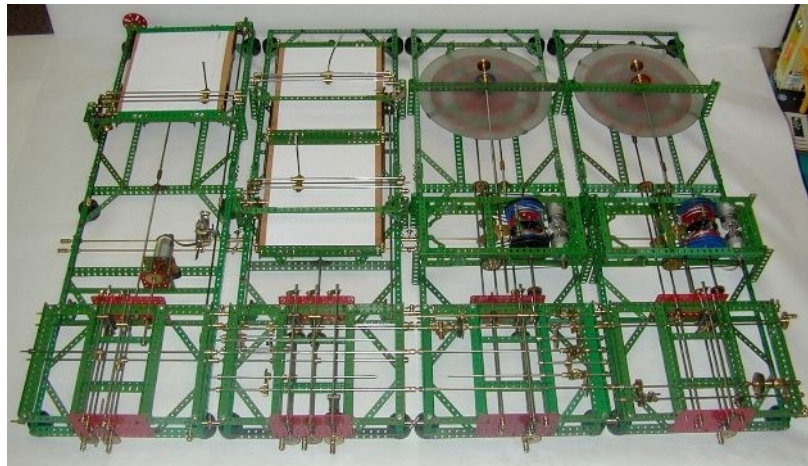


Abb. 8: Differential Analyzer mit zwei Integratoren

Bushs Differential Analyzer konnte bereits Integrationen sechsten Grades mit 0,1 % Genauigkeit durchführen und wurde für eine Vielfalt von Bereichen, wie Geologie und Elektronik, eingesetzt. Er stellt einen wichtigen Schritt in der Entwicklung von universellen Rechengeräten dar.<sup>11</sup> Mindell unterstreicht die Bedeutung des Differential Analyzer: „The differential analyzer produced more than answers and graphs; it enacted the world's continuous mathematics in a concrete machine.“<sup>12</sup> Hier wird implizit eine analoge Realität vorausgesetzt.

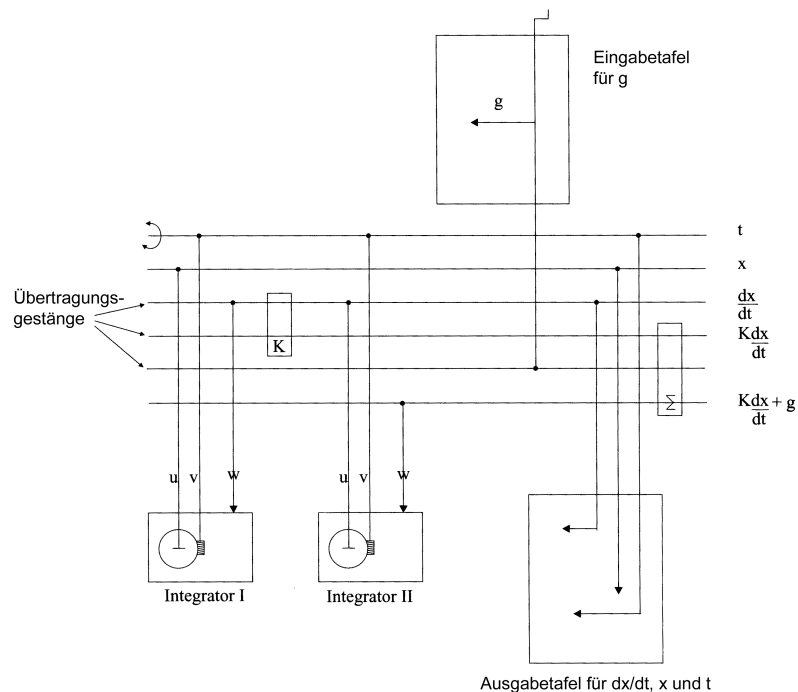


Abb. 9: Differential Analyzer Aufbau zum Lösen der Gleichung

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + g = 0$$

11 Vgl. Hartree, S. 5 f.; Krause, S. 1 f.; Mindell 2002, S. 157 - 160 und Bromley, S. 163 - 185  
 12 Mindell 2002, S. 161

### 3. Die A4-Rakete

#### 3.1. Theoretische und technische Grundlagen der Raketensteuerung

Das A4-Gerät stellt eine Flüssigkeitsrakete dar. Sie startet zunächst vertikal und neigt sich dann um etwa  $43^\circ$  in ihre Startrichtung. Nach einer vorbestimmten Zeit stoppt der Antrieb und die Rakete durchfliegt eine ballistische Flugbahn. Die Antriebsphase kann je nach angestrebter Weite bis zu 68 Sekunden dauern. Die Rakete kann eine Distanz von bis zu 320 km überwinden. Die größten erreichten Gipfelhöhen betragen sogar über 120 km, das A4-Gerät drang somit bis in die Heterosphäre ein.

Anders als bei Geschossen wird die Pfeilstabilität des A4-Geräts nicht durch Drall, sondern durch feste Flossen erreicht, dabei muss der zentrale Angriffspunkt aerodynamischer Kräfte  $L$  hinter den Raketenschwerpunkt  $S$  verlagert werden (siehe Abb. 10). Der Kraftstoffverbrauch verursacht eine Masseverringern und eine Verschiebung von  $S$ , so dass die anfängliche Pfeilstabilität nicht ausreicht, um die Flugbahn zu halten. Zudem kann die Rakete durch externe Einflüssen wie bspw. Wind von ihrer Sollflugbahn und -lage abgebracht werden. Durch einen fehlerhaften Neigungswinkel oder Brennschlusszeitpunkt könnte die tatsächliche Flugbahn jedoch stark von der berechneten abweichen. Um diesen Abweichungen entgegen zu steuern und nach dem Start die Neigung der Rakete zu veranlassen, ist eine Steuerung nötig. Während der Brennphase werden Abweichungen mittels einer Kombination aus bordseitigem inertialen Steuersystem und bodenfester Fernsteuerung über einen Leitstrahl ausgeglichen. Dazu werden die mittels Servomotoren angetriebenen Ruder so ausgelenkt, dass sie den Fehllagen entgegenwirkende Kräfte und Momente erzeugen. Im Verlauf der Freiflugphase erfolgt keine Steuerung.

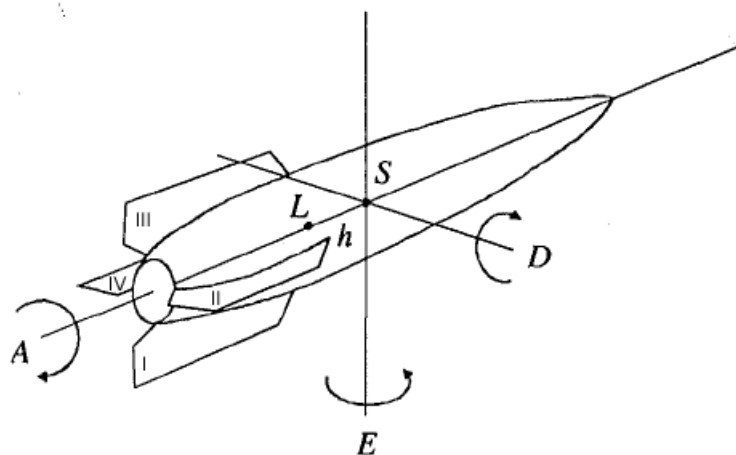
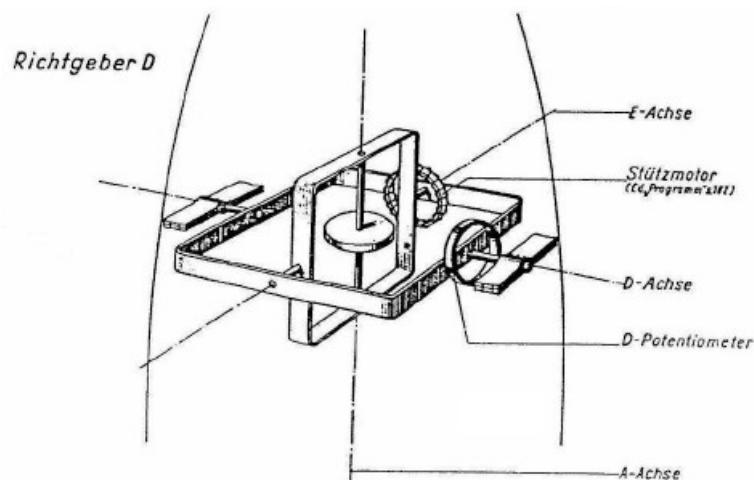


Abb. 10: Lageachsen und Flossennummerierung

Das Steuerungssystem der Rakete umfasst zwei Komponenten. Der „innere Bereich“, die eigentliche Steuerung, umfasst Drehungen um die drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen A (Längsachse), D (Querachse) und E (Hochachse), welche durch das bordeigene inertielle Kreiselgerät ausgeglichen werden. Es können drei Arten von Drehungen auftreten. Beim „Nicken“ dreht sich die Rakete um die D-Achse. Das „Gieren“ erfolgt um die E-Achse, so dass sich von oben gesehen eine Drehung nach links oder rechts um den Raketenschwerpunkt ergibt. Rolllt die Rakete nach links oder rechts um ihre A-Achse, wird dies als „Drallen“ bezeichnet (siehe Abb. 10). Der „äußere Bereich“, die Navigation, betrifft dagegen das Verschieben des Raketenschwerpunkts in horizontaler Richtung, bspw. durch Seitenwind. Auf die Abweichungen wird mittels einer Fernsteuerung mit Leitstrahlbordanlage reagiert, welche während der Antriebsphase mit der Leitstrahlbodenanlage verbunden ist.

Der Winkel, mit dem sich die Rakete um eine Achse dreht wird als Lagewinkel  $\varphi$  bezeichnet. Um solche Abweichungen von der Solllage messen zu können, muss eine Null-Abweichung festgelegt werden. Da keine erdfesten Bezugspunkte genutzt werden können, muss das Bezugssystem bordeigen sein. Hierfür werden schnell drehende Kreisel verwendet. Damit sie raumfest in der frei beweglichen Rakete gelagert werden können, wird eine Kardanaufhängung eingesetzt. Der Kreisel befindet sich in zwei um  $90^\circ$  versetzten Ringen, wobei der äußere Ring raketenfest gelagert ist. Die Rakete kann so dreidimensionale Drehungen um den Kreisel ausführen. Das A4 verfügt über zwei solcher Richtgeber oder auch Gyroskope genannten Kreiselssysteme. Der Richtgeber D wird als Horizont bezeichnet, der Richtgeber EA als Vertikant. Der jeweilige Abweichungswinkel  $\varphi$  wird an den Ringpotentiometern abgegriffen.<sup>13</sup>



13 Vgl. [http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 13, S. 18 und S. 173 f. (abgerufen am 28.10.2008); Lange, S. 340 - 342; Huzel, S. 168; Kuhlmann, S. 145 und Reisig, S. 147 f., S. 150 f., S. 201 und S. 337

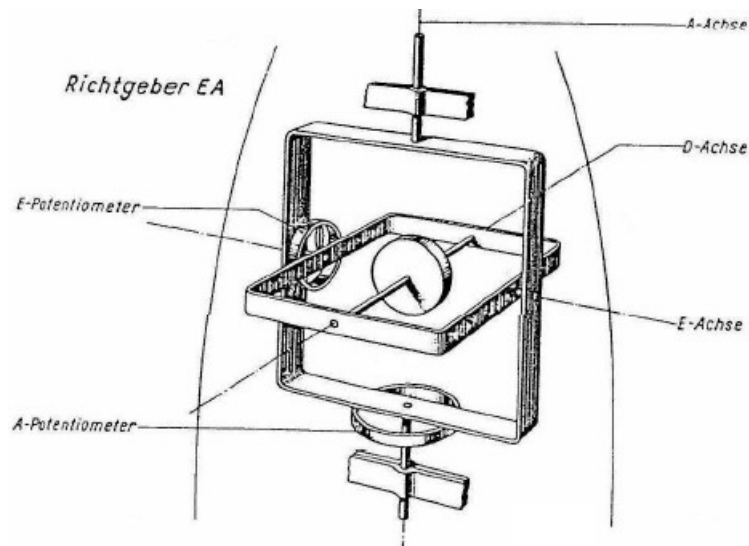


Abb. 11: Gyroskope (schematisch)

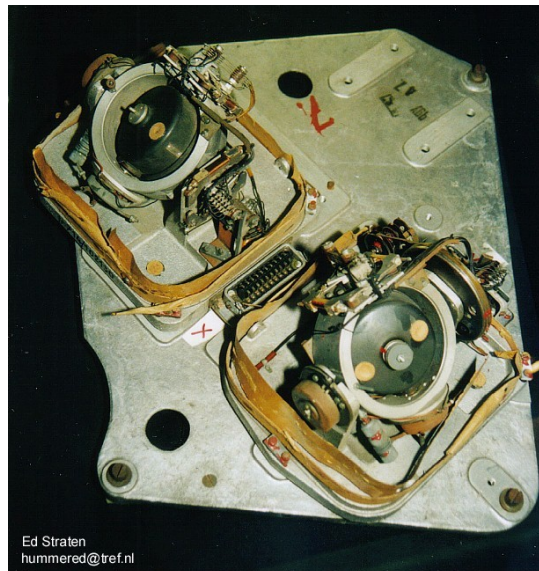


Abb. 12: Gyroskope (fotografisch)

Um eine stabile Steuerung zu erreichen, d.h. ein Aufschaukeln der Störung um den Winkel  $\varphi$  zu vermeiden, reicht es nicht, eine dem Fehlwinkel entgegengesetzte Ruderbewegung zu veranlassen. Befindet sich die Raketenspitze während des Pendelns links, läuft die Rudermaschine nach rechts aus, um das A4 wieder in die Solllage zu bringen. Es kehrt daraufhin in seine Nulllage zurück. Solange sich die Spitze noch links befindet, bekommt die Rudermaschine jedoch den Befehl zum Weiterauslaufen, so dass die Rakete nicht in der Nulllage bleibt, sondern aufgrund ihres Schwungs und der ausgelenkten Ruder nach rechts pendelt. Die Ruder stehen nun solange auf der falschen Seite, bis die neue Fehllage erfasst und die Ruder entsprechend der Kommandos auf ihre Nullstellung und anschließend auf die andere Seite gedreht wurden. So vergrößert sich der Ausschlag der Spitze bei jedem Richtungswechsel (Abb. 14, Fall a).

Die Steuerung läuft zeitlich der Messung der Abweichung hinterher, so dass diese sich aufschaukelt. Die Rudermaschine muss somit den Befehl zum Zurücklaufen schon bekommen, bevor die Raketenspitze die Nulllage erreicht hat. Es ist also eine Antizipation der Raketenlage nötig, um instabile und indifferente Steuerungszustände zu vermeiden (siehe Abb. 13).

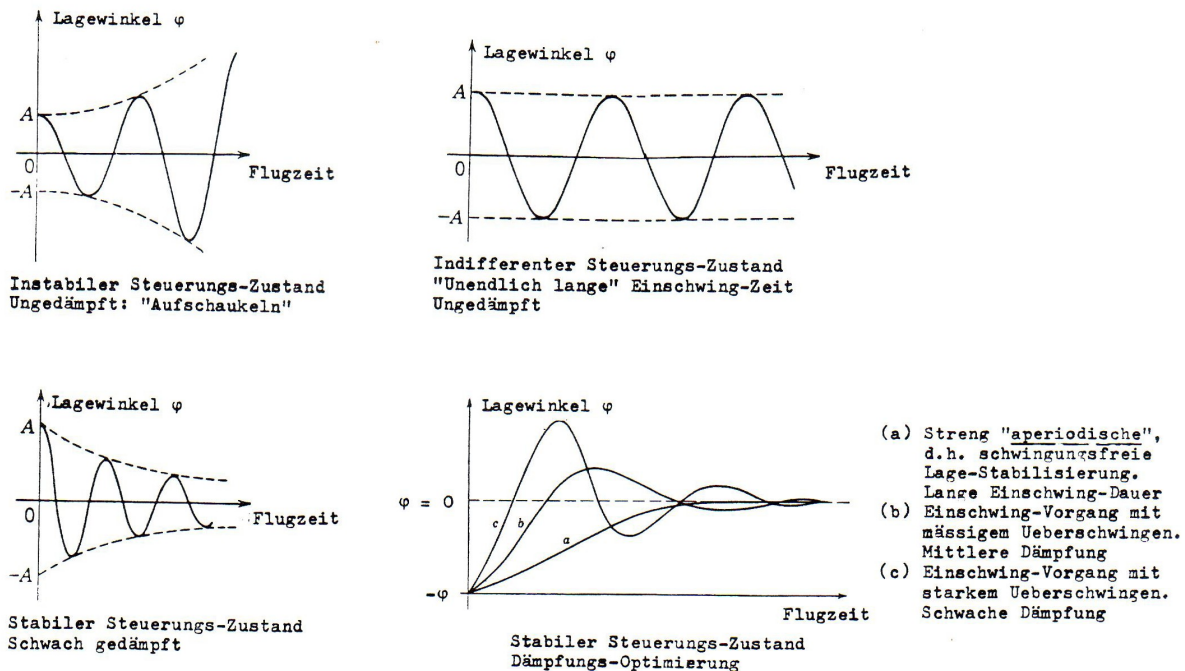


Abb. 13: Steuerungszustände

Die durch das Voreilen des Ruderstroms vor der Raketenschwingung entstehenden sinusförmigen Schwingungen werden als voreilende Phasenverschiebung bezeichnet (Abb. 14, Fall b). Dies wird erreicht, indem das Richtgeber-Kommando im Mischgerät zweimal differenziert wird. So geht nicht nur der Fehlwinkel selbst, sondern auch die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung, mit der sich die Rakete in die Fehllage bewegt, in die Steuerung ein. Ändert sich der Winkel laufend, ändert sich auch die von den Richtgebern gelieferte Spannung, deren Differential als Entsprechung der Winkelgeschwindigkeit zur Dämpfung genutzt wird. Die Winkelgeschwindigkeit wird ebenfalls differenziert, um auch die Winkelbeschleunigung zur Dämpfung einzusetzen.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Vgl. [http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 181 f. (abgerufen am 28.10.2008) und Holzer 1994, S. 72

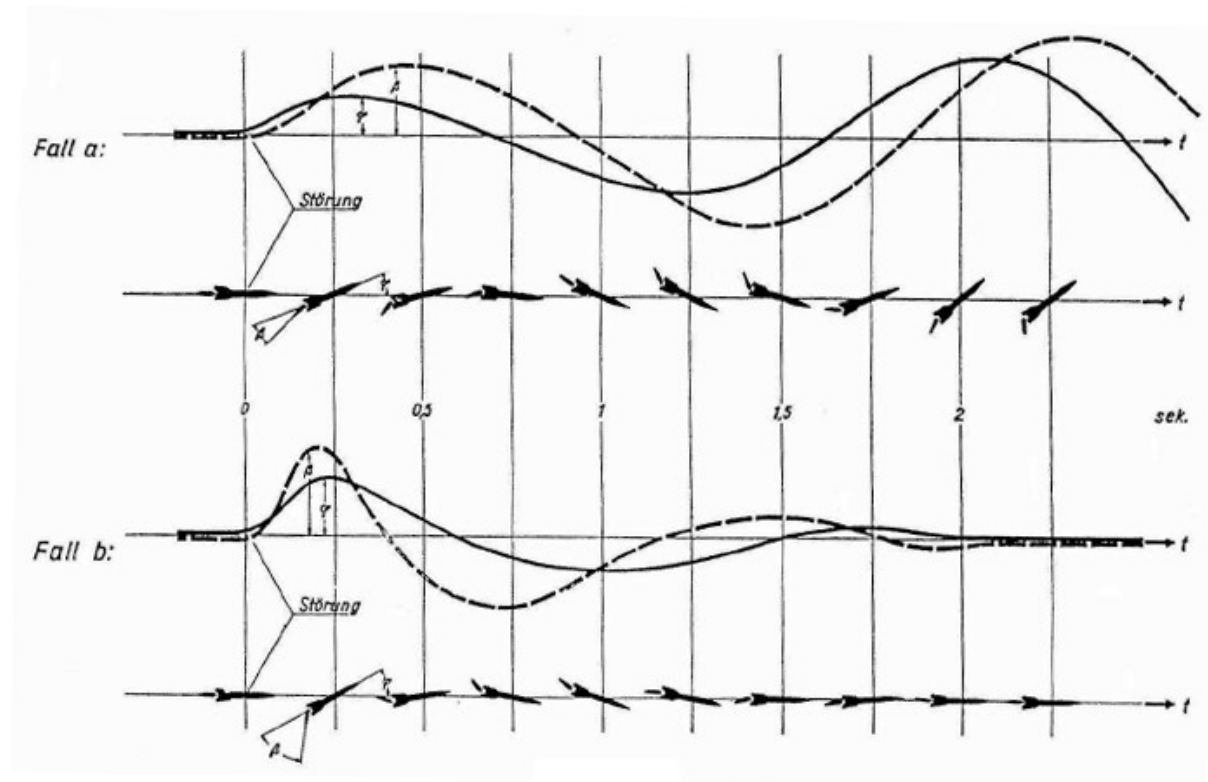


Abb. 14: Instabiler und stabiler Steuerungszustand

Fall a: Die Pendelbewegung des Geräts verläuft aufschaukelnd. Ruderstrom verläuft proportional dem Fehlerwinkel, Ruderstellung eilt infolge der Trägheit der Rudermaschine nach

Fall b: Die Pendelbewegung des Gerätes verläuft abklingend. Ruderstrom und Ruderwinkel eilen dem Fehlerwinkel  $\varphi$  voraus

Die Kreisel-Kurssteuerung kann jedoch auf einige Kräfte, wie z.B. Seitenwind, nicht reagieren. Sie wurde daher durch eine überlagerte Funk-Fernsteuerung ergänzt. Hierdurch wurde es möglich, eine seitliche Kursabweichung ohne Winkeländerung zu detektieren. Solche Abweichungen wurden in entsprechende Abweichungswinkel umgerechnet und in die Steuerung einbezogen.

Das Mischgerät führt die ermittelten Abweichungen zusammen und steuert die Ruder. Der Name Mischgerät stammt diesem Mischen der verschiedenen Signale. Die Ruder der Flossen I und III lenken sowohl um die A- wie auch die E-Achse und reagieren auf seitliche Abweichungen. Laufen sie gegenläufig aus, erfolgt eine Drehung um die A-Achse, beim synchronen Auslaufen wird um die E-Achse gesteuert. Die Ruder II und IV arbeiten stets gleichläufig und führen um die D-Achse.<sup>15</sup>

Die Rakete verfügt zudem über ein Zeitschaltwerk (ZSW), welches zeitabhängige Prozesse lenkt und zu bestimmten Zeitpunkten Schaltvorgänge auslöst. Es umfasst eine Schaltwalze

<sup>15</sup> Vgl. Hoelzer 1994, S. 72 und S. 77 und Lange, S. 346

mit aufliegenden Kontaktfedern, welche mittels eines drehzahleregelten Gleichstrommotors über ein Untersetzungsgetriebe angetrieben wird. Das Getriebe dreht eine Nockenwelle, welche die Kontaktfedern schaltet.

Die Schussweite wird durch den Neigungswinkel und die Geschwindigkeit beim Brennschluss bestimmt. Nach dem Start fliegt die Rakete zunächst 4 Sekunden lang senkrecht und wird dann, gesteuert durch das ZSW, mit festgelegten Winkelgeschwindigkeiten um die D-Achse geneigt, bis sie nach 52 Sekunden den bestimmten Abgangswinkel erreicht. Diese Winkelgeschwindigkeiten werden als Umlenkprogramm bezeichnet. Um die Rakete möglichst geringer aerodynamischer Beanspruchung auszusetzen, ist die Winkelgeschwindigkeit nicht konstant, sondern wird mit zunehmender Höhe kleiner.

Diese Drehung wird durch einen Stützmotor am Richtgeber D erzeugt. Er veranlasst eine Rotation des Kreisels, als würde sich die Rakete in eine der gewünschten Richtung entgegengesetzte Fehllage bewegen. Über das Mischgerät werden entsprechende Steuerkommandos an die Ruder geleitet und die Rakete wird ausgelenkt. Das ZSW steuert den Stützmotor durch sequentielle Vorwiderstände, welche die dem Umlenkprogramm adäquaten Stromstärkeänderungen veranlassen.<sup>16</sup>

### 3.2. Mathematische Grundlagen der Raketensteuerung

Um den Flug der Rakete zu stabilisieren, sind mehrere Formeln<sup>17</sup> relevant. Diese in Peenemünde entwickelte allgemeine Steuerungstheorie findet noch immer Anwendung bei der Konzeption selbstgesteuerter Flugkörper.

Die **Steuergleichung** bildet die Relation der Lagewinkel der Achsen zu den Auslenkungswinkeln der Stellruder ab. Tritt an einer Achse eine Abweichung des Lagewinkels auf, werden anhand dieser Gleichung die Ruderbewegungen bestimmt, durch deren Steuermomente die Rakete in die Soll-Lage zurückkehrt.

$$(1) \quad M_0 \beta + M_1 \frac{d\beta}{dt} + M_2 \frac{d^2 \beta}{dt^2} = A_0 \varphi + A_1 \frac{d\varphi}{dt} + A_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

<sup>16</sup> Vgl. [http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 186 und S. 195 f. (abgerufen am 28.10.2008) und Reisig, S. 441 - 443

<sup>17</sup> Die Schreibweise der Formeln unterscheidet sich je nach Quelle. Sie wurde vereinheitlicht und orientiert sich an den von Lange gelieferten Formeln.

Dabei bezeichnet  $\varphi$  den Lagewinkel,  $\frac{d\varphi}{dt}$  die Winkelgeschwindigkeit der Achsenlagenauslenkung,  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  die Winkelbeschleunigung der Achsenlagenauslenkung,  $\beta$  den Winkel der Ruderposition,  $\frac{d\beta}{dt}$  die Winkelgeschwindigkeit der Ruderauslenkung und  $\frac{d^2\beta}{dt^2}$  die Winkelbeschleunigung der Ruderauslenkung.

$M_0$ ,  $M_1$  und  $M_2$  sind Faktoren der Ruderwirksamkeit, sie werden durch die Konstruktion des jeweiligen Steuerungssystems bestimmt. Die als Aufschaltgrößen bezeichneten Koeffizienten  $A_0$ ,  $A_1$  und  $A_2$  indizieren, welches Gewicht die jeweilige Gleichungskomponente bei der Stabilisierung der Raketenlage innehat. Sie werden mithilfe von Stabilitätsanalysen berechnet. Die Steuergleichung wird für jede der drei Raketenachsen aufgestellt.

Das Gleichgewicht der Momente am Schwerpunkt des Raketenkörpers wird mit der **Momentengleichung** der Rakete repräsentiert.

$$(2) \quad T \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D \frac{d\varphi}{dt} + C_1\varphi + C_2\beta = 0$$

$T \frac{d^2\varphi}{dt^2}$  repräsentiert eine durch eine externe Störung verursachte Drehung der Rakete um ihrem Schwerpunkt, dabei ist  $T$  das Trägheitsmoment der Rakete, bezogen auf eine ihrer Achsen.  $D \frac{d\varphi}{dt}$  bezeichnet die aerodynamische Dämpfung der Raketendrehbewegung um ihren Schwerpunkt, wobei  $D$  der Dämpfungskoeffizient ist.  $C_1\varphi$  ist das aerodynamische Rückstellmoment an der Rakete,  $C_2\beta$  das Rückstellmoment der Ruder.  $C_1$  und  $C_2$  sind die Koeffizienten des jeweiligen Moments. Die Koeffizienten der Gleichung (2) ergeben sich aus der Raketenkonstruktion, der Flugbahn und dem Steuerungssystem.

Auch die Momentengleichung ist für alle drei Achsen erforderlich. Befindet sich die Rakete im Gleichgewicht, ist die Summe aller Momente für jede Achse gleich Null. Sowohl die Steuer- als auch die Momentengleichung sind ihrer analytischen Struktur nach Schwingungsgleichungen.

Die **Leitstrahlgleichung** bezieht sich auf das Verhältnis einer Seitenabweichung vom Winkel  $\varepsilon$  zur Ruderlaufgeschwindigkeit  $\frac{d\beta}{dt}$ .

$$(3) \quad E_{-1} \int \varepsilon dt + E_0\varepsilon + E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} = F \left( \frac{d\beta}{dt} \right)$$

Dabei wird neben  $\varepsilon$  selbst, die Abweichungswinkelgeschwindigkeit  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  zur Dämpfung des Steuerungsvorgangs eingesetzt. Zudem wird das als Isodrom bezeichnete Zeit-Integral der



Seitenabweichung  $\int \varepsilon dt$  einbezogen. Dies ist nötig, um permanenten Seitenwind, fehlerhafte Justierungen der Gyroskope, Verstärker und des Antriebssystems sowie die Varianz der Ruderkoeffizienten aufgrund des Ruderabrandes auszugleichen. Die Faktoren  $E_{-1}$ ,  $E_0$  und  $E_1$  werden zur Gewichtung der einzelnen Komponenten benötigt.<sup>18</sup>

Die im Mischgerät und bei der Simulation des A4-Geräts eingesetzte spezifische Bewegungsgleichung (6) ergibt sich durch eine Modifizierung der Steuergleichung (1) und ihrer Erweiterung mit der Leitstrahlgleichung (3). Die resultierende Formel setzt sich aus den drei Differentialgleichungen (3), (4) und (5) zusammen. Während die Funktion (4) die Lageabweichung  $\varphi$  behandelt, werden mithilfe der Funktion (5) die nötigen Ruderbewegungen zum Korrigieren der seitlichen Abweichung  $\varepsilon$  bestimmt.

$$(4) \quad A_0 \varphi + A_1 \frac{d\varphi}{dt} + A_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = A(\varphi)$$

$$(5) \quad M_1 \frac{d\beta}{dt} + M_0 \beta = E(\varepsilon)$$

So ergibt sich die folgende Bewegungsgleichung:

$$(6) \quad \beta + M_0 \frac{d\beta}{dt} + M_1 \frac{d^2 \beta}{dt^2} = A_0 \varphi + A_1 \frac{d\varphi}{dt} + A_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + E_{-1} \int \varepsilon dt + E_0 \varepsilon + E_1 \frac{d\varepsilon}{dt}$$

mit den Idealfall-Parametern  $A_0=10, A_1=4, A_2=3$  und  $E_{-1}=75, E_0=750, E_1=2250$ .<sup>19</sup>

### 3.3. Die Raketensteuerung als Echtzeitsystem

Während es bei Nicht-Echtzeitsystemen ausreicht, dass die Verarbeitung und die Resultate korrekt sind, gelten bei Echtzeitsystemen zusätzlich strikte Zeitbedingungen. „Gemäß DIN 44300 wird unter Echtzeitbetrieb bzw. Realzeitbetrieb der Betrieb eines Rechnersystems verstanden, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind“.<sup>20</sup> Echtzeitsysteme müssen daher verschiedene Bedingungen erfüllen. Erstens ist es nötig, dass sie die Ergebnisse **rechtzeitig** liefern. Zweitens müssen mehrere Aufgaben **gleichzeitig** unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitbedingungen verarbeitet werden können. Drittens müssen Echtzeitsysteme auf **spontan** auftretende interne und externe Ereignisse inner-

<sup>18</sup> Vgl. Hoelzer 1994, S. 72; Reisig, S. 209 - 213; S. 240 f. und S. 425 und Lange, S. 341 - 343

<sup>19</sup> Vgl. Lange, S. 343 f. und Hoelzer 1994, S. 89

<sup>20</sup> Wörn/Brinkschulte, S. 1

halb einer definierten Zeitspanne reagieren. Das System muss somit nicht nur logisch, sondern auch zeitlich korrekt arbeiten.<sup>21</sup>

Da die Position der A4-Rakete zum Brennschluss für die weitere Flugbahn zentral ist und nur etwa eine Minute zur Verfügung steht, um aus der senkrechten Startlage um eine bestimmte Gradzahl in die gewünschte Richtung geneigt zu werden und auftretende Störungen der Flugbahn zu kompensieren, werden an das Steuerungssystem harte Zeitanforderungen gestellt, es muss in Echtzeit arbeiten. Es handelt sich dabei um ein hybrides System. Während das Mischgerät analog arbeitet, gibt das ZSW zu diskreten Zeitpunkten Impulse. Die Steuerung erfüllt alle drei Voraussetzungen für Echtzeitsysteme. Die permanente Lageerfassung ermöglicht es, jederzeit auf Abweichungen zu reagieren. Sobald eine Winkeländerung auftritt, wird diese von den Potentiometern der Richtgeber erfasst und die Gegensteuerung veranlasst. Die Berechnung der benötigten Ruderstellungen erfolgt dabei völlig simultan. Generell liegt bei Analogcomputern mit Einschalten einer Spannungsquelle, beim A4 die Potentiometerabgriffe, die gesuchte Lösung vor.<sup>22</sup> Zudem arbeiten sie faktisch parallel. Elektronische Analogcomputer haben somit grundsätzlich das Potential, als Echtzeitsysteme eingesetzt zu werden. Dabei muss Echtzeit stets im oben definierten technischen Sinne verstanden werden. Tatsächlich treten während der Rechnung an verschiedenen Stellen Verzögerungen auf. Die real benötigte Zeit wird wesentlich von der Elektronengeschwindigkeit und systemimmanenten Reaktionsgeschwindigkeiten der Bauteile beeinflusst. Das Mischgerät bildet die Zeitlichkeit der Rakete in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ab, mischt und manipuliert sie in seinem eigenen Tempo und bewirkt dabei seine eigene Zeitlichkeit.

Die Bewegungsgleichungen der Rakete bilden das Prozessmodell des Mischgeräts und des Analogcomputers zur Simulation. Diese Gleichungen bilden das Verhalten der Rakete ab, befinden sich jedoch auf einer höheren Abstraktionsebene. Auch in anderen Echtzeitanwendungen werden oft Differentialgleichungen zur Modellierung kontinuierlicher Systeme verwendet, welche sich wiederum gut in Analogcomputern realisieren lassen. Im Bereich des Diskreten werden dagegen meist Automaten oder Petri-Netze eingesetzt.<sup>23</sup>

---

21 Vgl. Wörn/Brinkschulte, S. 1 und S. 318

22 Vgl. Fischer, S. 110

23 Vgl. Wörn/Brinkschulte, S. 9

## 4. Der Peenemünder Analogcomputer

Ein elektronischer Analogrechner ist „ein System universell einsetzbarer und steuerbarer elektronischer Baugruppen, die die Rolle von Rechenelementen übernehmen.“<sup>24</sup> Die Programmierung eines Analogcomputers ist die Anfertigung einer elektrischen Schaltung, die dem zu analysierenden System adäquat ist. Parameter, Anfangswerte etc. werden mit Potentiometern konfiguriert. Sobald die Spannungsquelle der Schaltung aktiviert wird, ist auch die gesuchte Lösung vorhanden. Analoge Computer konnten aufgrund ihrer hohen Rechengeschwindigkeit Echtzeitsysteme abbilden. Zusätzlich waren sie in der Lage, parallele Rechnungen auszuführen, was mit Digitalrechnern erst Jahre später möglich wurde.<sup>25</sup>

Das Mischgerät stellte zunächst einen Spezialanalogcomputer dar, der später zu einem voll-elektronischen Universalanalogcomputer weiterentwickelt wurde. Er wurde verwendet, um die ballistische Flugbahn der A4-Rakete zu simulieren, indem er deren Bewegungsgleichungen löste.<sup>26</sup>

Hoelzer unterstreicht den innovativen Charakter dieses Ansatzes: „Die Mathematiker jener Zeit waren der Meinung, daß Mathematik nicht aus Stangen besteht, und, nachdem der erste elektronische Analog Computer gebaut war, sagten sie: ‚aus Draht besteht die Mathematik auch nicht‘“.<sup>27</sup>

### 4.1. Grundlegende Funktionsweise des Analogcomputers

Für die Peenemünder Ingenieure war die Lösung der Bewegungsgleichung der Rakete (6) eine essentielle Problemstellung. Wie in Kapitel 3.1. beschrieben muss die zukünftige Lage der Rakete antizipiert werden, damit die Rudermaschine frühzeitig reagieren kann, um die Steuerungszustände stabil zu halten und das Aufschaukeln von Abweichungen zu verhindern. Die dafür benötigten Drehwinkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen, sowie Integrale werden sowohl in der Rakete, als auch für die Simulation elektronisch bestimmt. Die zentralen Elemente des Analogcomputers sind somit die Differentiatoren und Integratoren. Sie beruhen auf der Phasendifferenz von Widerständen und Kondensatoren.<sup>28</sup> In ihnen modelliert der Fluss der Elektronen die Parameter der Berechnung.

---

24 Fischer, S. 110

25 Vgl. Fischer, S. 108, S. 110 f. und S. 325 und Reisig, S. 385

26 Vgl. Lange, S. 323 und Fischer, S. 108

27 Hoelzer 1994, S. 71

28 Vgl. Reisig, S. 381 f.

Differentialgleichungen lassen sich aus den beiden Grundformen  $a_1 \frac{dy}{dt}$  und  $a_{-1} \int y dt$  bilden. Eine zu lösenden Differentialgleichung kann mit entsprechenden Bauelementen nachgebildet werden, die analog zu den Differentialausdrücken verbunden werden.<sup>29</sup>

Abb. 15 und 16 zeigen das Prinzip dieser Differentiatoren und Integratoren. Beim Differenzieren steuert der Messwert  $u_1$  eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand  $R_i = 0$ . Der Ladestrom des Kondensators ist im Idealfall direkt proportional zur zeitlichen Ableitung der angelegten Spannung. Folglich kann der Ladestrom als Lösung der Differentialgleichung  $\frac{du_1}{dt}$  betrachtet werden. Die Kapazität  $C$  des Kondensators entspricht dem Proportionalitätsfaktor.

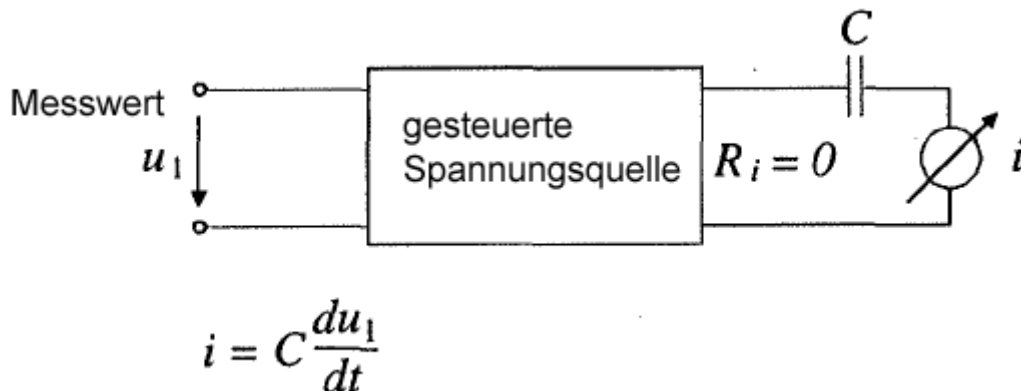


Abb. 15: Kondensator als Differentiator

Beim Integrieren wird eine steuerbare Stromquelle mit theoretisch unendlichem inneren Widerstand mit einem Kondensator verbunden. Die Klemmenspannung des Kondensators entspricht dem Integral des Messwerts  $u_1$ .

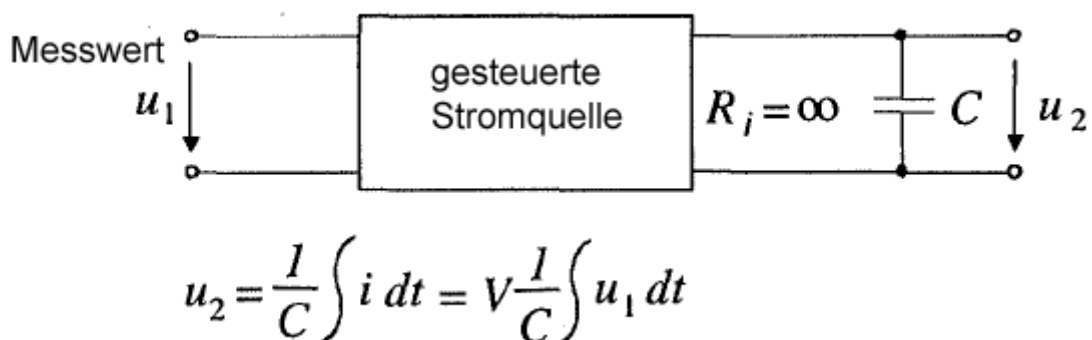


Abb. 16: Kondensator als Integrator

Die benötigten reinen Spannungs- und Stromquellen sind nicht leicht erhältlich. Solche „eingepägten“ Ströme dürfen nicht durch im Stromkreis vorhandene Gegenspannungen beein-

<sup>29</sup> Vgl. Hoelzer 1946, S. 5

flusst werden. Sie können erzeugt werden, indem eine Spannung zu dem Schaltkreis hinzugefügt wird, welche die Summe der an den Widerständen entstandenen Spannungen zu jedem Zeitpunkt kompensiert. An einem zusätzlichen Widerstand wird die so entstandene Spannung gemessen, verstärkt und mit umgekehrtem Vorzeichen zurück in die Schaltung eingeführt. Der resultierende Strom wird so nur durch den Kondensator bestimmt. Eingeprägte Spannungen können analog erzeugt werden.<sup>30</sup>

Die Differentiator- und Integrator-Einheiten in den Peenemünder Analogcomputern bestanden letztlich aus je einem dieser RC-Schaltkreise und zwei Verstärkerstufen in einem Gehäuse. Zur Differenzierung bzw. Integration wird Gleichstrom benötigt. Jedoch standen zu der Zeit keine adäquaten Verstärker zur Verfügung. So wurde mit Wechselstrom gearbeitet und Elektronenröhren verwendet. Lediglich für das Differenzieren bzw. Integrieren erfolgte eine Gleichrichtung.

Dem eigentlichen Differentiator ist der Kondensator  $C_{gl}$  mit dem Vorwiderstand  $R_{gl}$  als Glättungseinheit vorgeschaltet, welcher die durch die Gleichrichtung entstandenen Oberwellen beseitigt. Der Einfluss des Widerstands  $R_{gl}$  auf die Differenzierung wird mittels Feedback aufgehoben. Der Kondensator  $C_{gl}$  hat im Vergleich zu  $C$  nur eine geringe Stärke ( $\sim 1/1000$ ) und führt somit nur zu einem geringen Fehler.

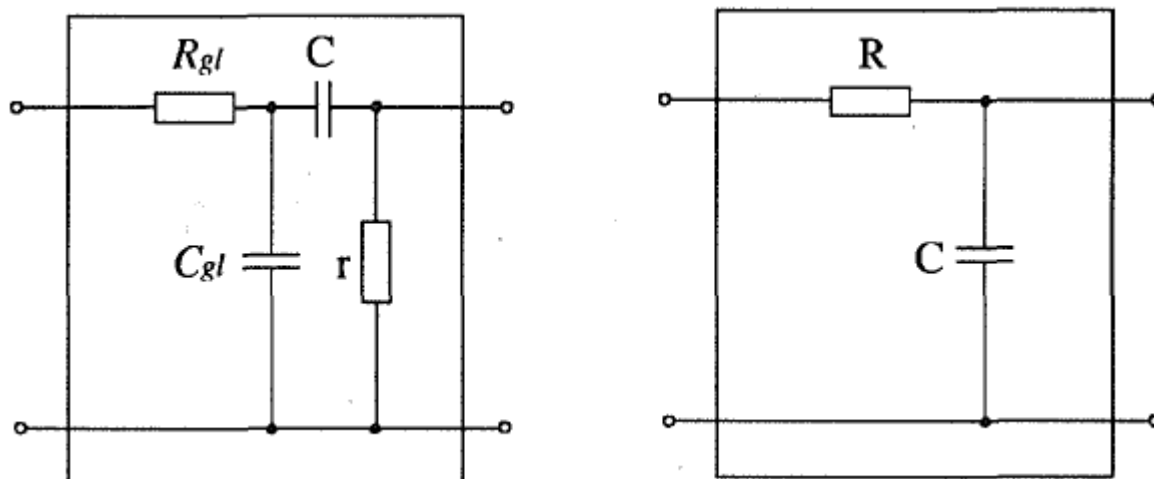


Abb. 17: RC-Schaltung zum Differenzieren bzw. zum Integrieren

Diese RC-Schaltkreise wurden mit Modulator- oder später mit Zerhackerverstärkern verbunden. Nach dem Differenzieren bzw. Integrieren erfolgte wieder eine Umwandlung in Wechselstrom, auch die Feedback-Schleife wurde damit realisiert.

30 Vgl. Hoelzer 1946, S. 6 - 9; Lange, S. 326 - 328 und Tomayko, S. 228

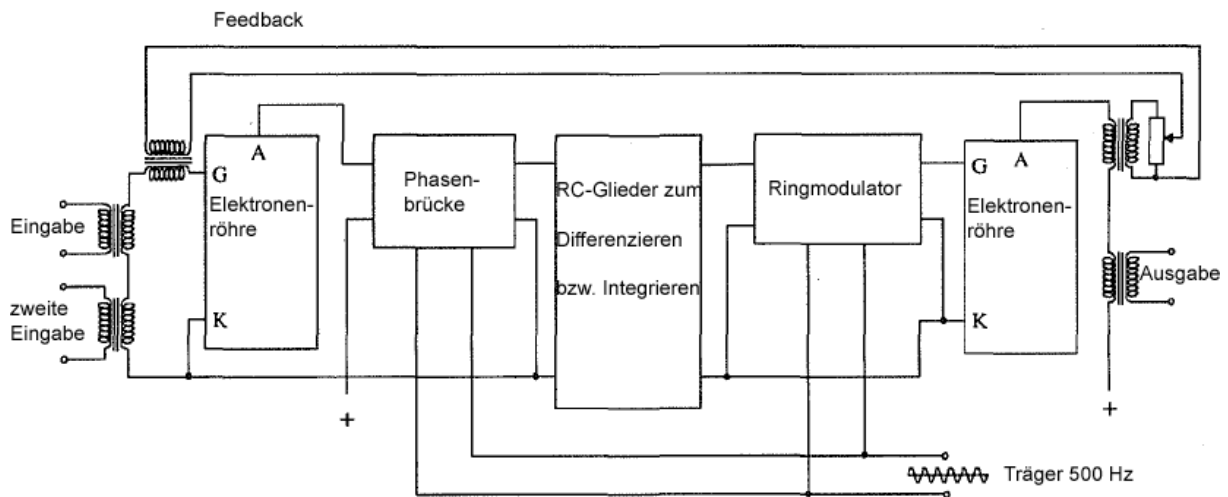


Abb. 18: Differentiator-/Integratoreinheit mit Modulator

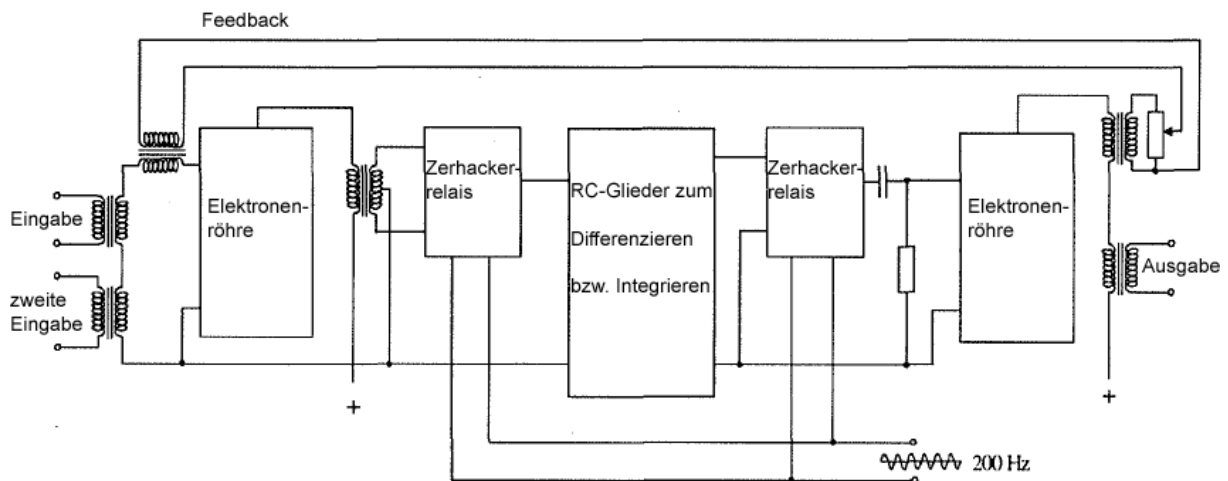


Abb. 19: Differentiator-/Integratoreinheit mit Zerhackerverstärker

Die Differentiator-/Integratoreinheiten in Abb. 18 und 19 können beliebig kombiniert werden und somit Differential- und Integralausdrücke höherer Ordnung abbilden. Für Ausdrücke zweiter Ordnung ergibt sich zudem die in Abb. 20 dargestellte Möglichkeit, zwei RC-Glieder direkt ohne Verstärker zu verbinden.<sup>31</sup>

31 Vgl. Hoelzer 1946, S. 11 - 13; Hoelzer 1994, S. 73 - 75 und Lange, S. 328 - 332

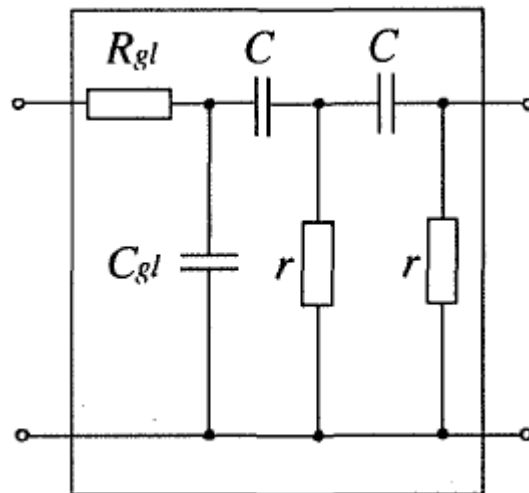


Abb. 20: RC-Schaltkreis für doppeltes Differenzieren

Um die Bewegungsgleichungen der Rakete zu lösen, also die Gleichungen in Hardware zu transformieren, wurden zudem elektronische Schaltkreise für zahlreiche Operationen wie Multiplikation, Division und Wurzelziehen entwickelt, die auf dem gleichen technischen Prinzip wie die Differentiatoren und Integratoren beruhen. Auch konnten mit einer Kurvenscheibe Funktionen von Funktionen abgebildet werden. Der Wert  $y(t)$  der ersten Funktion wird in die Steuerspule eines Leichtankermotors geleitet und durch die Rückführungsspule kompensiert, nachdem der Motor die Kurvenscheibe für die zweite Funktion  $f(y)$  eingestellt hat. Der damit verbundenen Funktionswert  $f(y(t))$  kann an einem Potentiometer abgegriffen werden. Auf diese Weise konnte eine Vielzahl von Differentialgleichungen betrachtet werden.<sup>32</sup>

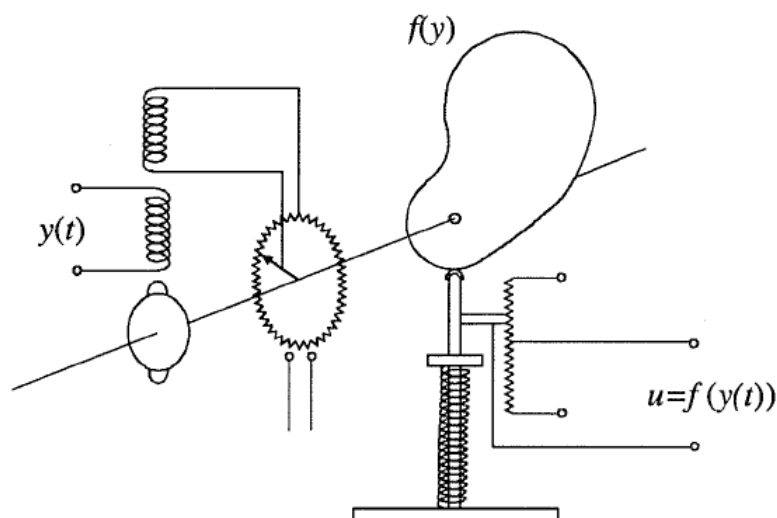


Abb. 21: Funktionen von Funktionen

32 Vgl. Hoelzer 1946, S. 38 f. und S. 48; Hoelzer 1994, S. 78 und Lange, S. 324 und S. 336 - 339

## 4.2. Das Mischgerät

Die Schaltungen für bordseitige und bodenfeste Steuerung werden im Mischgerät zusammengeführt. Es stellt den ersten Bordcomputer dar. Die Abweichungen der drei Achsen werden von den Potentiometern der Gyroskope geliefert und in das Kontrollelement geleitet. Entsprechend der jeweiligen Gleichung findet durch die RC-Glieder eine Phasenverschiebung statt. Die entstehende Spannung wird verstärkt und treibt die öl-hydraulischen Servomotoren an, welche die Ruder steuern.<sup>33</sup> Durch das Mischgerät wird auch das Aufschaukeln der Pendelbewegung, welches durch die direkte Weiterleitung der Kommandospannungen der D-, E- und A-Potentiometer als Steuerströme an die Rudermaschine entstünde (siehe Abb. 14, Fall a) verhindert.

Ursprünglich wurde für das Differenzieren der Lagewinkel an jeder Raketenachse je ein Wendekreisler eingesetzt. Diese stellten sich jedoch als instabil heraus. Ihre Potentiometerabgriffe entstehen durch Bürsten aus Bronzedraht. Diese werden jedoch von den Triebwerkserschütterungen zum „Tanzen“ gebracht, d.h. sie heben sich oszillierend von der Potentiometerwicklung ab und verursachen so ein elektrisches Rauschen. Es kommt zu arbiträren Stromstößen, so dass kein stabiles Steuern möglich ist. Der Umstand, dass die mechanische Bestimmung der Drehwinkelgeschwindigkeit und -beschleunigung nicht möglich war, führte letztlich zur Entwicklung des Analogcomputers.<sup>34</sup>

Seitenabweichungen werden über eine Verbindung des inertialen Leitsystems und der Fernsteuerung ausgeglichen. Die  $\epsilon$ -Kommandos zur Bestimmung einer seitlichen Abdrift werden mit einem Sender empfangen und nach Durchlaufen eines RC-Glieds mittels eines Ringmodulators in Wechselstrom umgewandelt. Dann werden sie mit den anderen Signalen zusammengeführt.<sup>35</sup>

Das bodenfeste Leitstrahlgerät enthält einen UKW-Sender, dessen Strahlung elektronisch eine vertikale „Leitebene“ erzeugt. Zwei senkrecht und symmetrisch zur Flugebene stehende Dipolantennen werden von dem Sender gespeist und abwechselnd je 50 Mal pro Sekunde phasenmäßig mit 90° Vor- oder Nacheilung umgetastet. Dies führt zu einem Polardiagramm der Sender-Feldstärken in Form nach links und rechts geneigter Keulen, deren Schnittpunkt sich auf der Leitebenenlinie befindet, wo die Keulen alternierend die gleiche Feldstärke hervorrufen. Zur „Kennung“ der beiden Strahlungskeulen wird die Senderfrequenz mit zwei unterschiedlichen Niederfrequenzen moduliert, 7 kHz für links, 5 kHz für rechts. Fliegt das A4 in

---

<sup>33</sup> Vgl. Lange, S. 345 f. und Tomayko, S. 232

<sup>34</sup> Vgl. Reisig, S. 376

<sup>35</sup> Vgl. Lange, S. 342 und S. 345 f.



die Sollflugrichtung, sind die Feldstärken beider Keulen und somit die Amplituden der Modulationsfrequenzen gleich, ihre Differenz beträgt Null. Überwiegt im Leitstrahl-Empfänger die Amplitude der 7-kHz-Modulation, tritt eine Seitenabweichung nach links auf, ist es die 5-kHz-Modulation, dagegen nach rechts. Die Abstandsgröße  $\varepsilon$ , welche die Seitenabweichung angibt, ist proportional zur Differenz der Feldstärken der Strahlungskeulen. Sie wird in der Leitstrahl-Gleichung (3) und der Bewegungsgleichung (6) zur Navigationskorrektur genutzt. Das Leitstrahl-Bordgerät verfügt über einen Hochfrequenzempfänger, welcher Wechselspannungen ausgibt, die als Funktion der Flugzeiten verarbeitet werden.<sup>36</sup>

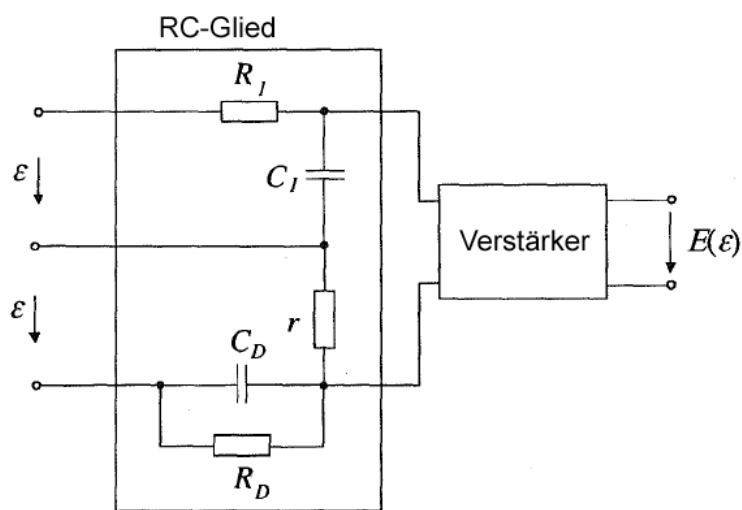


Abb. 22: Schaltung für die Fernsteuerung

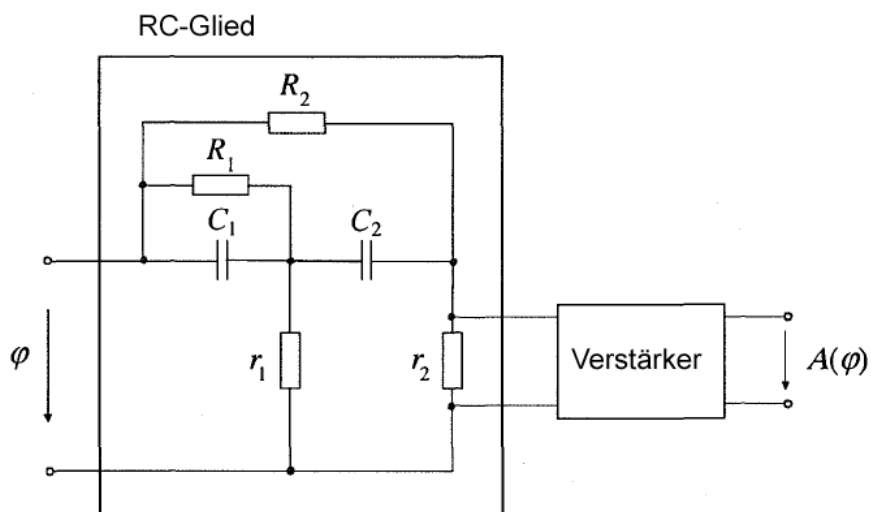


Abb. 23: Schaltung für die bordeigene Steuerung

36 Vgl. Reising, S. 238 - 240, 422 f. und S. 425 - 427

In den bordseitigen A4-Steuerungssystemen werden die Integriertoren und Differentiatoren lediglich zur Stabilisierung der Raketenbewegung eingesetzt und verfügen nicht über Rückkopplungsschleifen, da keine Berechnung exakter Werte für Integrale und Differentiale nötig war.<sup>37</sup>

Die Ausgangsspannung der Differentiatoren muss verstärkt werden, um die Rudermaschinen steuern zu können. Da wie beschrieben keine Gleichstromverstärker zur Verfügung standen, musste mit Wechselstrom gearbeitet werden. Dazu wurde die Ausgangsspannung in einem Ringmodulator mit 500 Hz moduliert und anschließend durch Elektronenröhren verstärkt. Da die Rudermaschinen wiederum mit Gleichstrom angetrieben werden, wird die verstärkte Spannung in einer Gleichrichterbrücke mit 500 Hz demoduliert.<sup>38</sup>



*Abb. 24: Mischgerät fotografisch*

<sup>37</sup> Vgl. Hoelzer 1994, S. 77

<sup>38</sup> Vgl. [http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggregat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 181 f. (abgerufen am 28.10.2008); Lange, S. 346 und Reisig, S. 384

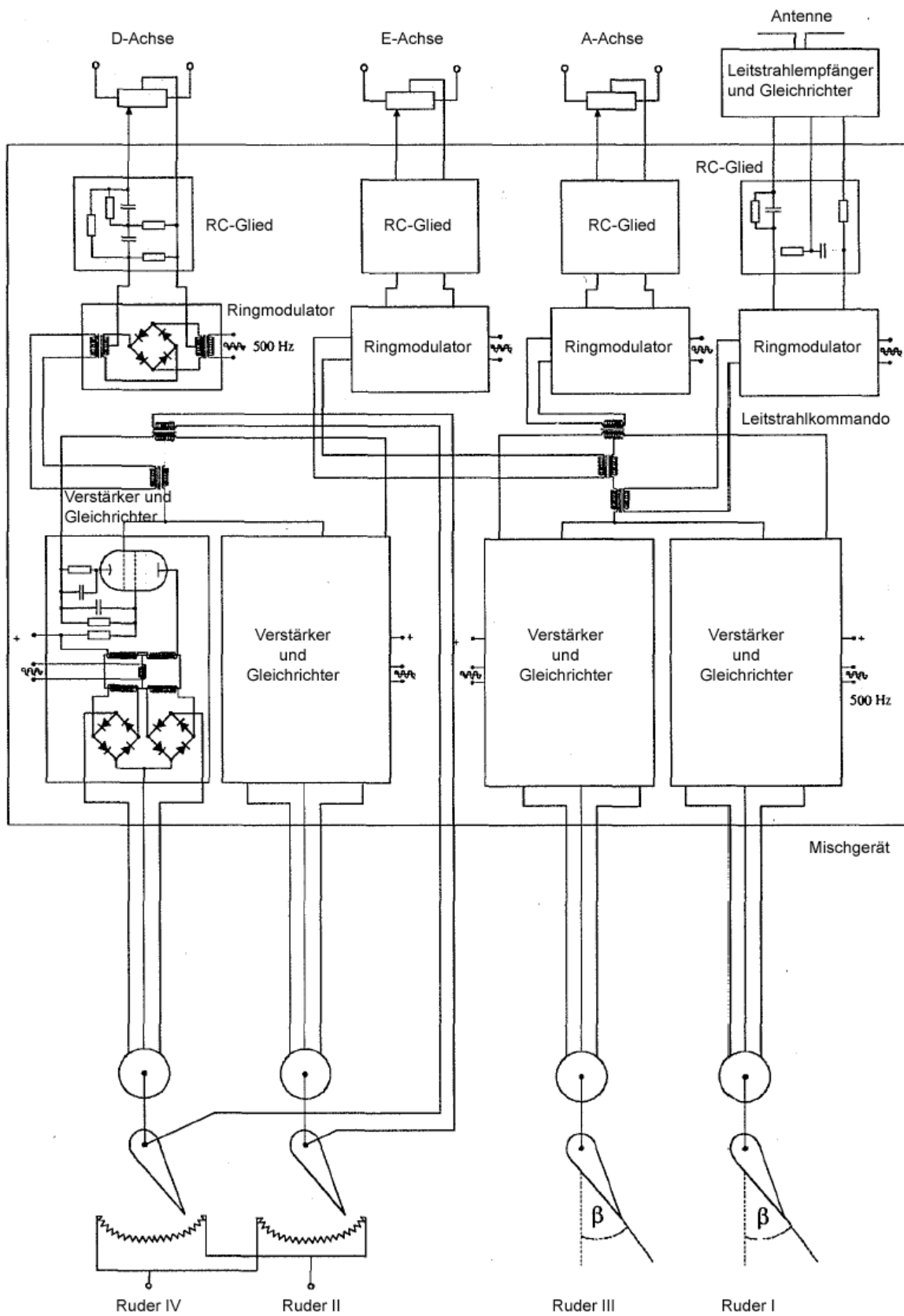


Abb. 25: Mischgerät schematisch

## 5. Analoge Gegen-Zeit

Auch auf Seiten der Alliierten spielten Analogrechnergeräte für die Kriegstechnologie eine zentrale Rolle. Besonders in den USA wurden analoge Vorrichtungen zur Flugabwehr konzipiert, welche die Antizipation künftiger Positionen von Flugkörpern ermöglichten. Einige dieser Entwicklungen wiesen bereits einen recht hohen Grad an Automation auf und arbeiteten mit Feedbackschleifen. Sie bilden mit die Ursprünge für Wieners Arbeiten zur Kybernetik.

Die Beschäftigung mit Flugabwehranlagen beinhaltet das Verfolgen von Zielen, die Vorhersage ihrer zukünftigen Position und die Berechnung der entsprechenden Ausrichtung der Abwehrwaffen. Dabei wurden Kommunikations- und Steuerungstechniken zunehmend mit Servomechanismen, integrierten Systemen, Mensch-Maschine-Interfaces sowie analoger und digitaler Rechentechnik zu innovativen Technologien verbunden.<sup>39</sup> Nachdem ein Fluggerät geortet wurde, blieben nur etwa 30 Sekunden Zeit, um die erforderlichen Berechnungen durchzuführen und die Waffen abzufeuern.<sup>40</sup> Wie bei der Steuerung der A4-Rakete waren somit auch zur Flugabwehr Echtzeitsysteme nötig.

### 5.1. Das T-6

Im Zweiten Weltkrieg war die Flugkörpertechnik soweit fortgeschritten, dass es aufgrund der großen Flughöhen und -geschwindigkeiten für Menschen kaum noch möglich war diese als Ziele zu erfassen. So wurden Flugabwehranlagen konzipiert, die zwar von Menschen geführt wurden, die jedoch weitgehend automatisch arbeiteten. Das T-6<sup>41</sup> der Firma Sperry war das erste solcher Richtgeräte, welches von der U.S. Army eingesetzt wurde. Es stellt einen mechanischen Analogcomputer dar, der vier Flugabwehrkanonen und einen Höhenmesser zu einem integrierten System zusammenführt.

Das Richtgerät benötigt eine Reihe von Eingaben. Mithilfe von Fernrohren wird das Ziel verfolgt und Höhe, Azimut und Abstand erfasst. Alle Fernrohre verfügen über einen Sender, der die gemessenen Winkel bzw. Entfernungen an den Computer übermittelt. Dieser berechnet das Azimut, die Richthöhe und die Einstellung für den Zünder, welche die Zeitspanne zwischen Abschuss und Explosion des Geschosses bestimmt. Dabei werden manuelle Eingaben wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Mündungsgeschwindigkeit und Luftdichte berücksichtigt.

---

39 Vgl. Mindell 2002, S. 9

40 Vgl. Bromley, S. 188

41 Die Bezeichnung der U.S. Army lautet M-2.

Das Richtgerät führt zwei Hauptrechnungen aus. Die **Prädiktion** modelliert die Bewegung des Ziels und extrapoliert mithilfe der Annahme von konstantem Kurs, Geschwindigkeit und Höhe dessen zukünftige Position. Die für die Extrapolation der Zielposition nötigen Werte werden in Polarkoordinaten erfasst, der Flugkörper bewegt sich jedoch in kartesischen Koordinaten. Daher werden letztere zum Extrapolieren herangezogen. Dazu werden die Bewegungen des Ziels auf eine horizontale Ebene projiziert und die Geschwindigkeit wird von den Positionsänderungen abgeleitet. Um eine zukünftige Position zu ermitteln, wird eine festgelegte Zeitspanne mit der Geschwindigkeit multipliziert und hinzugefügt. Das Ergebnis wird wiederum in Polarkoordinaten umgewandelt. So wird der tatsächliche Flug des Ziels in kleinerem Maßstab im Computer reproduziert und die benötigten Winkel und Geschwindigkeiten können direkt gemessen werden. Die vorhersagenden und ballistischen Rechnungen bilden zusammen eine Feedbackschleife. Die Maschinenführer geben zunächst eine geschätzte Zeit für den Flug des Geschosses an, diese nutzt der Prädiktor, um eine Anfangskalkulation durchzuführen, welche an die Einheit für die ballistische Rechnung weitergeleitet wird. Diese ermittelt daran eine verbesserte Flugzeit, welche der Prädiktor nutzt, um seine Werte zu verfeinern. Durch diesen Kreislauf aus Verfeinerungen nähert sich die antizipierte Position des Ziels der tatsächlichen sehr stark an. Dabei erfolgte zunächst keine explizite Berechnung der Geschwindigkeiten. Stattdessen stellten zwei Maschinenführer die Antriebe für die x- und y-Koordinaten mittels Kurbeln so ein, dass ihre Einstellscheiben denen des Motors entsprach. Menschen agierten somit im Wesentlichen als Erweiterung der Maschinen, folgten deren Anweisungen und übertrugen die Anzeigen analoger Instrumente mittels Handkurbeln, im Gegensatz zum Mischgerät, bei dem eine direkte Ansteuerung erfolgte. Der Personalaufwand des T-6 für dieses „Follow-the-Pointer“-Prinzip ist beachtlich.

Die **Ballistik** berechnet aufgrund von Azimut, Richthöhe und Zündereinstellung, wie das Geschoss die bestimmte Stelle zu einem zukünftigen Zeitpunkt erreichen kann, um dort zu explodieren. Dies entspricht dem traditionellen Gebrauch von vorausberechneten Abschusstafeln, um die Waffe entsprechend auszurichten. Für diese Aufgabe enthält der T-6 eine Nockenscheibe, welche die vorherbestimmten ballistischen Funktionen abbildet.

Die menschlichen Operationen dienten dabei zum einen zur Eingabe von Werten in das System, zum anderen als Tiefpassfilter, um Störungen zu erkennen. Im Zuge der Weiterentwicklung der Richtgeräte wurden zusätzliche Automatisierungen mittels Servomechanismen eingeführt, so dass weniger Soldaten zum Bedienen nötig waren. Auch wurde zur Berechnung der Zielgeschwindigkeit ein Integrator ähnlich dem der Differential Analyzer ergänzt. 1943 wurde

das mechanische M-7-Richtgerät (ein Nachfolger des M-2) durch einen in den Bell Laboratories entwickelten elektronischen Computer ersetzt (s.u.).<sup>42</sup>

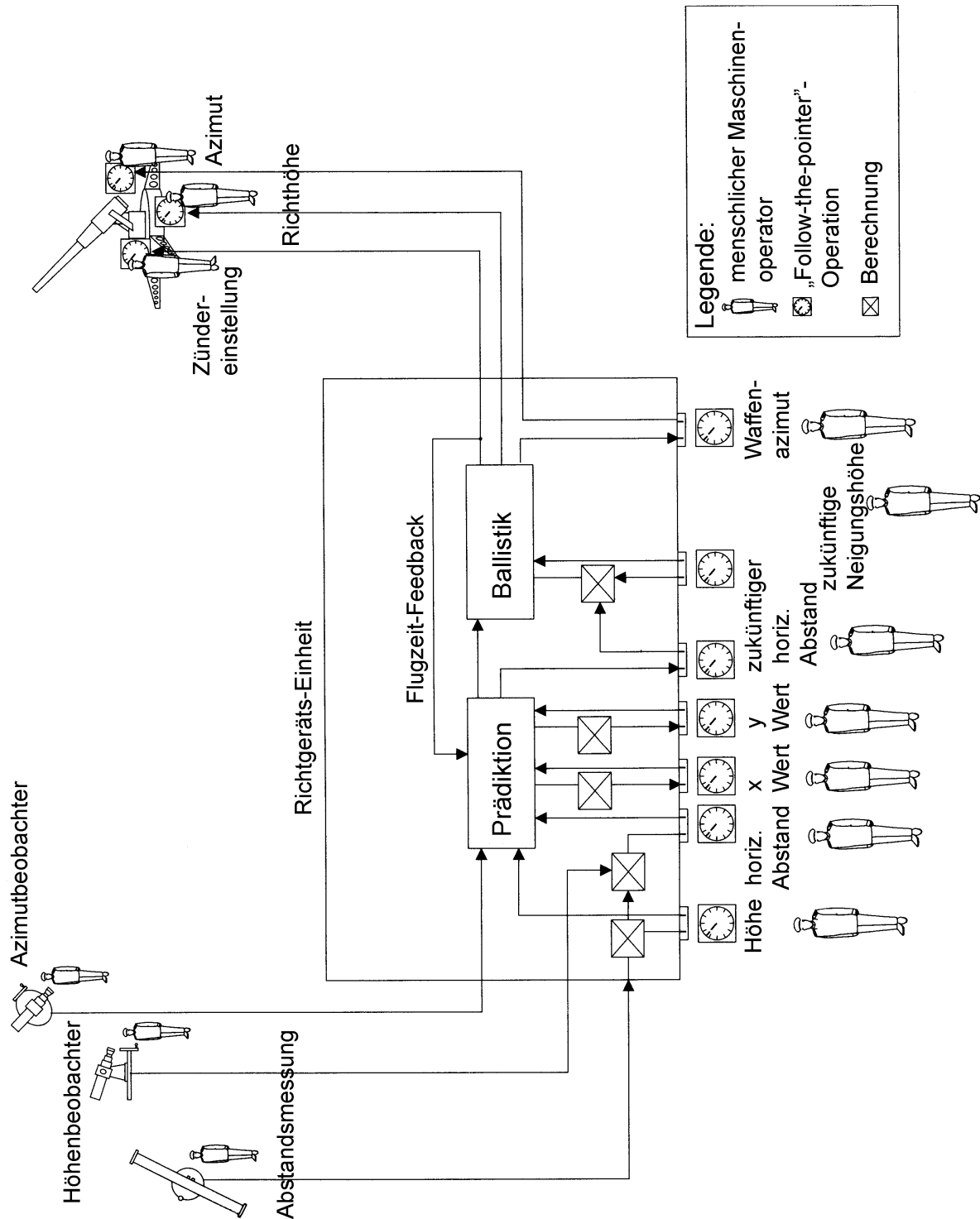


Abb. 26: Vereinfachte Übersicht des T-6 Richtgeräts von Sperry

42 Vgl. Mindell 1995, S. 108 - 112 und Mindell 2002, S. 87 - 91

Die Sperry-Richtgeräte sind frühe Beispiele für verteilte Kontrollsysteme. Durch sie wurden grundlegende Kenntnisse über Feedback, Regelungsprozesse und Mensch-Maschine-Interfaces für die Entwicklung u.a. von Digitalcomputern erlangt. Die Maschinenführer waren dabei wie ein „Klebstoff“, der die einzelnen Teile des integrierten Systems zusammen hielt.<sup>43</sup> Wie das Mischgerät arbeiten auch diese Richtgeräte im oben definierten Sinne in Echtzeit. Während ersteres jedoch allein über seine eigene Zeit verfügt, erfahren die Richtgeräte externe Eingriffe. So werden die von ihnen induzierten Zeitprozesse nicht nur von systemimmanenten Vorgängen wie Reibung beeinflusst. Stattdessen evozieren auch die menschlichen Operatoren wesentliche Verzögerungen.

### 5.2. Das T-10

Das elektromechanische T-10 Richtgerät reproduziert den in den Sperry-Geräten verwendeten Algorithmus. Es benötigt die drei Eingaben Azimut ( $\alpha$ ), Höhe ( $\epsilon$ ) sowie Abstand ( $r$ ) und generiert dazu für die Waffen die Ausgaben des Azimut ( $\alpha_p$ ), der Richthöhe ( $\epsilon_p$ ) und der Zündereinstellung bzw. Flugzeit des Geschosses ( $\Delta T$ ). Abb. 27 zeigt die Struktur des T-10.

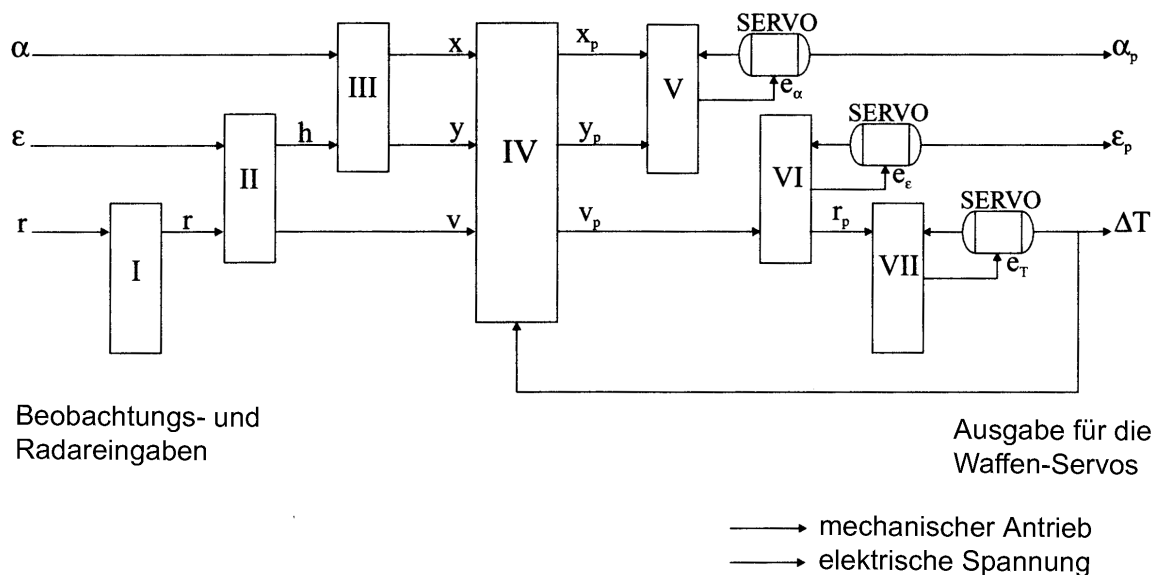


Abb. 27: Vereinfachte Übersicht des T-10 Richtgeräts

In Segment I wird die Entfernung-Eingabe in eine Spannung umwandelt und in II mit der Höhe zusammengeführt, um deren Höhenkomponente abzuleiten. Das Modul III verbindet die Höhe des Ziels mit dem Azimut zur Herleitung der Kartesischen Koordinaten ( $x, y$  und  $v$  für die vertikale Komponente der Höhe). Die eigentliche Prädiktion erfolgt im Modul IV. Die Po-

43 Vgl. Mindell 1995, S. 112 f.

sitionskomponenten werden nach der Zeit differenziert, die erhaltenen Geschwindigkeiten werden mit  $\Delta T$  multipliziert und zur ursprünglichen Position addiert. Der Parameter der Geschoss-Flugzeit durchläuft wie beim T-6 Richtgerät eine Feedback-Schleife. Die Ausgabe von IV ist die antizipierte Zielposition  $x_p, y_p$  und  $v_p$ . Die Segmente V, VI und VII überführen die drei Spannungen, welche Kartesische Koordinaten repräsentieren, in Polarkoordinaten, welche durch Achsenlagen abgebildet werden. Die Servomotoren führen sowohl die Winkelübersetzung (Multiplikation mit Sinus oder Kosinus) als auch die Umsetzung von elektrisch zu mechanisch durch.<sup>44</sup> Dabei erfolgt das Lösen der Gleichungen inklusive dem Differenzieren elektronisch, wobei einfache Operationsverstärker eingesetzt wurden. Ursprünglich wurde die Idee für diese mit Gleichstrom arbeitenden Verstärker in den Bell Laboratories für Telefonnetze entwickelt und dann für das Richtgerät adaptiert. Mit ihrer Hilfe lassen sich jedoch auch eine Vielzahl von Schaltungen zum Lösen von Funktionen wie Multiplikation und Integration und auch Differentialgleichungen realisieren. Allerdings arbeiteten sie zunächst ungenauer als die mechanischen Integratoren. Diese konnten zudem nach verschiedenen Funktionen integrieren, die elektronischen Analogcomputer dagegen nur nach der Zeit.<sup>45</sup>

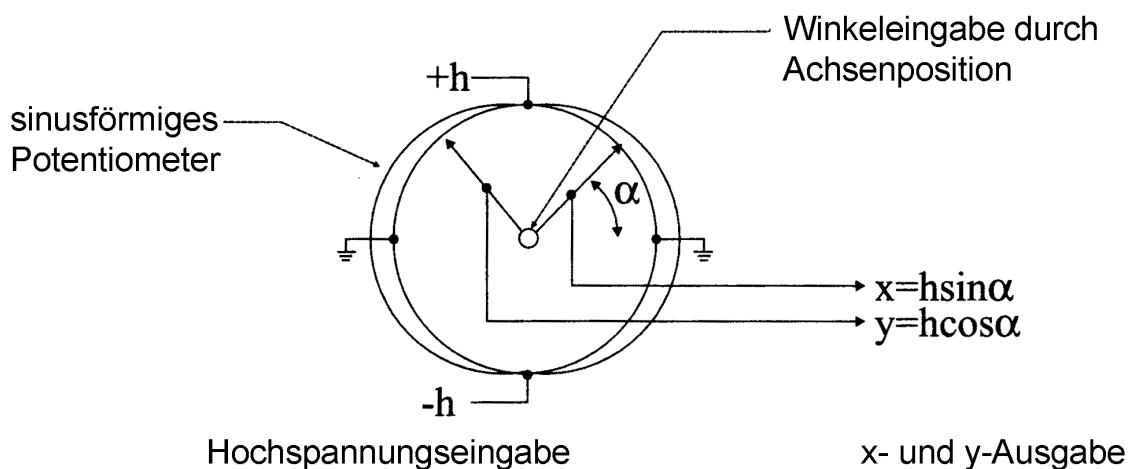


Abb. 28: Umwandlung der Koordinaten mit einem sinusförmigen Potentiometer

Das T-10 arbeitete zunächst ähnlich genau wie die Richtgeräte von Sperry, war ihnen aber durch die bessere Produzierbarkeit überlegen und wurde unter der Bezeichnung M-9 von den Streitkräften verwendet. Da es elektrische Eingaben verarbeiten konnte, ließ es sich mit Radargeräten verbinden. Zusammen mit den Radar SCR-584 bildete das M-9 eine erfolgreiche

44 Vgl. Mindell 2002, S. 337

45 Vgl. Bissell, S. 1 - 3; Clymer, S. 11 und Mindell 2002, S. 234



Verteidigung gegen die Fieseler Fi 103 (auch bekannt als Vergeltungswaffe 1).<sup>46</sup> „This tense confrontation pitted computers against autopilotes, servos against servos.“<sup>47</sup>

Während das T-6 und seine Nachfolger aus einer Firma stammte, die bereits Vorerfahrungen mit Kriegstechnologie hatte, wurde das T-10 in den Bell Laboratories von Ingenieuren entwickelt, die sich mit Kommunikationstechnik beschäftigten und ihr innovatives Wissen aus der Telefontechnik auf das Flugabwehrproblem anwendeten.<sup>48</sup>

### 5.3. Das T-15

Ebenso wie das A4-Gerät ging auch das T-10 unausgereift in die Produktion. Es stellte eine Neuerung dar, da es elektronisch arbeitete. Letztlich implementierte es aber den gleichen Algorithmus wie die Sperry-Geräte. Dieser enthielt jedoch einige Schwächen. Die Geschwindigkeit des Zieles wird direkt von dessen Position abgeleitet. Die durch Beobachtung gewonnenen Daten sind jedoch sehr fehleranfällig, so dass die ermittelten Geschwindigkeiten schwanken. Die Daten ließen sich zwar glätten, dies führte jedoch zu Verzögerungen und obsoleten Daten. So wurde ein neuer Algorithmus für ein weiteres elektromechanisches Richtgerät entwickelt. Das T-15 arbeitet ausschließlich mit Polarkoordinaten. Die Anfangsposition wird in einem mechanischen Speicher abgelegt. Diese wird dann von der gegenwärtigen Position subtrahiert. Diese Differenz wird anschließend durch die Zeit dividiert. Diese Methode bearbeitete nur relativ geringe Größen und verlangte weniger genaue Berechnungen, so gleicht es Störungen besser aus.

Anders als das T-10 arbeitet das T-15 mit Wechselstrom, verwendet jedoch ebenfalls Kondensatoren zum Integrieren. Es lieferte seine Ergebnisse schneller und genauer als das T-10. Da das T-10 jedoch bereits in Produktion gegangen war, fand das T-15 keinen militärischen Einsatz mehr. Dennoch stellt es einen weiteren Fortschritt für die elektronische Rechentechnik dar.<sup>49</sup>

---

46 Vgl. Mindell 2002, S. 241 f., S. 244 und S. 257

47 Mindell 2002, S. 233

48 Vgl. Mindell 2002, S. 258

49 Vgl. Clymer, S. 11 und Mindell 2002, S. 243

## 6. Schlussbetrachtung

In den Ausführungen wurde gezeigt, wie mechanische, elektromechanische und elektronische Analogrechner Zeitprozesse für Echtzeitanwendungen realisieren und dabei genuine Medienzeit produzieren. Dabei sind es im Wesentlichen Reibung und der Fluss von Elektronen, welche die medieninterne Zeitlichkeit bedingen. Aufgrund der Detektion gegenwärtiger Lagen/Positionen entstehen Zeitreihen, die stets Vergangenes und Aktuelles repräsentieren, welches die Antizipation/Extrapolation von Zeitprozesse ermöglicht.

Gegen Ende des Zweiten Weltkriegs verfügten die verschiedenen Kriegsteilnehmer über Technologien, die Feedback, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie menschliche Maschinenführer in neuer Weise verbanden und so zu neuen Erkenntnisse über den Entwurf, die Organisation und Produktion solcher Systeme beitrugen.<sup>50</sup> Dabei ergaben sich zahlreiche Fragen zur Mensch-Maschine-Kommunikation, die u.a. Wieners Arbeiten zur Kybernetik beeinflussten und auch heute noch von Bedeutung sind.<sup>51</sup>

Ein besonders prägnantes Beispiel für den zunehmend automatisierten Krieg ist die Abwehr der deutschen Fieseler Fi 103. Sie stellte aufgrund ihrer geringen Größe und hohen Geschwindigkeit ein schwer zu treffendes Ziel dar. Während Piloten bemannter Flugzeuge jedoch unter Beschuss Ausweichmanöver flogen, blieb die Fi 103 stets auf ihrem geradlinigen Kurs. So war ihre Flugbahn leichter berechenbar, die Flugmaschine zeigte ein vorhersagbares Verhalten und bildete so ein perfektes Ziel für die Richtgeräte. Mithilfe der Kombination aus dem Radar SCR-584 und dem Richtgeräte M-9 konnte eine Vielzahl von ihnen erfasst und zerstört werden. So äußerte sich ein britischer Offizier: „It seemed to us that the obvious answer to the robot target of the flying bomb ... was a robot defense.“<sup>52</sup> Dies war nach Mindell die größte Stunde dieser Zusammenstellung. Auch die A4-Geräte konnten von den Radaren erfasst werden, aber sie bildeten vorerst zu kleine Ziele. Die zur Abwehr der Raketen entwickelte Technik kam nicht mehr zum Feldeinsatz.<sup>53</sup>

---

50 Vgl. Mindell 2002, S. 232 f.

51 Für die Extrapolation von Flugbahnen wurde von gleichmäßigen Flugbahnen ausgegangen. Wiener dagegen versuchte viel ungewissere Vorhersagen zu treffen, nämlich das Flugverhalten von Piloten, die dem Beschuss ausweichen. Er schuf eine allgemeine Theorie zu Glättung und Vorhersage von Zeitreihen und beschränkte sie nicht auf die Flugabwehr. Seine Arbeiten lassen sich auf jede Fragestellung anwenden, die als diskrete Datenreihe darstellbar ist. (Vgl. Mindell 2002, S. 276 und S. 279 f.)

52 Pile zit. nach Mindell 2002, S. 254

53 Vgl. Mindell 2002, S. 254 und S. 258



*Abb. 29: Abschuss einer Fieseler Fi 103 durch ein SCR-584/M-9-System*

Die in Abb. 29 gezeigte Situation stellt ein bemerkenswertes Zusammenspiel von analogen und digitalen Signalen dar. Eine Fi 103 wurde von einem Geschoss getroffen und ist abgestürzt. Die weiße Linie zeigt ihren kontinuierlichen Pfad nach unten. Die diskreten weißen Punkte dagegen sind weitere Granaten, die an vorausberechneten Positionen der Fi 103 explodieren, welche diese nicht mehr erreichen wird.<sup>54</sup>

Das M-9 ist noch aus einem weiteren Grund sehr interessant. Es umfasste eine Reihe von Funktionen wie Addition, Multiplikation und Differentiation. So kam bei den Entwicklern die Idee auf, das Richtgerät zu einem universellerem Rechner analog zu den früheren mechanischen Geräten zu erweitern. Wie beim Differential Analyzer sollten so Differentialgleichungen gelöst werden können, jetzt jedoch elektronisch. Zudem konnte mithilfe von Potentiometern auf die ballistischen Nockenscheibe verzichtet werden, welche sehr aufwändig in der Herstellung waren. Dies stellte einen entscheidenden Produktionsvorteil dar. Die für das M-9 entwickelten Operationsverstärker wurden später auch für die Modellierung von Geschossen und Steuerungssystemen im Labor verwendet und stellen einen wesentlichen Bestandteil späterer Analogcomputer dar.<sup>55</sup>

---

<sup>54</sup> Vgl. Mindell 2002, S. 256

<sup>55</sup> Vgl. ebd., S. 235 f. und S. 239

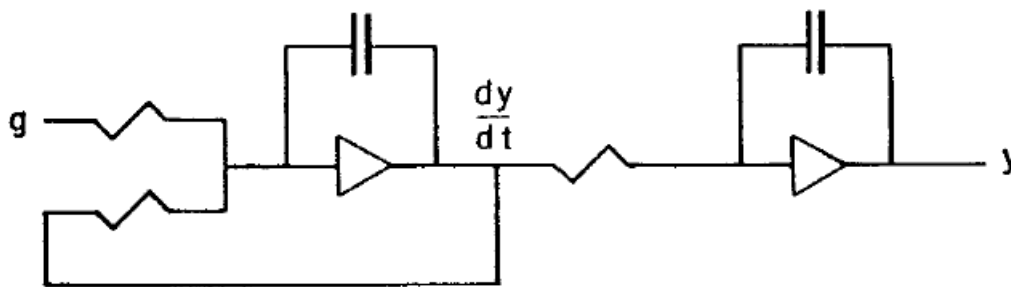


Abb. 30: Aufbau eines Analogcomputers mit Operationsverstärkern für die Funktion  $\frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + g = 0$  in Form von  $\frac{dy}{dt} = - \int [k \frac{dy}{dt} + g] dt$

Elektronische Computer waren den mechanischen in mehrerer Hinsicht überlegen. Sie arbeiten mit höherer Genauigkeit und Geschwindigkeit, verursachen jedoch geringere Kosten. Bedeutender ist jedoch, dass sie wesentlich leichter neu konfiguriert bzw. korrigiert werden können, indem ihre Verkabelung geändert wird. Bei den mechanischen Geräten war der Algorithmus dagegen eng mit der materiellen Struktur verbunden und ließ sich daher nur schwer verändern. Zudem erforderten die mechanischen Computer hoch präzise gearbeitete Bauteile wie z.B. die Nockenscheiben, welche besonders in der ohnehin während des Krieges ausgelasteten Industrie kaum ausreichend hergestellt werden konnten.<sup>56</sup>

Hier ergeben sich starke Parallelen zum Peenemünder Analogcomputer. Zunächst wurde ein Computer zur Steuerung einer Waffe entwickelt, wobei sich mechanische Konzepte als unzureichend herausstellten und man sich dem Rechnen mit Elektronen zuwendete. Dabei waren in beiden Fällen Simulationen und die Berechnung von Flugbahnen besonders von Interesse. Es wurden jeweils Konzepte ausgearbeitet, um die Spezialgeräte zu universellen Rechnern zu erweitern.

Hoelzer selbst vermutete, dass „der erste vollelektronische Analog-Computer [...] in die Welt gekommen [wäre] mit Helmut Hoelzer oder ohne Helmut Hoelzer, mit Peenemünde oder ohne Peenemünde. Wenn die Zeit reif ist, kommt das Neue von ganz allein, und der erste Computer der Welt wäre dann eben von anderen entwickelt worden. Nur eben später.“<sup>57</sup> Dass die Entwicklung von elektronischen Analogcomputern in Deutschland und den USA größtenteils gleichzeitig, aber doch völlig separat voneinander ablief und sich in einigen Bereichen ähnliche, in anderen komplett andere Konzepte entwickelten, stützt diese These.

Über das In-der-Zeit-sein heißt es im Alten Testament: „Ein jegliches hat seine Zeit“<sup>58</sup>. Für den Analogcomputer gilt dies in besonderer Weise. Zum einen war die Zeit reif für dieses Me-

<sup>56</sup> Vgl. Mindell 2002, S. 236

<sup>57</sup> Hoelzer zit. nach Fischer, S. 109

<sup>58</sup> Prediger 3,1 (Luther-Bibel 1984) auf [www.diebibel.de](http://www.diebibel.de) (abgerufen am 27.05.2009)

dium, aus technologischem Erkenntnisstand und Anforderungen der Kriegszeit war es Zeit für den Analogcomputer. Zum anderen hat dieses Medium seine eigene intrinsische Zeit, eine möglicherweise unbewusste Konnotation des Bibelsatzes. Darüber hinaus führt der Analogcomputer auch noch Manipulationen von Zeitprozessen durch. Durch die Zeit kam ein neues Medium für die Zeit in die Zeit.

## 7. Abbildungsnachweise

Abb. 1: Fischer, S. 106

Abb. 2: <http://www.grand-illusions.com/articles/antikythera> (abgerufen am 28.03.2009)

Abb. 3: <http://www.delago.de/astrolab/DHome.htm> (abgerufen am 01.12.2008)

Abb. 4: <http://www.oughtred.org/eos04/eos04d/rules04.html> (abgerufen am 01.12.2008)

Abb. 5: [http://www.tu-chemnitz.de/mathematik/mrz/Historische\\_Rechner](http://www.tu-chemnitz.de/mathematik/mrz/Historische_Rechner) (abgerufen am 22.03.2009)

Abb. 6: Bromley, S. 176 (Übersetzung TB)

Abb. 7: Hartree, S. 5 und <http://web.mit.edu/klund/www/analyzer> (abgerufen am 19.01.2009)

Abb. 8: [http://www.dalefield.com/nzfmm/magazine/Differential\\_Analyser.html](http://www.dalefield.com/nzfmm/magazine/Differential_Analyser.html) (abgerufen am 19.01.2009)

Abb. 9: Mindell 2002, S. 160 (Übersetzung TB)

Abb. 10: Lange, S. 340 (Einfügung der Flossenummerierung TB)

Abb. 11: [http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 179 (abgerufen am 28.10.2008)

Abb. 12: <http://www.v2rocket.com/start/makeup/sci12.jpg> (abgerufen am 17.04.2009)

Abb. 13: Reisig, S. 310

Abb. 14: [http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung\\_A4.pdf](http://www.aggreat4.de/pdf/Gerätebeschreibung_A4.pdf), S. 191 (abgerufen am 28.10.2008)

Abb. 15: Lange, S. 327 (Übersetzung TB nach Hoelzer 1946, S. 49)

Abb. 16: ebd., S. 327 (Übersetzung TB nach Hoelzer 1946, S. 49)

Abb. 17: ebd., S. 331

Abb. 18: ebd., S. 332 (Übersetzung TB)

Abb. 19: ebd., S. 331 (Übersetzung TB)

Abb. 20: ebd., S. 332

Abb. 21: ebd., S. 339

Abb. 22: ebd., S. 343 (Übersetzung TB)

Abb. 23: ebd., S. 344 (Übersetzung TB)

Abb. 24: <http://www.cdvandt.org/Hoelzer%20V4.pdf>, S. 6 (abgerufen am 03.06.2008)

Abb. 25: Lange, S. 347 (Übersetzung TB)

Abb. 26: Mindell 2002, S. 91 (Übersetzung TB)

Abb. 27: ebd., S. 337 (Übersetzung TB)

Abb. 28: ebd., S. 337 (Übersetzung TB)

Abb. 29: ebd., S. 256

Abb. 30: Bromley, S. 194

## 8. Bibliographie

### 8.1. Literatur

Bartel, Walter: Rolle und Bedeutung des KZ Dora-Mittelbau und die Funktion der SS bei der A4-Produktion. Buchenwald: Nationale Mahn- und Gedenkstätte, 1976. (Buchenwald-Heft; Bd. 2)

Bernhardt, Ute; Ruhmann, Ingo: Computer im Krieg: die elektronische Potenzmaschine. in: Norbert Bolz; Friedrich A. Kittler; Christoph Tholen (Hrsg.): Computer als Medium. München: Wilhelm Fink Verlag, 1994. S. 183 - 207 (Literatur- und Medienanalysen, Bd. 4)

Bissell, Chris: A great disappearing act: the electronic analogue computer. auf: [http://technology.open.ac.uk/tel/people/bissell/bletchley\\_paper.pdf](http://technology.open.ac.uk/tel/people/bissell/bletchley_paper.pdf) (abgerufen am 23.03.2009)

Braun, Wernher von; Ordway III, Frederick I.: History of Rocketry and Space Travel. 3., rev. Ed.. New York: Thomas Y. Crowell Company, 1975.

Bromley, Allan G.: Analog Computing Devices. in: William Aspray (Hrsg.): Computing before Computers. Ames: Iowa State University Press, 1990. S. 156 – 199

Clymer, A. Ben: The Mechanical Analog Computers of Hannibal Ford and William Newell. in: IEEE Annals of the History of Computing. Vol. 15. No. 2, 1993. S. 19 – 34

Eisenhardt, Peter; Kurth, Dan; Stiehl, Horst: Du steigst nie zweimal in denselben Fluss: Die Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis. Reinbek b. Hamburg: Rowohlt, 1988.

Ernst, Wolfgang: Medieninduzierte Zeit: Wissensalternativen zur Mediengeschichte. auf: <http://www.medienwissenschaft.hu-berlin.de/theorien/skripte/MedieninduzierteZeit.pdf> (abgerufen am 02.12.2008)

Fischer, Joachim: Was haben Analogrechner und Simula-67 mit modernen Modellierungssprachen zu tun?. in: Wolfgang Reisig; Johann-Christoph Freytag (Hrsg.): Informatik: Aktuelle Themen im historischen Kontext. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. S. 105-135

Hartree, Douglas R.: Calculating Instruments and Machines. Urbana: University of Illinois Press, 1949. Reprinted.

Hoelzer, Helmut: Anwendung elektrischer Netzwerke zur Lösung von Differentialgleichungen und zur Stabilisierung von Regelvorgängen. Diss., 1946. Technische Hochschule Darmstadt.

Ders.: 50 Jahre Analogcomputer. in: Norbert Bolz; Friedrich A. Kittler; Christoph Tholen (Hrsg.): Computer als Medium. München: Wilhelm Fink Verlag, 1994. S. 69 - 90 (Literatur- und Medienanalysen, Bd. 4)

Krause, Christine: Die Analogrechentechnik unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Analogrechnern in Thüringen und Sachsen. auf: [http://www.tu-ilmenau.de/fakia/fi-leadmin/template/FakIA/Strukt-Fakultaet\\_IA/ipim/dbis/krause/Analogrechentechnik\\_Tagungsband\\_Greifswald2006\\_ChrKrause.pdf](http://www.tu-ilmenau.de/fakia/fi-leadmin/template/FakIA/Strukt-Fakultaet_IA/ipim/dbis/krause/Analogrechentechnik_Tagungsband_Greifswald2006_ChrKrause.pdf) (abgerufen am 27.11.2008)

Kuhlmann, Bernd: Peenemünde: Das Raketenzentrum und seine Werkbahn. Durchges. u. erg. Neuaufll.. Berlin: Gesellschaft für Verkehrspolitik und Eisenbahnwesen e.V., 2003. Hrsg. in Zusarb. mit dem Historisch-Technischen Informationszentrum Peenemünde.

Lange, Thomas: Helmut Hoelzer - Inventor of the Electronic Analog Computer. in: Raúl Rojas; Ulf Hashagen (Hrsg.): The first Computers: History and Architectures. Cambridge (Mass.), London: The MIT Press, 2000. S. 323 - 348

Mindell, David A.: Anti-Aircraft Fire Control and the Development of Integrated Systems at Sperry, 1925 – 1940. IEEE Control Systems. April 1995. S. 108 – 113

Mindell, David A.: *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*. Baltimore, London: The John Hopkins University Press, 2002.

Neufeld, Michael J.: *Die Rakete und das Reich: Wernher von Braun, Peenemünde und der Beginn des Raketenzeitalters*. 2., überarb. Aufl.. Berlin: Henschel Verlag, 1999.

Reisig, Gerhard: *Raketenforschung in Deutschland: Wie die Menschen das All eroberten*. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag, 1999.

Tomayko, James E.: *Helmut Hoelzer's Fully Electronic Analog Computer*. in: *IEEE Annals of the History of Computing*. Volume 7, Number 3, July 1985. S. 227 – 240

## **8.2. Webseiten**

<http://history.msfc.nasa.gov/rocketry>

<http://web.mit.edu/klund/www/analyzer>

<http://www.aggregat4.de>

<http://www.anti-aircraft.org>

<http://www.cdvandt.org/Hoelzer%20V4.pdf>

[http://www.dalefield.com/nzfm/magazine/Differential\\_Analyser.html](http://www.dalefield.com/nzfm/magazine/Differential_Analyser.html)

<http://www.delago.de/astrolab/DHome.htm>

<http://www.diebibel.de>

<http://www.grand-illusions.com/articles/antikythera>

<http://www.oughtred.org/eos04/eos04d/rules04.html>

[http://www.tu-chemnitz.de/mathematik/mrz/Historische\\_Rechner](http://www.tu-chemnitz.de/mathematik/mrz/Historische_Rechner)

<http://www.v2rocket.com>