

Von der Raketensteuerung zum Analogrechner Helmut Hoelzers Peenemünder Arbeiten und ihr Erbe

Bernd Ulmann
ulmann@vaxman.de

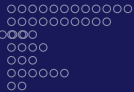
Kolloquium zur Geschichte
der Naturwissenschaften, Mathematik und Technik
Universität Hamburg

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
●○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Überblick

Der folgende Vortrag befasst sich mit den Arbeiten Helmut Hoelzers im Bereich der Raketensteuerung sowie des elektronischen Analogrechnens, die ihren Ausgangspunkt in der Raketenentwicklung des Dritten Reiches in Peenemünde im Zweiten Weltkrieg nahmen.

Dargestellt wird zunächst die Entwicklung des sogenannten *Mischgerätes*, des ersten vollelektronischen, einsatztauglichen Bordrechners, der als Herzstück der A4-Rakete (kurz für *Aggregat 4*, später auch als *Vergeltungswaffe 2*, kurz V2, bekannt geworden) diente und einen erfolgreichen Einsatz dieser Trägerrakete erst ermöglichte.

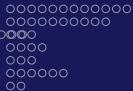


Helmut Hoelzer, 27.2.1912 – 19.8.1996



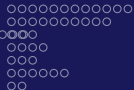
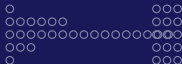
Helmut Hoelzer

Die Diplomhauptprüfung legte Helmut Hoelzer im Mai 1939 mit dem Gesamturteil „Gut“ ab und nahm in der Folge eine Tätigkeit im Laboratorium für Hochfrequenzforschung bei Telefunken auf. Bereits im Herbst 1939, nach nur etwa einem halben Jahr in der industriellen Forschung, wurde er durch direkte Ansprache Wernher von Brauns sowie Hermann Steudings und Ernst Steinhoffs an die Heeresversuchsstelle Peenemünde dienstverpflichtet. Sein eigentliches Aufgabengebiet hier sollte die Entwicklung und Untersuchung von Verfahren zur Funkleitung und -fernsteuerung für die noch in der Entwicklung befindliche A4-Rakete sein, er kam jedoch schnell zu anderen Themen, hierunter vor allem die Steuerung von Raketen, was den Schwerpunkt der folgenden Folien darstellen wird.



Die Rakete A4 (V2)

Bei der A4-Rakete (kurz für *Aggregat 4*), die vornehmlich unter ihrem Namen *V2, Vergeltungswaffe 2* bekannt wurde, handelt es sich um die erste ballistische Rakete mit Flüssigkeitstriebwerk mit 25 Tonnen Schub, die einen Gefechtskopf mit einem Gewicht von knapp einer Tonne über eine Strecke von bis zu 320 Kilometern ins Ziel zu tragen vermochte. Diese Rakete war in vielfacher Hinsicht ihrer Zeit voraus und war das erste Fluggerät, mit dessen Hilfe ein Vorstoß in den Weltraum möglich war. Die folgende Abbildung (nach [MIME][S. 82]) zeigt eine startklare A4-Rakete in typischer Schachbrettmusterbemalung, mit deren Hilfe Rollbewegungen der Rakete im Flug auf optischem Wege bestimmt werden konnten.



Die Rakete A4 (V2)



Flugbahn einer ballistischen Rakete

Kennzeichnend für eine ballistische Rakete ist ihre Flugbahn, die, abgesehen von einer meist vergleichsweise kurzen Zeitspanne, innerhalb derer das Triebwerk Schub liefert, im wesentlichen einer ballistischen Flugbahn folgt.

Die folgende, [BATE71][S. 281] entnommene, Abbildung zeigt schematisch die Flugbahn einer solchen Rakete.

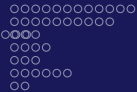
Eine interessante Betrachtung über die Zielgebiete ballistischer Raketen unter Berücksichtigung ihrer besonderen Bahneigenschaften findet sich beispielsweise bei [BECK60].

Flugbahn einer ballistischen Rakete

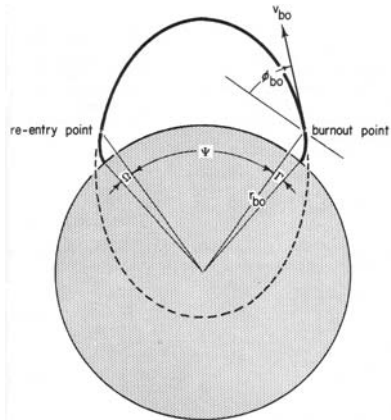
Wesentlich für eine hohe Zielgenauigkeit einer ballistischen Rakete ist die Beherrschung der Fluglage und -bahn der Rakete während der verhältnismäßig kurzen Phasen aktiven Antriebes.

Hier auftretende Abweichungen wirken sich massiv auf die Lage des Zielgebietes aus, so dass der Steuerung einer derartigen Rakete allerhöchste Wichtigkeit zukommt.

Eine Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Bahn- und Lagefehler auf die Zielgenauigkeit derartigen Raketen findet sich unter anderem in [BATE71][S. 297 ff.].



Flugbahn einer ballistischen Rakete



Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○●○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Die Steuerung einer ballistischen Rakete

Als Steuerelemente verfügte die A4-Rakete über sogenannte *Strahlruder* sowie über *Segel*. Bei den erstgenannten handelt es sich um vier Graphitruder, die in der Austrittöffnung des Raketentriebwerkes beweglich montiert waren, wobei stets ein gegenüberliegendes Ruderpaar durch einen gemeinsamen Servomotor gegenläufig angesteuert wurde.

Die Segel arbeiteten ähnlich, waren jedoch aussen an der Raketenhülle montiert und bewegten sich in der die Rakete umgebenden Atmosphäre. Ihr Einfluss auf die Flugbahn war wesentlich geringer als jener der Strahlruder.

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○●○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Steuerung ballistischer Raketen

Die Steuerung einer ballistischen Rakete

Den größten Einfluss auf die Steuerung der Flugbahn haben somit die Strahlruder, was jedoch die Zeitspanne, innerhalb derer eine aktive Steuerung der Rakete möglich ist, im Wesentlichen auf die Zeit bis Eintreten des Brennschlusses begrenzt.

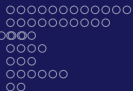
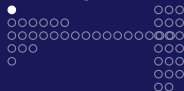
Bedingt durch die Trägheit des Antriebssystems für die Strahlruder auf der einen, aber auch durch die Massenträgheit der Rakete selbst auf der anderen Seite, ist eine einfache proportionale Regelung zur Ansteuerung der Strahlruder nicht ausreichend, um eine stabile Flugbahn zu erzielen.

Von essentieller Bedeutung ist die Einbeziehung von Ableitungen der eigentlichen Steuersignale, um Abweichungstendenzen der Flugbahn zu erkennen und in die Regelung mit einzubeziehen.

Die Steuerung einer ballistischen Rakete

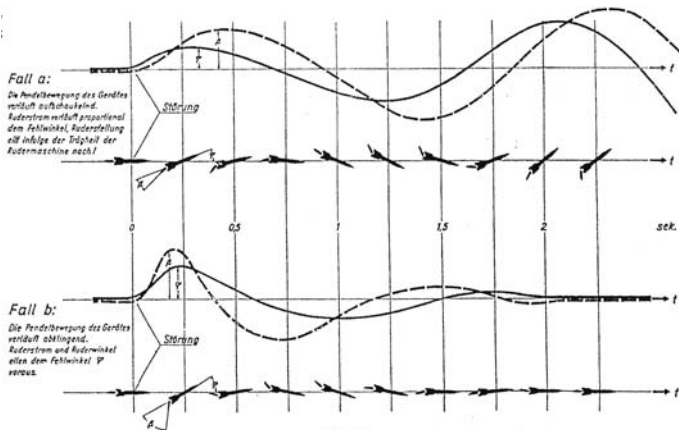
Die folgende Abbildung (nach [A4_45][Abb. 82]) zeigt das grundlegende Verhalten einer rein proportional arbeitenden Regelung im Vergleich mit einer Regelung, welche Ableitungen der Steuervariablen in ihre Arbeit einbezieht.

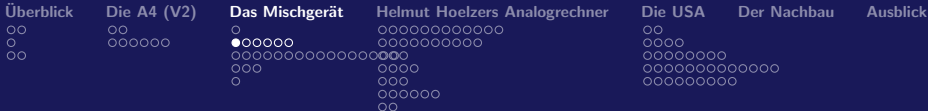
Gut zu erkennen ist das Aufschaukelverhalten der rein proportionalen Regelung, die schnell Kräfte bis hin zur Zerstörung der Raketenstruktur erzeugen, während die PD-Regelung bei geeigneter Auslegung ein schnelles Abklingen der Regelschwingungen zur Folge hat.



Stabilitätsfragen

Stabilität





Steuergrößen

Bestimmung der Steuergröße

Zur Bestimmung der Steuergröße für die Strahlruder/Segel der A4-Rakete werden im Wesentlichen zwei Werte herangezogen, nämlich der Bahnfehler ε sowie der Lagewinkel φ ¹.

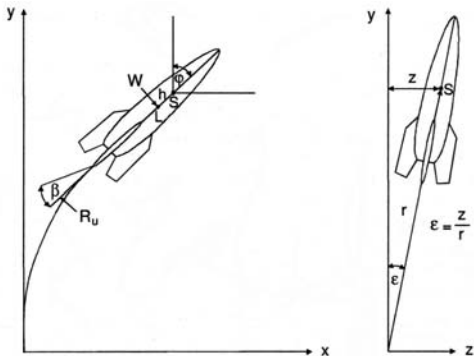
ε wurde ursprünglich auf funktechnischem Wege bestimmt, was die Verwendung höherer Ableitungen als der ersten ausschloss, um das unvermeidbare Signalrauschen in Grenzen zu halten. φ resultierte aus einer Kreiselanlage, ist also vergleichsweise rauscharm, was die Bildung höherer Ableitungen ermöglicht.

Das folgende Bild nach [LANG06][S. 137] zeigt die beiden zentralen Winkel ε und φ .

¹Vergleiche [LANG06][S. 136 ff.] sowie [LANG06][S. 181 f.].

Steuergrößen

ϵ und φ



Die Steuerterme

Hieraus müssen zunächst die folgenden Terme gebildet werden:

Steuerterme

Bahnfehlerweg	$E_{-1} \int \varepsilon dt$
Bahnfehler	$E_0 \varepsilon$
Winkelgeschwindigkeit des Bahnfehlers	$E_1 \dot{\varepsilon}$
Lagewinkel	$A_0 \varphi$
Lagewinkelgeschwindigkeit	$A_1 \dot{\varphi}$
Lagewinkelbeschleunigung	$A_2 \ddot{\varphi}$

Die Steuergleichung

Insgesamt ergibt sich für die Bestimmung der Steuergröße $E(\varepsilon, \varphi)$ folgender Ausdruck, der machinell zur Flugzeit der Rakete bestimmt werden muss (die Faktoren E_i sowie A_j sind im Folgenden nicht von Interesse):

Steuergleichung

$$E(\varepsilon, \varphi) = E_{-1} \int \varepsilon \, dt + E_0 \varepsilon + E_1 \dot{\varepsilon} + A_0 \varphi + A_1 \dot{\varphi} + A_2 \ddot{\varphi}$$

Gewinnung der Ableitungen und des Zeitintegrals

Herkömmliche Steuerungen benötigten sowohl für die Variablen ε und φ als auch für deren Ableitungen bzw. das Zeitintegral gesonderte Messmittel, was jedoch teuer, wartungsintensiv und auch aus Gewichtsgründen für ein Waffensystem, wie es die V2 darstellte, allgemein nicht brauchbar ist.

Helmut Hoelzer beschritt erstmalig einen grundlegend neuen Weg, indem er elektronische Schaltungen zur näherungsweise Bildung von Ableitungen und Zeitintegralen sowie zur Summation heranzog – ein in der damaligen Zeit wahrhaft revolutionärer Schritt.

Gewinnung der Ableitungen und Zeitintegrale

Grundelement zur Berechnung der Ableitungs- und Integralterme wurde das RC-Glied in seinen beiden Grundkonfigurationen, mit dessen Hilfe Ausdrücke der Formen

$$I(t) = C \dot{U}(t)$$

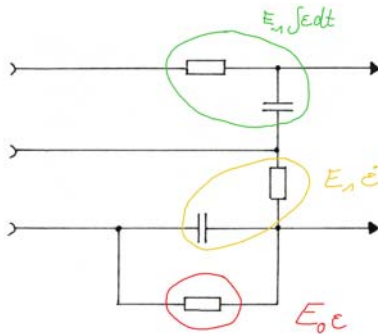
sowie

$$U(t) = \frac{1}{C} \int I(t) dt$$

gebildet werden können.

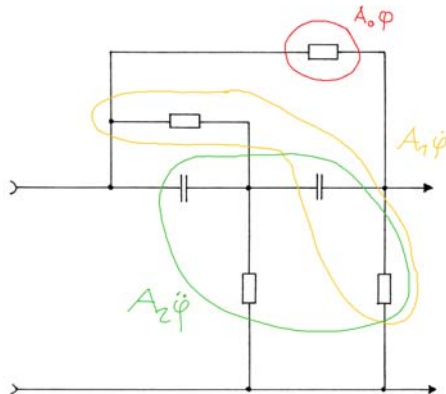


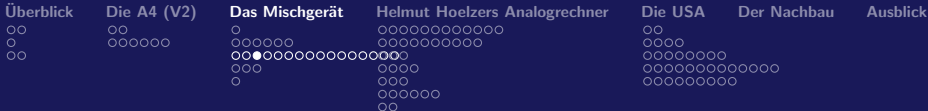
Technische Umsetzung der ε -Terme





Technische Umsetzung der φ -Terme





Implementation

Verstärker

Die Ausgangssignale der eben dargestellten Rechenschaltungen, die eine brauchbare Näherung für die Steuergleichung liefern, müssen vor einer weiteren Verwendung zur Ansteuerung der Ruderanlagen der Rakete verstärkt werden.

Dies ist nötig, um zum einen die eigentlichen, nur aus RC-Gliedern bestehenden, Teilrechenschaltungen nicht zu belasten, was anderenfalls massive Rechenfehler zur Folge hätte. Zum anderen benötigt die Ansteuerung der Servomotoren Ströme, die keinesfalls direkt aus den RC-Gliedern entnommen werden könnten.

Gleichspannungsverstärker

Da die Ausgangssignale der Rechenglieder gleichspannungsähnlich sind, wird für ihre Verstärkung eigentlich ein Gleichspannungsverstärker benötigt, was Trenkle (siehe [TREN82][S. 115]) wie folgt beschreibt:

Gleichstromverstärker

Zwischen die Ausgangspotentiometer der Kreisel und die Rudermaschinen mußten „Gleichstromverstärker“ geschaltet werden, die damals eigentlich noch gar nicht existierten. Man behalf sich mit Wechselfspannungsverstärkern mit Zerhacker am Eingang und mit synchroner Wiedergleichrichtung am Ausgang.

Gleichspannungsverstärker

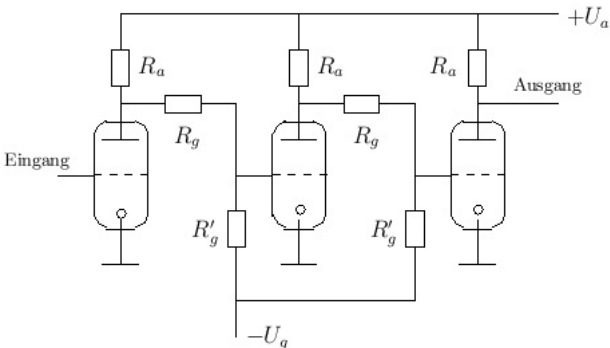
Gleichspannungsverstärker gab es natürlich bereits damals, jedoch wiesen sie ein Driftproblem auf, das sie für praktische Anwendungen unbrauchbar werde ließ.

Typisch für einen solchen Gleichspannungsverstärker ist die notwendige direkte galvanische Kopplung der einzelnen Verstärkerstufen. Dies wiederum hat zur Folge, dass sich bereits kleinste Drifteffekte früher Stufen stark auf die nachfolgenden Stufen auswirken, so dass ein solcher Verstärker dazu neigt, *wegzulaufen*.

Ein solches Weglaufen wäre für die Steuerung einer Rakete katastrophal, da die Steuersignale von hochverstärkten Driftsignalen überlagert wären, so dass die Verwendung derartiger Verstärker ausgeschlossen ist.

Gleichspannungsverstärker

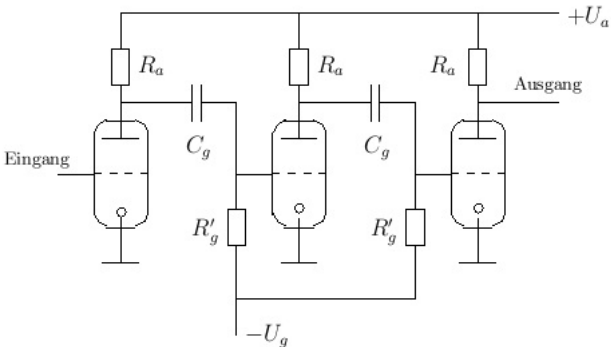
Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Schaltung eines typischen Gleichspannungsverstärkers dieser Zeit.



Wechselspannungsverstärker

Dieses Driftproblem kann elegant durch Verwendung eines Wechselspannungsverstärkers umgangen werden, dessen Merkmal eine entweder kapazitive oder induktive Kopplung der einzelnen Verstärkerstufen ist, wie die folgende Abbildung zeigt. Bedingt durch diese nicht galvanische Kopplung der Verstärkerstufen scheidet die direkte Verwendung eines solchen Verstärkers, dessen typischer Aufbau in der folgenden Abbildung dargestellt wird, für den Einsatz in der Steuerung der A4-Rakete allerdings aus.

Wechselspannungsverstärker



Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○●○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○ ○○○ ○○ ○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

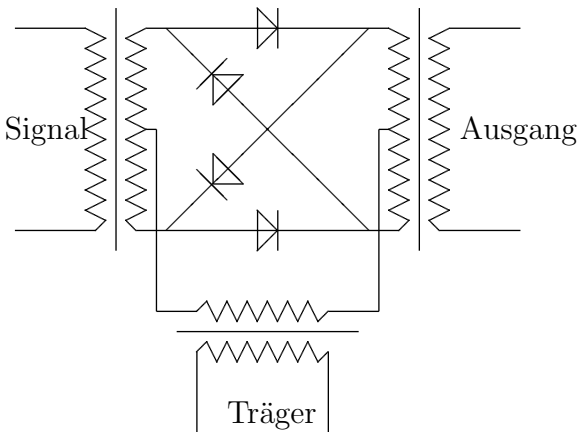
Implementation

Modulation

Um dennoch Wechselspannungsverstärker einsetzen zu können, müssen die zunächst fast als Gleichspannung vorliegenden Ausgangssignale der Rechenglieder mit Hilfe eines Modulators in Wechselspannungen umgesetzt werden, die dann in der Folge verstärkt und wieder gleichgerichtet werden können. Zur Durchführung der Modulation kamen sogenannte *Ringmodulatoren* zum Einsatz, deren Prinzipschaltung die folgende Abbildung² zeigt. Derartige Schaltungen waren in den 1940er Jahren bereits seit längerem aus der Nachrichtentechnik bekannt, mit der Helmut Hoelzer bestens vertraut war.

²Siehe z.B. [ASCH38][S. 379].

Ringmodulator



Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○●○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Implementation

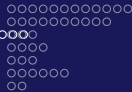
Sirutoren

Als Dioden kamen hier sowohl aus Gewichts- als auch aus Gründen der Robustheit sowie der Kosten, die bei einem Verlustgerät wie einem Bordrechner für eine ballistische Rakete im Vordergrund stehen, keine Röhrendioden zum Einsatz, wie eigentlich zu erwarten gewesen wäre.

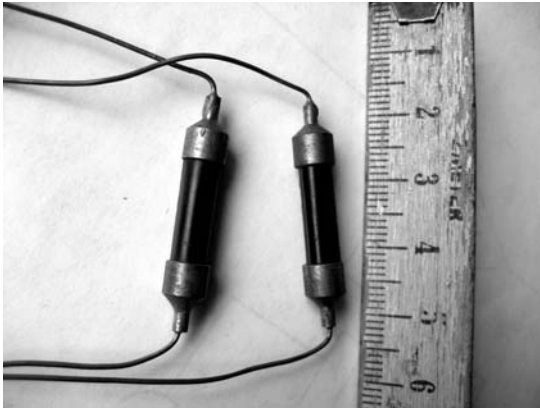
Vielmehr setzte Helmut Hoelzer auf ein neuartiges Bauelement, das im Jahre 1934 von Siemens unter der Bezeichnung *Sirutor* (kurz für *Siemens-Rundfunk-Detektor*) vorgestellt wurde.

Hierbei handelt es sich um Halbleiterdioden auf Kupferoxydulbasis – die folgende Abbildung zeigt zwei derartige Bauelemente.

Bemerkenswert ist ihre geringe Baugröße – vor allem im Vergleich mit typischen Röhrendioden dieser Zeit.



Sirutoren



Prinzipschaltung der Gesamtsteuerung

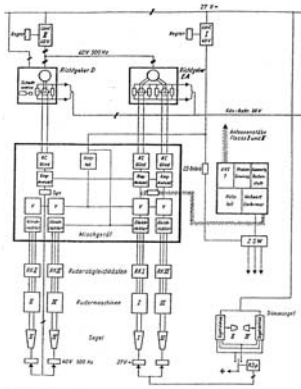
Die Prinzipschaltung der schließlich umgesetzten Raketensteuerung zeigt die folgende Abbildung³. Zentrales Element ist das sogenannte *Mischgerät*, das seine Eingangssignale von zwei als *Richtgeber* bezeichneten Kreiselgeräten erhält. Diese Signale dienen als Eingangssignale für zwei RC-Glieder der oben beschriebenen Form, denen sich jeweils ein Ringmodulator, gefolgt von einem Verstärker sowie einem Gleichrichter anschließen, deren Ausgänge die Steuerspannungen für die Rudermaschinen liefern.

³Siehe [A4_45][Abb. 80].



Implementation

Prinzipschaltung der Gesamtsteuerung



Das Mischgerät

Den konstruktiven Aufbau des Mischgerätes zeigt die folgende Abbildung⁴.

Gut zu erkennen ist der modulare Aufbau, der sowohl Fertigung als auch Wartung und Instandsetzung der Mischgeräte erheblich vereinfachte: Auf einem rechteckigen Stahlrahmen sind fünf Module angeordnet, während ein Platz für die Aufnahme der notwendigen Steckverbinder benötigt wird.

Die Verstärker wurden unter Verwendung der in den 1940er Jahren modernen Stahlröhren aufgebaut, die sich vor allem durch vergleichsweise hohe mechanische Robustheit auszeichneten.

⁴Photo: Adri de Keijzer, mit freundlicher Genehmigung.



Implementation

Das Mischgerät



Installation

Die Installation des Mischgerätes in der Raketenspitze der A4 zeigt die folgende Abbildung⁵.

Das Mischgerät selbst ist hier mit *MG* bezeichnet, während die Richtgeber durch *V* und *R* kenntlich gemacht sind. *BB* stellt die Bordbatterie dar, die unter anderem den dem Mischgerät und anderen Einheiten zugeordneten Umformer *UII* speist.

⁵Siehe [TREN82][S. 134].

○○
○
○○

○○
○○○○○

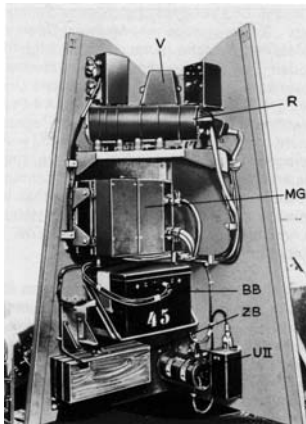
○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○●○
○

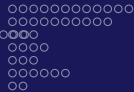
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○
○○○○
○○○
○○○○○
○○

○○
○○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○

Einsatz des Mischgerätes

Installation

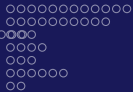




Überprüfung der Steuerungsgeräte vor dem Start

Die folgende Abbildung (nach [DORN52][S. 144-II]) zeigt die Überprüfung der Steuerungsgeräte einer V2-Rakete vor dem Start.

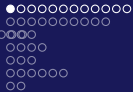




Flugbeispiele

Die beiden folgenden kurzen Videosequenzen zeigen den Flug einer A4-Rakete mit fehlerhaft arbeitender Steuerung sowie einen fehlerfreien Flug.

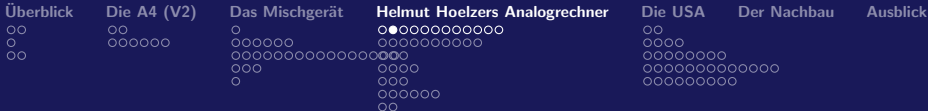




Der erste elektronische Analogrechner

Helmut Hoelzer war bewusst, dass die von ihm für das Mischgerät entwickelten elektronischen Rechenelemente auch für den Aufbau eines allgemeiner einsetzbaren Rechengerätes die Grundlage bilden könnten, was in der Folge zur Entwicklung des ersten elektronischen Analogrechners der Welt führte.

Kennzeichnend für einen Analogrechner ist die Verwendung von Modellen, sogenannten *Analogien*, zur Untersuchung komplexer Sachverhalte. Darüberhinaus arbeiten die meisten Analogrechner nicht mit einer ziffernmäßigen Darstellung der Rechenvariablen sondern repräsentieren diese in der Regel in kontinuierlicher Form, beispielsweise in Form von Spannungen etc.



Der erste elektronische Analogrechner

Aufbau von Analogrechnern

Analogrechner waren in unterschiedlichen Formen und Komplexitätsstufen bereits seit langer Zeit bekannt – heute noch geläufige Beispiele umfassen Planimeter, Rechenschieber, Gezeitenrechner, mechanische Differentialanalysatoren etc. Allen Analogrechnern ist jedoch gemein, dass sie in der Regel über mehrere, meist unterschiedliche Rechenelemente verfügen, die jeweils bestimmte Operationen wie Summation, Integration, Multiplikation etc. auszuführen im Stande sind. Zur Lösung eines gegebenen Problem es werden diese Elemente dann in einer Form zusammengeschaltet, dass sie ein Analogon des Ursprungsproblem es darstellen, das an seiner Stelle messtechnisch untersucht werden kann, wie das folgende Beispiel zeigt.

○○
○
○○

○○
○○○○○

○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○
○○
○

○○●○○○○○○○○
○○○○○○○○○○
○○○
○○○
○○
○○○○○
○○

○○
○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○

Der erste elektronische Analogrechner

Rechnen mit Analogien

Die folgenden Folien zeigen exemplarisch die Grundidee des Rechnens mit elektronischen Analogien anhand der Simulation eines einfachen, aus einer Masse, einer Feder sowie einem Dämpfer bestehenden mechanischen Systems.

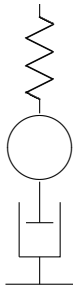
Die Abbildungen sowie das Beispiel sind [ULMA09] entnommen.



Der erste elektronische Analogrechner

Das mechanische Gesamtsystem

Diese drei Grundelemente seien für die weiteren Betrachtungen wie folgt miteinander verbunden:



$$F_m + F_d + F_s = 0$$

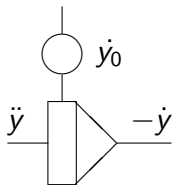
$$m\ddot{y} + d\dot{y} + sy = 0$$

○○
○
○○○○
○○○○○○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○
○○○○○○●○○○○○
○○○○○○○○○
○○○
○○○
○○○
○○○○○
○○○○
○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○

Der erste elektronische Analogrechner

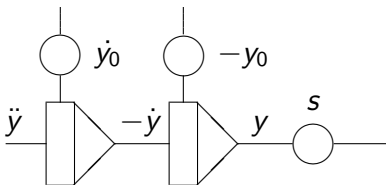
Aufbau einer hierzu analogen Rechenschaltung

Die Grundidee der Erstellung einer analogen Rechenschaltung ist nun der Aufbau einer Kette von Integrierern, um aus höheren Ableitungen niedrigere zu gewinnen. Der erste Schritt sieht dann wie folgt aus:



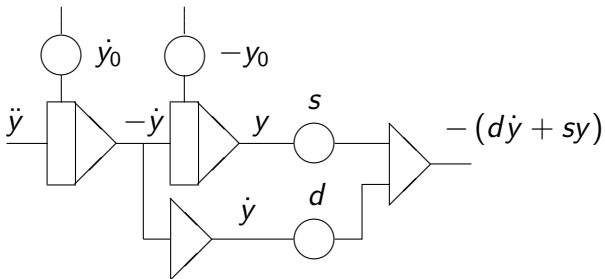
Aufbau einer hierzu analogen Rechenschaltung

Im nächsten Schritt wird durch nochmalige Integration die Variable y gewonnen:



Aufbau einer hierzu analogen Rechenschaltung

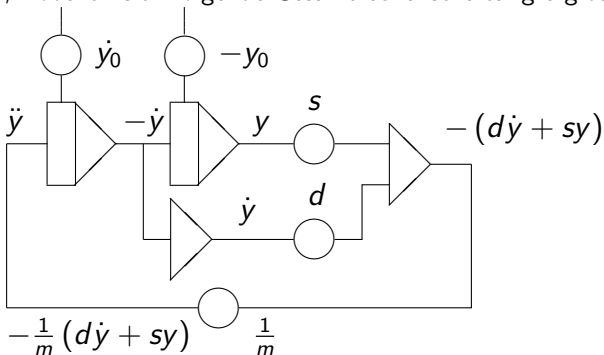
Durch zwei Summierer kann nun der Ausdruck $-(d\dot{y} + sy)$ gebildet werden:



Der erste elektronische Analogrechner

Aufbau einer hierzu analogen Rechenschaltung

Hieraus kann nun aber wiederum die zu Anfang benötigte Variable \ddot{y} gebildet werden, wodurch sich folgende Gesamtrechenschaltung ergibt:



○○
○
○○

○○
○○○○○

○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○
○○
○

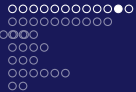
○○○○○○○○○●○○
○○○○○○○○○
○○○
○○○
○○
○○○○○
○○

○○
○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○

Der erste elektronische Analogrechner

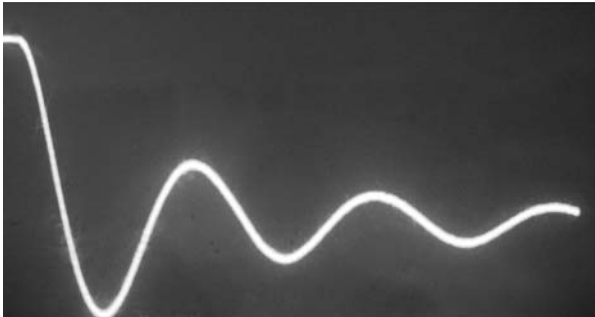
Simulationsergebnisse

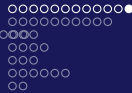
Die beiden folgenden Bilder zeigen die Ergebnisse einer mit der obigen Rechenschaltung auf einem elektronischen Analogrechner durchgeführten Simulation, bei welcher die Dämpferkonstante im ersten Fall 0.6 und im zweiten Fall 1 beträgt, während die Federkonstante gleichgehalten wurde.



Der erste elektronische Analogrechner

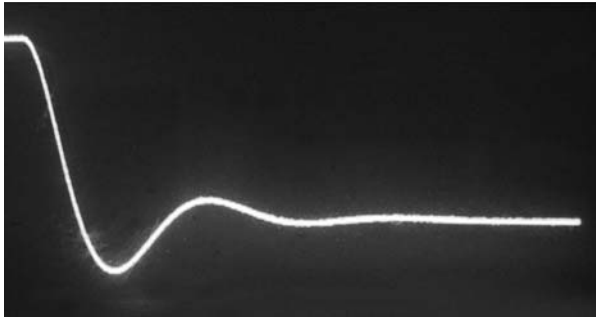
$$s = 0.5, d = 0.6$$

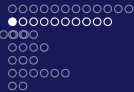




Der erste elektronische Analogrechner

$$s = 0.5, d = 1$$





Rechenelemente

Nach diesem kurzen, einführenden Beispiel beschreiben die folgenden Folien exemplarisch einige der wesentlichen Rechenelemente, die Helmut Hoelzer für seinen elektronischen Analogrechner entwickelte.

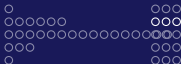
Vor allem die zentralen Elemente in Form des Differenzierers (spätere kommerzielle Entwicklungen verzichteten auf Differenzierer vollständig) sowie des Integrierers werden hierbei vergleichsweise ausführlich dargestellt, da sie Grundlage für die prinzipielle Leistungsfähigkeit von Analogrechnern sind.

Differentiation

Das RC-Glied R_{gl}/C_{gl} dient zur Glättung des zu verarbeitenden Signals und ist bezüglich seiner Zeitkonstanten so gewählt, dass keine unzulässig starke Verformung des Signales auftritt.

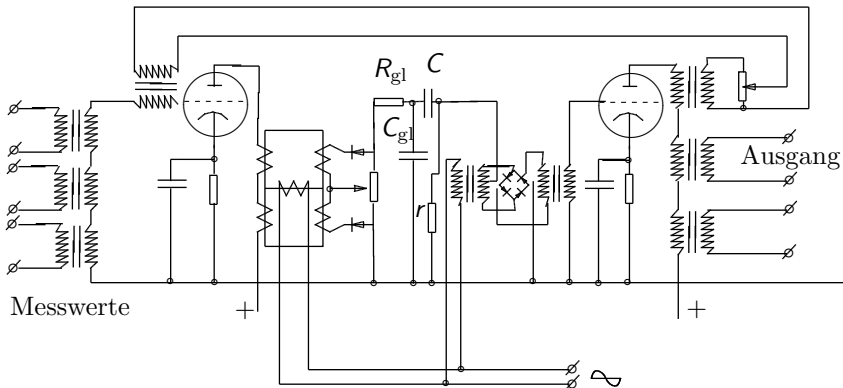
Das Ausgangssignal des Differenziergliedes wird als Spannungsabfall über dem Widerstand r abgenommen und einem Ringmodulator zugeführt, dessen Ausgang eine nachfolgende Röhrenverstärkerstufe ansteuert.

Ein einstellbarer Anteil des Ausgangssignales dieser letzten Verstärkerstufe kann dem Eingang zugeführt werden, um Rechenfehler zu kompensieren, die aus der nur näherungsweise Arbeitsweise des differenzierenden RC-Gliedes resultieren.



Rechenelemente

Differentiation

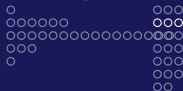


Integration

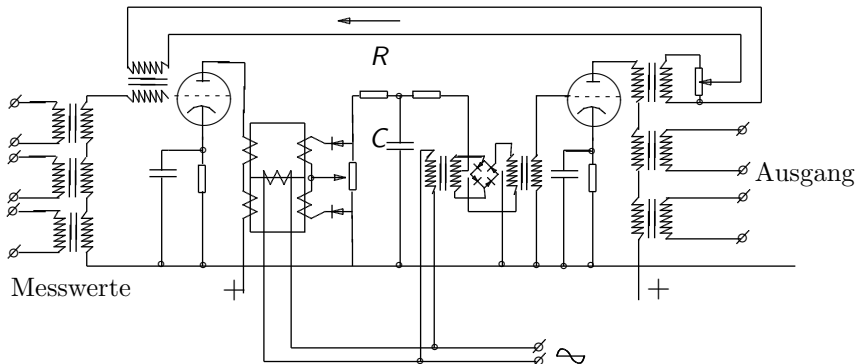
Sehr ähnlich lässt sich auch ein elektronischer Integrierer aufbauen, wie die folgende Abbildung⁷ zeigt.

Diese Schaltung unterscheidet sich von der eines Differenzierers nur in der Vertauschung des Widerstandes und des Kondensators des Rechen-RC-Gliedes sowie durch den Fortfall des Glättungs-RC-Gliedes, das nicht nötig ist, da die Integration an sich bereits eine Glättung des Eingangssignales bewirkt.

⁷Siehe [HOEL46][Bild I, 11].



Integration



Verbesserter Integrierer

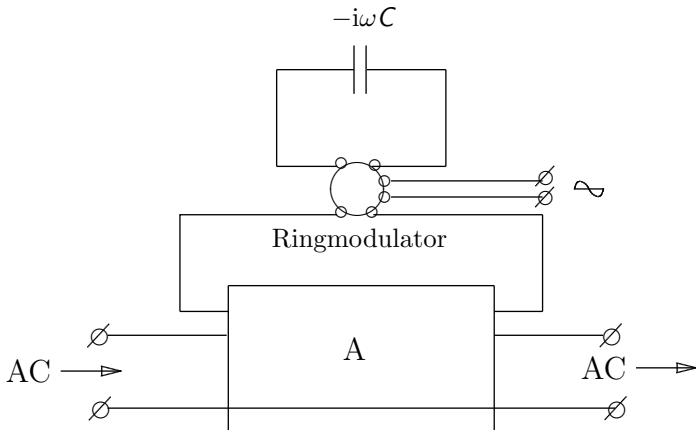
Eine wesentlich verbesserte Integriererschaltung zeigt die folgende Abbildung⁸, die einen Kondensator verwendet, der innerhalb eines quasi als Brücke geschalteten Ringmodulators liegt, so dass er stets nur einer Gleichspannung ausgesetzt ist, während die den Ringmodulator umgebenden Verstärkerstufen reine Wechsellspannungssignale verarbeiten.

Diese Schaltung wurde von Helmut Hoelzer zwar in seiner Promotionsschrift⁹ beschrieben, jedoch nicht mehr in den Peenemünder Jahren umgesetzt.

⁸Siehe [HOEL92][Fig. 5b].

⁹Siehe [HOEL46].

Verbesserter Integrierer



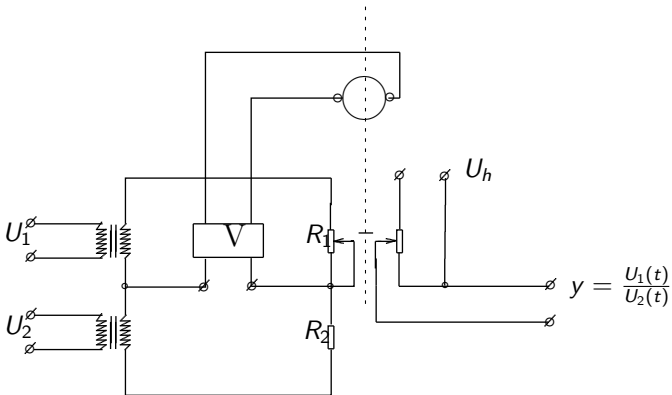
Servoschaltungen

Eine weitere beeindruckende Entwicklung Hoelzers zeigt die folgende Abbildung¹⁰ anhand einer selbstabgleichenden Brückenschaltung. Derartige Schaltungen fanden in den späteren Jahren des elektronischen Analogrechnens weite Verbreitung in Form von Servomultiplizierern, Servofunktionsgebern etc., bis sie von rein elektronischen Schaltungen verdrängt wurden.

Die dargestellte Schaltung wurde von Helmut Hoelzer zur Implementation einer Divisionsoperation vorgeschlagen, konnte jedoch aufgrund von kriegsbedingter Materialknappheit nicht mehr umgesetzt werden, so dass Divisionen durch die Lösung spezieller Differentialgleichungen umgesetzt werden mussten.

¹⁰Siehe [HOEL46][Bild II, 11].

Servoschaltungen am Beispiel der Division



Das Gesamtsystem

Die folgende Abbildung¹¹ zeigt den von Helmut Hoelzer in Peenemünde entwickelten elektronischen Analogrechner, von dem zwei Exemplare gebaut wurden, von denen wiederum eines den Weg in die Vereinigten Staaten fand, wo es noch etwa 10 Jahre lang zum Einsatz gelangte.

Unter anderem wurde dieses System zur Klärung von Fragen verwendet, die bei der Entwicklung der Hermes-Rakete auftraten. Auf seiner Grundlage wurde 1950 unter Wernher von Braun ein verbesserter Analogrechner entwickelt, der ebenfalls etwa 10 Jahre lang Verwendung fand und unter anderem bei der Entwicklung der Redstone-Rakete wertvolle Dienste leistete.

¹¹Quelle: NASA, Marshall Space Flight Center.



Das Gesamtsystem

Gut zu erkennen ist der modulare Aufbau des Systems. Die über den beiden seitlichen Ablageflächen angeordneten Modulträger beinhalten die einzelnen Rechenelemente, d.h. Integrierer, Differenzierer etc. Unter den beiden Ablageflächen befindet sich ein elektromechanischer Funktionsgeber, der mit Hilfe von auf einer rotierenden Welle angeordneten Kurvenscheiben, die mit Potentiometern abgetastet wurden, nahezu beliebige Funktionen zu erzeugen erlaubt.

Der unterste Einschub nimmt die Stromversorgung für das System auf, wozu neben den notwendigen Anoden-, Gitter- und Heizspannungen auch die Modulationswechselspannungen für die Ringmodulatoren und Synchrongleichrichter gehören.

oo
o
oo

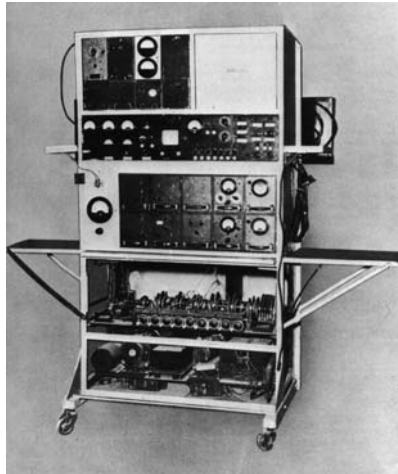
oo
oooooo

o
oooooo
oooooooooooooooooooo
oooo
o

oooooooooooooooo
oooooooooooo
oo●
oooo
ooo
ooooo
oo

oo
oooo
oooooooooo
oooooooooooooo
oooooooooooo

Aufbau



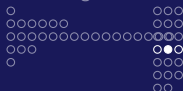
Einfache Anwendungsbeispiele

Die folgenden Folien zeigen exemplarisch einige einfache Anwendungsbeispiele des elektronischen Analogrechners von Helmut Hoelzer anhand der Behandlung einer Differentialgleichung vierten Grades der allgemeinen Gestalt

$$\ddot{\ddot{y}} + a\ddot{y} + b\dot{y} + cy + dy = f(t).$$

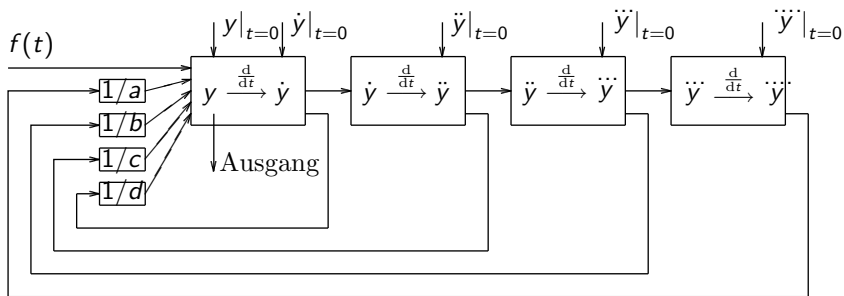
Diese Gleichung wird auf drei verschiedene Arten behandelt, nämlich unter Verwendung von

- Differenzieren,
- Integrieren sowie
- einer Mischform, bestehend aus Differenzieren und Integrieren.



Lösung einer DGL 4. Grades mit Differenzierern

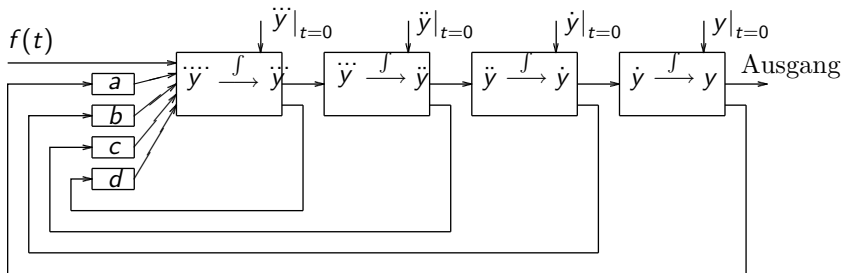
Lösung mit Differenzierern¹²:



¹²Siehe [HOEL46][Bild II, 2].

Lösung einer DGL 4. Grades mit Integrierern

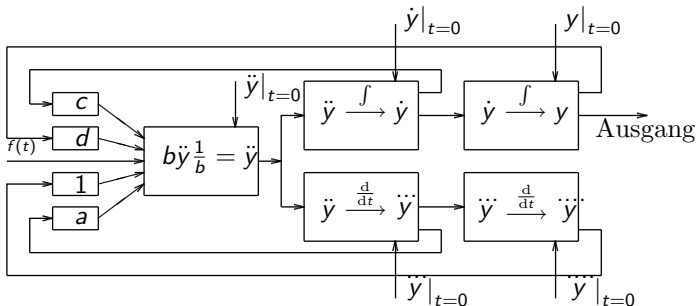
Lösung mit Hilfe von Integrierern¹³:



¹³Siehe [HOEL46][Bild II, 1].

Lösung einer DGL 4. Grades mit Integrierern und Differenzierern

Lösung unter Verwendung von Differenzierern und Integrierern¹⁴:

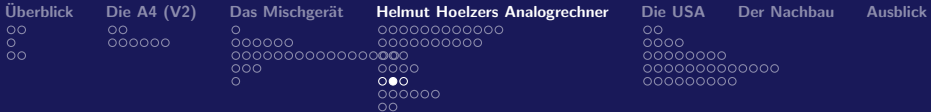


¹⁴Siehe [HOEL46][Bild II, 3].

Modell zur Fern- und Selbststeuerung

Eine weitere Entwicklung Helmut Hoelzers in seinen Jahren in Peenemünde war der elektronische Simulator, mit dessen Hilfe das Gesamtraketensystem, bestehend aus Antrieb, Strahlrudern, Kreiseln, Steuergerät etc. in Form eines elektronischen Modells nachgebildet werden konnte.

Dieser Simulator beinhaltete sowohl rein elektronische Rechenkomponenten, die denen des elektronischen Analogrechners Helmut Hoelzers entsprachen, als auch einen sogenannten *Schwingtisch*, der, angetrieben von einem Servo, um eine Achse schwingen konnte. Auf diesem Schwingtisch konnten reale Komponenten einer A4-Rakete montiert werden, die Bewegungen ausgesetzt wurden, wie sie bei einem Flug ebenfalls aufträten.



Anwendung in der Simulation

Modell zur Fern- und Selbststeuerung

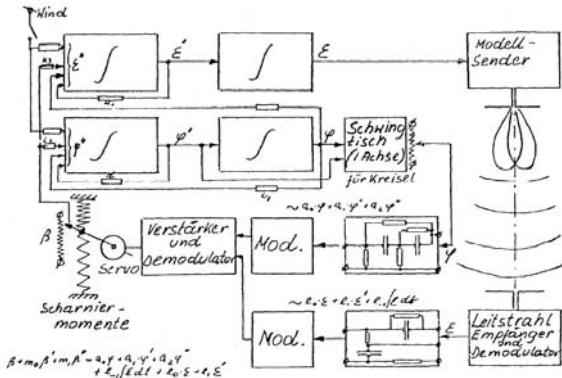
Die Rechelemente im oberen linken Viertel der schematischen Darstellung des Simulators dienen zur Umsetzung der Bewegungsgleichungen der Rakete und steuern mit ihren Ausgängen zum einen den Schwingtisch, zum anderen einen Modellsender an, mit dem eine Hälfte eines Leitstrahlensystems simuliert werden kann.

Die Ausgänge der auf dem Schwingtisch montierten Kreisel und anderer Komponenten sowie eines Leitstrahlempfängers dienen als Eingangssignale für ein reales Mischgerät, das, wie in einer wirklichen Rakete, entsprechende Steuersignale für den Strahlruderantrieb liefert, der wiederum als Eingangsvariable für die Berechnung der Bewegungsgleichungen dient.



Anwendung in der Simulation

Aufbau des Simulationssystems (vgl. [HOEL92][Fig. 12])



Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○ ●○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Vorurteile und Ablehnung

Der hier vorgestellte elektronische Analogrechner hatte mit vielen Vorurteilen zu kämpfen, die in einer Zeit, in welcher das maschinelle Rechnen noch keinen nennenswerten Verbreitungsgrad erreicht hatte, an der Tagesordnung waren. Beispielsweise bemerkte Hermann Steuding gegenüber Helmut Hoelzer (siehe [TOMA85][S. 234]):

Vorurteile

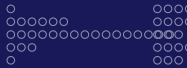
Young man, when I compute something, the results will be correct and I do not need a machine to verify it. By the way, machines cannot do this.

Auch Helmut Hoelzers direkter Vorgesetzter war von seinen Entwicklungen nicht begeistert (siehe [HOEL92][S. 9 f.]):

Vorurteile und Ablehnung

Ablehnung

[...] mein Chef kam ins Labor, sah [den] elektronische[n] Drahtverhau und sagte nur: „Hoelzer, hören Sie doch endlich auf mit dieser elektrischen Spielerei und kümmern Sie sich um Ihre Aufgabe. Ab morgen ist das alles weg, verstanden?“ Ich sagte das einzige, was man in solcher Situation sagen konnte: „Jawohl, Herr Doktor.“ Am nächsten Morgen war alles weg und zwar war es jetzt in einem kleinen Raum ohne Fenster [...] Als alles funktionierte, wurde mir dann vergeben.



Anerkennung

Mit diesen Vorurteilen wurde jedoch aufgeräumt, nachdem das System in realen Anwendungen nicht nur korrekte Ergebnisse, sondern diese auch in aussergewöhnlich kurzer Zeit lieferte. Eine Fragestellung im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Lagewinkelgeschwindigkeiten veranlasste eines Tages Wernher von Braun zu einer Anfrage bei Helmut Hoelzer, woran dieser sich wie folgt erinnert (siehe [HOEL92][S. 10 f.]):



Anerkennung

Lagewinkelgeschwindigkeiten

Von Braun fragte mich: „Sie müssen doch ein ähnliches Problem in dem Fernsteuersystem haben; wie messen Sie denn die seitliche Geschwindigkeit?“[. . .] Ich sagte ihm, dass wir die seitliche Geschwindigkeit nicht messen, sondern automatisch ausrechnen. Er sagte „Ausrechnen? Können Sie denn nicht dasselbe tun für die Winkelbeschleunigung? Und wie lange würden Sie brauchen?“ Er dachte offensichtlich in Wochen oder Monaten. Meine Antwort war: „Es ist jetzt 9 Uhr; wenn Sie mal um 6 Uhr heute Abend wieder hereinschauen würden. . . “ Er fasste das als guten Witz auf und ging wieder weg.

Anerkennung

Helmut Hoelzer schuf mit seiner Entwicklung einen zuverlässig arbeitenden elektronischen Analogrechner, welcher in der Folge mit großem Erfolg bei der Simulation und Untersuchung von Fragestellungen, die im Verlauf der Entwicklung der A4-Rakete im Zusammenhang mit ihrer Steuerung auftraten, zum Einsatz kam. Neufeld charakterisiert diesen Analogrechner wie folgt¹⁵:

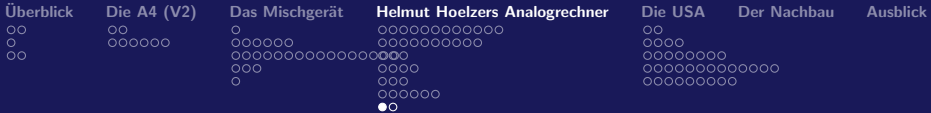
It was a fundamental innovation that really made a mass-produced guidance system possible [...]

¹⁵Siehe [NEUF07][S. 133].

Auswirkungen auf den Sprachgebrauch

Neben der praktischen Anwendung bei ingenieurtechnischen Fragestellungen hatte Helmut Hoelzers elektronischer Analogrechner auch direkten Einfluss auf die Sprache der in Peenemünde arbeitenden Wissenschaftler und Ingenieure, die sich rasch um die Begriffe *Analogon* und *elektronisches Modell* erweiterte¹⁶.

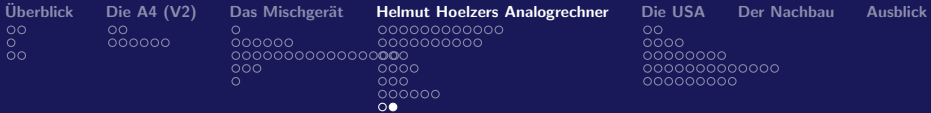
¹⁶Siehe [PETZ92][S. 57].



Promotionsschrift

Helmut Hoelzers Promotionsschrift

Bereits während seiner Zeit in Peenemünde fasste Helmut Hoelzer seine Entwicklungen (sowohl hinsichtlich des Mischgerätes als auch hinsichtlich des elektronischen Analogrechners) in Form einer Promotionsschrift zusammen, die jedoch während der verheerenden Bombenangriffe der Alliierten auf Peenemünde verbrannte. Eine nach dem Krieg angefertigte Version seiner Promotionsschrift wurde von den amerikanischen Stellen, denen die Technische Hochschule Darmstadt unterstand, mit der Begründung abgelehnt, dass keine Arbeiten mehr nötig wären, die sich mit der Entwicklung von Waffen befassten.



Promotionsschrift

Helmut Hoelzers Promotionsschrift

Einer Idee seines Gutachters, Prof. Alwin Walther, folgend, fertigte Helmut Hoelzer eine dritte Version seiner Arbeit an, die in zwei getrennte Teile aufgespalten war. Der erste Teil enthielt die Beschreibung seiner Arbeiten im Zusammenhang mit dem elektronischen Analogrechner, während der zweite Teil die direkt mit der A4 in Zusammenhang stehenden Untersuchungen beschrieb.

Nur der erste Teil dieser Arbeit wurde im öffentlichen Teil der Promotionsprüfung behandelt, an dem auch Vertreter der amerikanischen Besatzungsmächte teilnahmen.

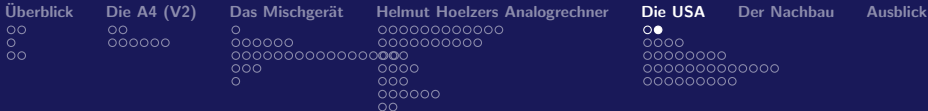
Nach Ausschluss der Öffentlichkeit wurde eine weitere Teilprüfung über den zweiten Teil der Arbeit abgelegt.



Helmut Hoelzer in den USA

Helmut Hoelzer in den USA





Helmut Hoelzer in den USA

Helmut Hoelzer in den USA

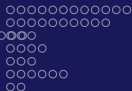
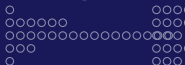
Bereits 1946, nach Abschluss seiner Promotion, übersiedelte Helmut Hoelzer im Rahmen der *Operation Paperclip* in die USA, um dort an der Raketenentwicklung der Vereinigten Staaten mitzuwirken.

Zunächst arbeitete er mit dem aus Peenemünde übersiedelten Raketenteam um Wernher von Braun in Fort Bliss sowie White Sands. Später verlagerte sich sein Lebensmittelpunkt nach Huntsville (Alabama).

Der Avionik und Rechentechnik blieb er Zeit seines Lebens verbunden – unter anderem bekleidete er in den 1960er Jahren den Posten des Direktors der Computation Division des NASA Marshall Space Flight Centers.

Bernd Ulmann ulmann@vaxman.de

Von der Raketensteuerung zum Analogrechner Helmut Hoelzers Peenemünder Arbeiten und ihr Erbe



Frühe Raketenentwicklungen der USA

Die folgenden Folien beschreiben kursorisch einige wesentliche Entwicklungen der Raketen- und Raumfahrttechnik in den USA, die hinsichtlich der Steuerungstechnik in grundlegenden Teilen auf den Peenemünder Arbeiten Helmut Hoelzers beruhten beziehungsweise von diesen maßgeblich profitierten.

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ●●○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

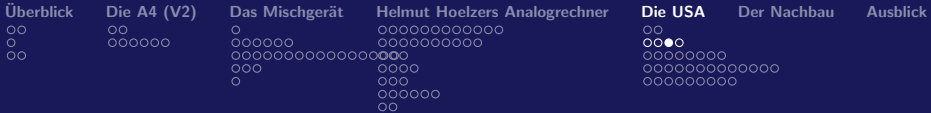
Frühe Raketenentwicklungen der USA

Frühe Raketenentwicklungen der USA

Erst 1943 wurde eine Abteilung zur Entwicklung von Raketen von der US-Army ins Leben gerufen (siehe [BULL65][S. 3]):

Rocket Branch

This new organization indicated that rockets and guided missiles were now considered members of the Army's family of weapons which would be centrally managed in the same manner as small arms, artillery, ammunition, and tanks.

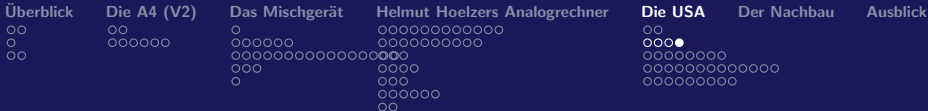


Frühe Raketenentwicklungen der USA

Hermes, V2

Bereits ein Jahr später, 1944, wurde das Projekt *Hermes* aus der Taufe gehoben, dessen Ziel die Entwicklung von Langstreckenraketen, die sowohl gegen Boden- als auch gegen Luftziele eingesetzt werden können sollten (siehe [BULL65][S. 7 f.]), war.

Direkt nach Ende des Zweiten Weltkrieges begannen die USA damit, erbeutete V2-Raketen sowie eine Vielzahl an Zubehör und Ersatzteilen aus Deutschland in die Vereinigten Staaten zu verschicken, wo am 15. März 1946 der erste Testschuss einer V2-Rakete in White Sands durchgeführt wurde ([BULL65][S. 10]).

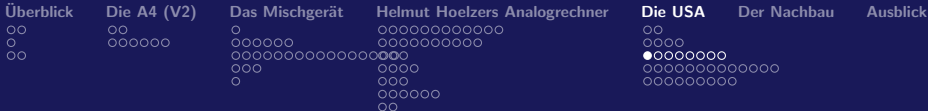


Frühe Raketenentwicklungen der USA

Bumper

In der Folge wurden die erbeuteten V2-Raketen detailliert untersucht und als Grundlage für darüber hinausgehende Eigenentwicklungen genutzt.

Eine erste Mischentwicklung fand in Form eines als *Bumper* bezeichneten Systems statt, bei dem es sich um die erste zweistufige Flüssigkeitsrakete der Welt, bestehend aus einer V2 als erster Stufe sowie einer WAC Corporal als zweiter Stufe, handelte (siehe [BULL65][S. 11]).



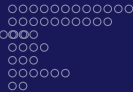
Redstone

Hermes C1

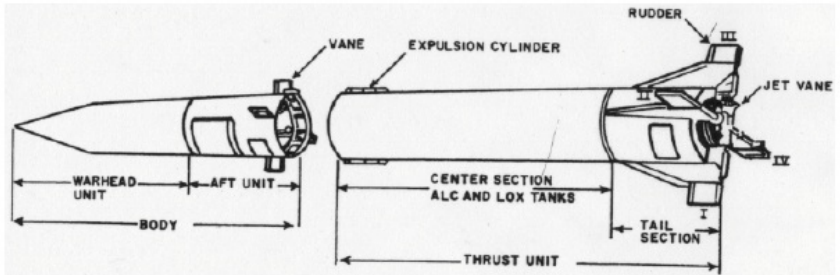
Am 11. September 1950 wurde die Entwicklungsverantwortung für eine neu zu entwickelnde Langstreckenrakete an das Ordnance Guided Missile Center übergeben. Am 10. Juli 1951 wurde diese wiederum an das Redstone Arsenal übertragen (siehe [BULL65][S. 50]). Ernsthaftige Entwicklungsarbeiten an dieser Rakete begannen am 1. Mai 1951 ([BULL65][S. 53]). Dieses Trägerraketensystem wurde in der Folge unter den Bezeichnungen *Hermes C1*, *XSSM-G-14*, *XSSM-A-14* sowie, ab dem 8. April 1952 unter dem Namen *Redstone* bekannt und sollte eine tragende Rolle sowohl innerhalb des Verteidigungssystems der USA als auch im aufkeimenden Raumfahrtprogramm übernehmen (siehe [BULL65][S. 42]).

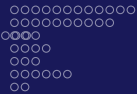
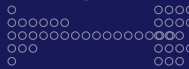
Bernd Ulmann ulmann@vaxman.de

Von der Raketensteuerung zum Analogrechner Helmut Hoelzers Peenemünder Arbeiten und ihr Erbe



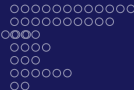
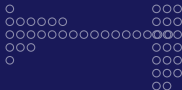
Aufbau der Redstone-Rakete





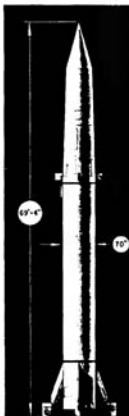
Redstone





Redstone

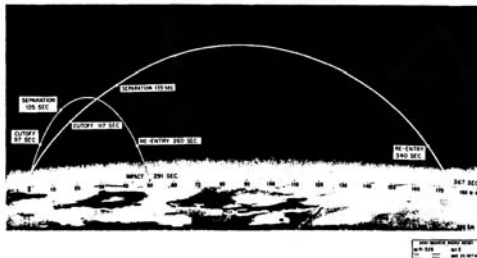
Flugprofile nach [BULL65][S. 98]



Redstone MISSILE & TRAJECTORIES BLOCK II

MAIN CHARACTERISTICS

RANGE (MAX)	324.1 KM (175 N.MI)	DRY WEIGHT	16,136 LBS.
RANGE (MIN)	92.8 KM (50 N.MI)	LOX	25,280 LBS.
CPE	300 METERS	ALCOHOL	18,835 LBS.
THRUST (SEA LEVEL)	78,000 LBS.	PEROXIDE, AIR	956 LBS.
PAYLOAD	6,305 LBS.	WEIGHT AT IGNITION	61,207 LBS.
GUIDANCE SYSTEM:		ALL INERTIAL	



Steuereinrichtungen

Die Redstone verfügte, wie ihr Vorgänger, die A4, über

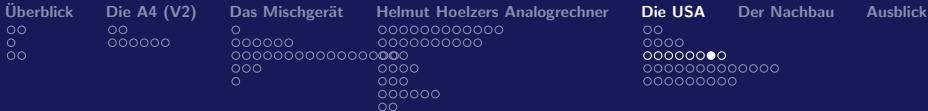
- Strahlruder (*jet vanes*),
- Steuerflächen (*air rudders*)

sowie, über die A4 hinausgehend, über kleine

- Steuertriebwerke (*air jet nozzles*).

Mit diesen Einrichtungen war eine aktive Steuerung der Flugbahn in allen drei Flugabschnitten möglich:

- angetriebene Aufstiegsphase (durch Strahlruder),
- ausseratmosphärischer Flug (durch Steurdüsen)
- Flug während und nach dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre (durch die Steuerflächen).



Redstone

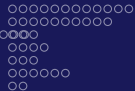
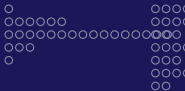
Der Steuerrechner

Der Steuerrechner der Redstone-Rakete wies große Ähnlichkeit mit dem Mischgerät der A4-Rakete auf – selbst die Idee des Mischens von Signalen als Haupttätigkeit der Steuerung blieb erhalten, wie folgendes Zitat zeigt:

Nach [RYAN]:

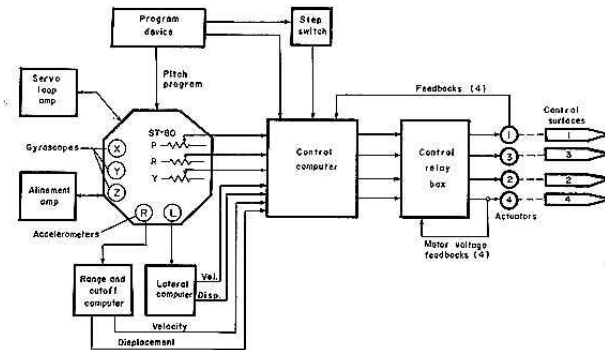
The error signals were mixed in the control computer to produce voltage commands, which were used to reposition the missile.

Die folgende Abbildung nach [RYAN] zeigt den prinzipiellen Aufbau des rein analog arbeitenden Redstone-Steuerrechners:



Redstone

Der Steuerrechner



Wissenschaftliche Anwendungen

Die Redstone-Rakete wurde, bedingt durch ihre sprichwörtliche Zuverlässigkeit, zur Grundlage einer Vielzahl wissenschaftlicher und militärischer Anwendungen:

Nach [BULL65][S. 139]:

Because of its phenomenally successful flight record, scientists also used it for daring and complex experiments in space as well as military applications. Consequently, the Redstone became the launch vehicle for the American space program.

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○●○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

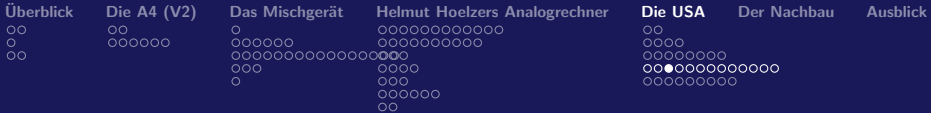
Jupiter-C und Juno-I

Operation Hardtack

Der Redstone-Rakete kommt unter anderem das (vielleicht zweifelhafte) Privileg zu, das erste Trägerraketensystem gewesen zu sein, mit dessen Hilfe scharfe Nuklearsprengköpfe verschossen und auch zur Explosion gebracht wurden.

Die geschah im Rahmen der *Operation Hardtack*, in deren Verlauf am 31. July 1958 und am 11. August jeweils eine Redstone Rakete mit einem scharfen Gefechtskopf auf Johnston Island abgeschossen wurden.

Die Detonationen der beiden Sprengköpfe geschahen hierbei in Höhen von 70 sowie 30 km (siehe [BULL65][S. 149 f.]).

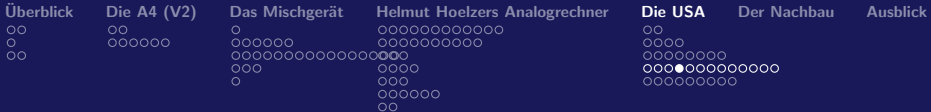


Jupiter-C und Juno-I

Project Orbiter

Bereits am 25. Juni 1954, schlug Wernher von Braun die Verwendung der Redstone-Rakete als Hauptstufe einer zu entwickelnden vierstufigen Rakete vor, mit deren Hilfe ein künstlicher Satellit in eine Umlaufbahn gebracht werden könnte. Als Oberstufen sollten Loki II-A Feststoffraketen dienen, was die Möglichkeit geschaffen hätte, ein etwa 2.5 kg schweres Objekt in einen Orbit mit einem Radius von etwa 300 km einzuschließen (siehe [BULL65][S. 140]).

Dieser Vorschlag wurde jedoch am 25. Januar 1955 zu den Akten gelegt, als der Präsident mit dem Project Vanguard ein alternatives Satellitenprogramm etablierte.

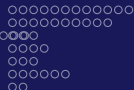
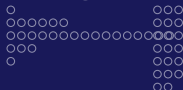


Jupiter-C und Juno-I

Jupiter-C

In der Folge wurde die Redstone-Rakete, um zwei Feststoffraketenstufen erweitert, zur *Jupiter-C* ausgebaut, mit deren Hilfe eine etwa 150 kg schwere Nutzlast auf eine ballistische Flugbahn, deren Scheitelpunkt ausserhalb der Atmosphäre lag, gebracht werden konnte (zusätzlich wurden die Tanks der zugrundeliegenden Redstone-Rakete vergrößert – siehe z.B. [BELLIS]).

Genutzt wurde dieses System für den Test von wiedereintrittsfähigen Flugkörpern, was für die Entwicklung von raketengestützten Nuklearsprengkörpern Voraussetzung war (siehe [BULL65][S. 141 f.]). Ein Einsatz des Systems für den Start von Satelliten blieb jedoch zunächst aus.

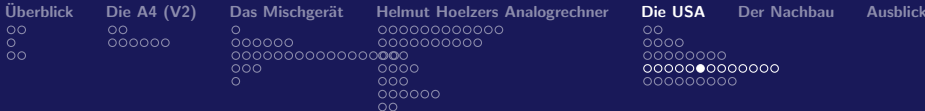


Jupiter-C

Im Juli 1957 schlug Dr. Ernst Stuhlinger in einer Rede auf dem Army Science Symposium in West Point erneut vor, das Jupiter-C Trägersystem um eine vierte Stufe sowie einen kleinen künstlichen Satelliten zu ergänzen (siehe [BULL65][S. 141 f.]).

Nach dem Start des ersten künstlichen Erdtrabanten, *Sputnik*, am 4. Oktober 1957 wies der *Secretary of the Army* darauf hin, dass acht Jupiter-C-Raketen bereit stünden und schnell und einfach um eine vierte Stufe erweitert werden könnten, um in aller Eile doch noch einen Amerikanischen Satelliten erfolgreich zu starten.

Am 8. November 1957 erging der Auftrag, zwei Jupiter-C-Raketen um eine vierte Stufe zu erweitern, um sie als Trägersystem für Satellitenstarts verwenden zu können ([BULL65][S. 145]).

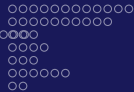


Jupiter-C und Juno-I

Vanguard

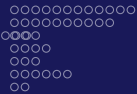
Die zunächst einzig weitere direkte Folge des erfolgreichen Starts von Sputnik war die Verstärkung der Anstrengungen der USA, mit Vanguard einen eigenen Satelliten, *TV3*, in eine Umlaufbahn zu bringen.

Die für den Start dieses Miniatursatelliten vorgesehene Vanguard-Rakete explodierte jedoch noch auf dem Starttisch, nachdem sie sich nur wenige Zentimeter in die Luft erhoben hatte, was nicht allein für eine Vielzahl schadenfroher Kommentare ausländischer Berichterstatter sorgte, sondern dem Satellitenprogramm der USA eine höhere Dringlichkeitsstufe verschaffte.



Vanguard

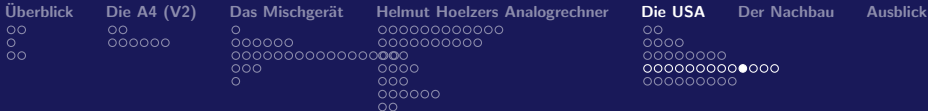
Das folgende Bild (nach [WIKI_VAN]) zeigt die glücklose Vanguard-Trägerrakete kurz vor ihrem missglückten Start am 6. Dezember 1957.



Jupiter-C und Juno-I

Vanguard



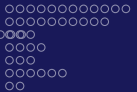


Jupiter-C und Juno-I

Juno-I

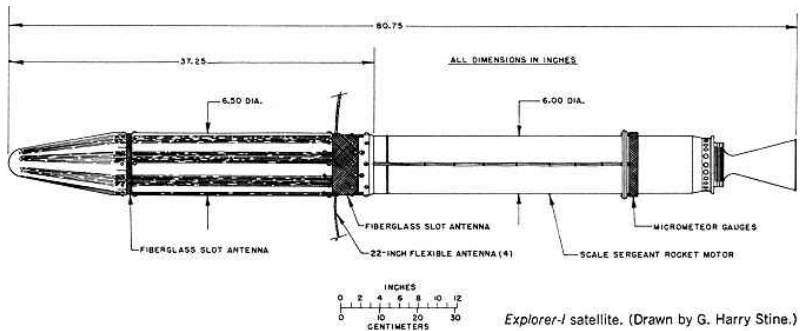
Bereits 48 Tage nach dem Auftrag, zwei Jupiter-C-Raketen um eine vierte Stufe zu ergänzen, erfolgte am 31. Januar 1958, nur kurz nach dem Vanguard-Desaster, der erste erfolgreiche Start eines Amerikanischen Satelliten mit Hilfe dieses, in der Folge als *Juno-I* bezeichneten, Trägersystems.

Die folgende Abbildung nach [NASA] zeigt den Aufbau des gestarteten Satelliten *Explorer-I*, der mit der obersten, vierten Feststoffraketenstufe des Juno-I-Systems fest verbunden, eine Einheit bildete.



Jupiter-C und Juno-I

Explorer-I Aufbau



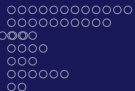
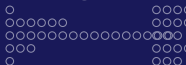
Explorer-I satellite. (Drawn by G. Harry Stine.)

Start von Explorer-I

Die folgende Abbildung nach [WIKIJU] zeigt den Start von Explorer-I am 31. Januar 1958 um 10:48 PM EST. Die NASA vermerkt zum Trägersystem folgendes:

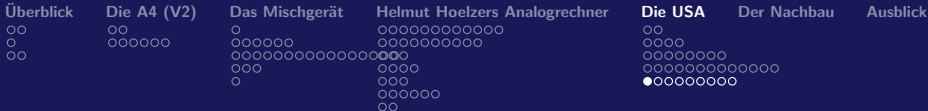
Nach [NASA]:

[...] a special modification of the Redstone ballistic missile—that was designed, built, and launched by the Army Ballistic Missile Agency (ABMA) under the direction of Dr. Wernher Von Braun. Jupiter-C, a direct descendant of the German A-4 (V-2) rocket, was originally developed in 1955-1956 as a high-performance rocket for testing purposes.



Start von Explorer-I





Mercury Redstone

Die Redstone in der bemannten Raumfahrt

Ihre geschichtsträchtigste Rolle kam der Redstone-Rakete jedoch in der Frühzeit der bemannten Raumfahrt der Vereinigten Staaten zu, in welcher sie eine im wahrsten Wortsinne tragende Rolle spielte. Bereits im Januar 1958 wurde auf einem Treffen der Army Ballistic Missile Agency ein Vorschlag unterbreitet, einen Menschen in den Weltraum und sicher wieder zur Erde zurück zu bringen. Dieses Projekt erhielt den vorläufigen Titel *Man Very High*. In der Folge wurde ein Projekt *Adam* ins Leben gerufen, dessen Ziel es war, einen Menschen auf eine ballistische Flugbahn mit einer Scheitelhöhe von 150 bis 175 nautischen Meilen zu bringen (siehe [BULL65][S. 155]).

Mercury Redstone

Die Verwendung der Redstone-Rakete in der bemannten Raumfahrt zog eine Vielzahl notwendiger Modifikationen nach sich – neben offensichtlichen Erweiterungen in Form eines Adapterringes für die eigentliche Raumkapsel, eines Fehlererkennungssystems etc. wurden ca. 800 weitere Änderungen notwendig (siehe [BULL65][S. 157]).

Die folgende Abbildung¹⁷ zeigt die Struktur einer Mercury Redstone.

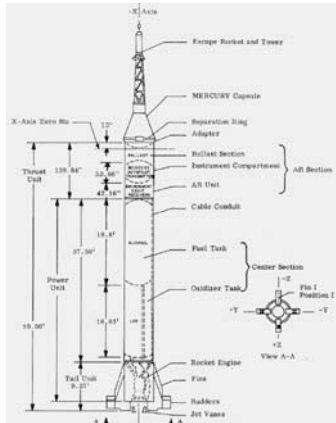
¹⁷Siehe

<http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/diagrams/mercury6.gif>.



Mercury Redstone

Mercury Redstone Struktur

Bernd Ulmann ulmann@vaxman.de

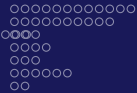
Von der Raketensteuerung zum Analogrechner Helmut Hoelzers Peenemünder Arbeiten und ihr Erbe

Mercury Redstone

Die folgende Abbildung zeigt eine reale Mercury Redstone – das dargestellte Exemplar findet sich bei Gate 3 des Kennedy Space Centers¹⁸.

Am 5. Mai 1961 brachte eine solche Mercury Redstone den ersten Amerikaner ins All. Alan Shepard absolvierte mit MR-3 einen suborbitalen Flug von 15 Minuten Dauer.

¹⁸Bild nach [SVIR08].



Mercury Redstone

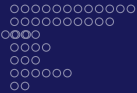


Suborbitalflüge

Die folgende Tabelle nach [BULL65][S. 167] zeigt alle durchgeführten Mercury Redstone Einsätze:

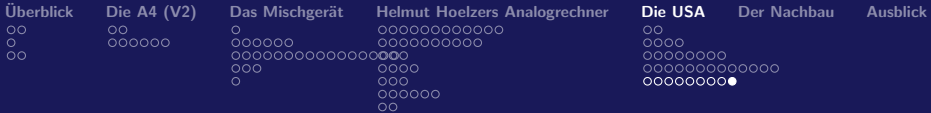
Nummer	Datum	Verlauf	Mission
MR-1	11/1960	Fehlschlag	System Test
MR-3	12/1960	Normal	System Test
MR-2	1/1961	Fehlschlag	Primat
MR-5	3/1961	Normal	Dummy
MR-7	5/1961	Normal	Shepard
MR-8	7/1961	Normal	Grissom

Die folgende Abbildung nach [URBA04] zeigt den Start von MR-3, Alan Shepards Flug:



Mercury Redstone





Mercury Redstone

Ausblick

Die Redstone-Rakete als direktes Nachfolgesystem der deutschen V2 setzte Maßstäbe hinsichtlich Zuverlässigkeit, Präzision und Einsatzfähigkeit und ebnete den Vereinigten Staaten den Weg in die Satellitentechnik sowie die bemannte Raumfahrt. Ihr Steuerungssystem ST-80 war das letzte, das vergleichsweise direkt auf der Steuerung der V2 basierte und rein analog arbeitete – spätere Trägerraketensysteme, wie die mächtige Saturn V, beruhten auf digitalen Techniken, mit deren Hilfe allein höhere Genauigkeits- und Flexibilitätsanforderungen zu erfüllen waren. Dennoch ist nicht zuletzt der Steuerung der Redstone die epochale Bedeutung dieser Rakete zu verdanken, die ihr einen Platz in der Geschichte sichert.

Bernd Ulmann ulmann@vaxman.de

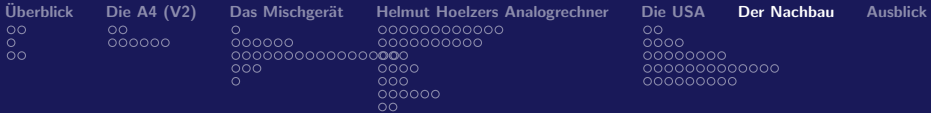
Von der Raketensteuerung zum Analogrechner Helmut Hoelzers Peenemünder Arbeiten und ihr Erbe

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

Nachbau

Nachdem sowohl beide elektronischen Analogrechner, die noch in Peenemünde gebaut und eingesetzt wurden, verloren gingen und auch der in Huntsville entwickelte Nachfolger nicht mehr existierte, entschloss sich Helmut Hoelzer im Jahre 1993, d.h. im bemerkenswerten Alter von 81 Jahren, einen Nachbau seines ersten Analogrechners zu unternehmen.

Dieser Nachbau entspricht dem Original in elektronischer Hinsicht fast vollkommen – lediglich die nicht mehr gewährleistete Verfügbarkeit bestimmter Spezialbauteile wie des rotierenden Umformers, mit dessen Hilfe die Modulationsspannungen gewonnen wurden, erzwangen einige kleinere Abweichungen vom Original, die jedoch gleichermaßen 1941 hätten umgesetzt werden können.



Nachbau

Nur zwei Jahre später, 1995, konnte Helmut Hoelzer den Nachbau dieses weltweit ersten elektronischen Analogrechners erfolgreich abschließen, der im Mai 1995 dem Berliner Museum für Verkehr und Technik übergeben wurde.

Aus Angst vor einem möglichen, durch die Arbeiten Helmut Hoelzers in Peenemünde ausgelösten Eklat, fand die Übergabe bedauerlicherweise nur in sehr kleinem Kreise statt.

Die folgende Abbildung aus dem Archiv der Familie Hoelzer-Beck zeigt Helmut Hoelzer im Jahre 1993 bei der Arbeit am Nachbau des Rechners:

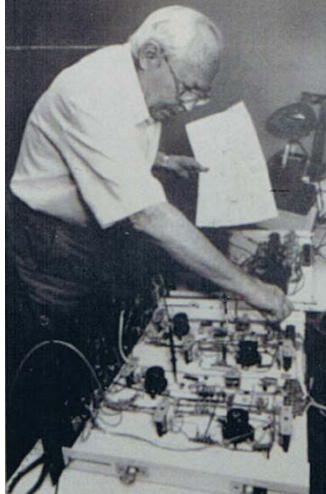
oo
o
oo

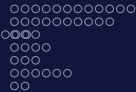
oo
oooooo

o
oooooo
oooooooooooooooooooooo
ooo
oo
o

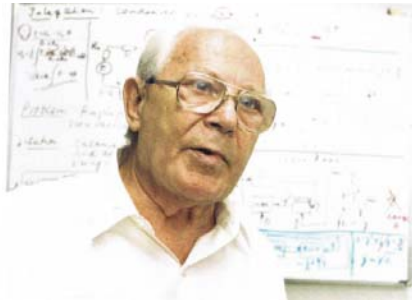
oooooooooooooooo
oooooooooooo
oooo
ooo
oo
oooooo
oo

oo
oooo
oooooooooo
oooooooooooooooooooo
oooooooooooo





Am 19. August 1996 verstarb Helmut Hoelzer im Alter von 84 Jahren in Huntsville (Alabama). Das untenstehende Bild ist eine der letzten Aufnahmen von ihm.



○○
○
○○

○○
○○○○○

○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○
○

○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○
○○○
○○○
○○○○○
○○

○○
○○○○
○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○

Das technische Erbe Helmut Hoelzers

Helmut Hoelzer kann für sich in Anspruch nehmen, nicht nur als einer der Wegbereiter der Raumfahrt im Gedächtnis zu bleiben, ohne dessen bahnbrechenden Steuerungssysteme ein erfolgreicher Vorstoß der USA ins All noch für lange Zeit im Reich der Fantasie geblieben wäre.

Nicht zuletzt bedingt durch ihre inhärente Parallelität bei minimalen Kosten konnten sich spezialisierte Analogrechner wie das Mischgerät über lange Zeit in der Raketen- und Waffentechnik behaupten, wie das folgende Beispiel anhand der Seitenregelung der Kormoran-Rakete zeigt (1970er/80er-Jahre):

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

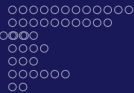
Das technische Erbe Helmut Hoelzers

Darüberhinaus hat Helmut Hoelzer der Welt den ersten elektronischen Analogrechner geschenkt, der sich als seiner Zeit weit voraus und wegweisend herausstellen sollte.

Noch Jahrzehnte später bildeten Analogrechner, die im Wesentlichen auf den von Hoelzer angewandten Prinzipien beruhten, das Rückgrat der Ingenieurwissenschaften, ohne das die Welt, wie wir sie heute kennen, anders aussähe. Nahezu alle Bereiche der Technik profitierten von der Idee des elektronischen Analogrechnens, die erst vor wenigen Jahren durch digitale Rechner mehr oder weniger vollständig verdrängt wurden.

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

-  [ASCH38] V. Aschoff, „Der Sternmodulator als Doppelgegentaktmodulator“, in *Telegraphen-Fernsprech-Funk- und Fernsehtechnik*, Bd. 27, Heft 10, 1938, S. 379–383
-  [BATE71] Roger R. Bate, Donald D. Mueller, Jerry E. White, „Fundamentals of Astrodynamics“, Dover Publications, Inc., 1971
-  [BECK60] Frederick L. Beckner, „Regions Accessible to a Ballistic Weapon“, in *Ballistic Missile and Space Technology*, Vol. III, „Guidance, Navigation, Tracking and Space Physics“, Donald P. LeGalley (Ed.), Academic Press, New York and London, 1960



[BELLIS] Mary Bellis, „First United States Satellite and Space Launch Vehicle“, in <http://inventors.about.com/od/ssstartinventions/ss/Satellite.htm>



[BULL65] John W. Bullard, „History of the Redstone Missile System“, Historical Division Army Missile Command, Historical Monograph, Project Number: AMC 23 M, 15 October 1965







[DORN52] Walter Dornberger, „V2 – der Schuss ins Weltall“, Bechtle Verlag Esslingen, 1952



[HOEL46] Helmut Hoelzer, „Anwendung elektrischer Netzwerke zur Lösung von Differentialgleichungen“, Dissertation TH Darmstadt, 1946

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

-  [HOEL92] Helmut Hoelzer, „50 Jahre Analogcomputer“, Rede anlässlich des fünfzigsten Jubiläums des elektronischen Analogrechners im Senatsaal in Berlin, 12.5.1992, Manuskript aus dem Archiv der Familie Hoelzer-Beck
-  [LANG06] Thomas H. Lange, „Analyse einer Technologieentwicklung im Dritten Reich“, Reihe *Technikgeschichte in Einzeldarstellungen*, VDI-Verlag, GmbH, Düsseldorf 2006
-  [MIME] J. Miranda, P. Mercado, „Die geheimen Wunderwaffen des III. Reiches“, Dörfler Zeitgeschichte
-  [NEUF07] Michael J. Neufeld, *Von Braun – Dreamer of Space, Engineer of War*, Borzoi Book, Alfred A. Knopf, 2007


Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		


-  [WIKI_VAN] N. N., „Vanguard rocket“, http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Vanguard_rocket_vanguard1_satellite.jpg, Stand 26. Oktober 2008
-  [WIKI_TV3] N. N., „Vanguard TV3“, http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Vanguard_TV3.jpg, Stand 26. Oktober 2008
-  [PETZ92] Hartmut Petzold, *Moderne Rechenkünstler – Die Industrialisierung der Rechentechnik in Deutschland*, Verlag C. H. Beck, 1992
-  [RYAN] Jim Ryan, „My Army Redstone Missile Days – October 1958 to February 1962“, in

Überblick	Die A4 (V2)	Das Mischgerät	Helmut Hoelzers Analogrechner	Die USA	Der Nachbau	Ausblick
○○ ○○ ○○	○○ ○○○○○	○ ○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○ ○	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○ ○○○ ○○○ ○○○ ○○○○○ ○○	○○ ○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○		

<http://www.myarmyredstonedays.com/index.html>, Stand 26. Oktober 2008

 [SVIR08] Rob Svirskas, „Cape Canaveral Air Force Station – Virtual Tour“, in <http://www.robsv.com/cape/>, Stand 26. Oktober 2008

 [TOMA85] James E. Tomayko, „Helmut Hoelzer’s Fully Electronic Analog Computer“, in *Annals of the History of Computing*, Volume 7, Number 3, July 1985, S. 227–240

 [TREN82] Fritz Trenkle, *Die deutschen Funklenkverfahren bis 1945*, AEG-TELEFUNKEN AKTIENGESELLSCHAFT, 1982, Anlagentechnik, Geschäftsbereich Hochfrequenztechnik

○○
○
○○

○○
○○○○○

○
○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○
○○○
○○
○

○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○
○○○
○○○
○○
○○○○○
○○

○○
○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○



[ULMA09] Bernd Ulmann, „Faszination Analogrechnen – Geschichte und Grundlagen elektronischer Analogrechner“, in Vorbereitung.



[URBA04] Michael Urban, „Card in Space 2 – Project Mercury, Redstone Launch Vehicle, Mission MR-3 / Freedom 7 / Alan B. Shepard“, <http://www.cardinspace.com/images/models/cis2mr3.pdf>, Stand 26. Oktober 2008



[VAVR59] Captain Luke A. Vavra, „Redstone – the Missile and its Equipment“, in *Artillery Trends*, June 1959