PROBLEME
DER ENTWICKLUNG PROGRAMMGESTEUERTER RECHENGERÄTE UND INTEGRIERANLAGEN

DER INHALT DER KAPITEL ENTSPRICHT IM WESENTLICHEN VORTRÄGEN DES KOLLOQUIUMS ÜBER PROGRAMMGESTEUERTE RECHENGERÄTE UND INTEGRIERANLAGEN IM JULI 1952 AN DER RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN

HERAUSGEBER
PROF. DR. HUBERT CREMER
RHEIN.-WESTF. TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN
MATHEMATISCHES INSTITUT
LEHRSTUHL C

AACHEN 1953

I N H A L T

V O R W O R T

Das vorliegende Heft enthält den wesentlichen Inhalt von Vorträgen, die auf dem Aachener Kolloquium über programmgesteuerte Rechengeräte und Integrieranlagen im Juli 1952 gehalten wurden. Zu dieser Tagung hatten die Institute für Mathematik, Mechanik, Physik und Theoretische Physik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule eingeladen. Dieser Einladung lag der Gedanke zu Grunde, die verschiedenen Forscher, Konstrukteure und Interessenten auf diesem Gebiete einmal zu einer gemeinsamen Aussprache zusammenzuführen. Außerdem schien es uns wichtig, den maßgebenden Persönlichkeiten der Industrie und darüber hinaus den berufstätigen Ingenieuren aller Fachrichtungen die neuen Möglichkeiten vor Augen zu stellen.

Diese Absicht ist in vollem Umfange erreicht worden. Der über Erwarten große Besuch zeigte, daß ein echtes Bedürfnis zu einer allgemeinen Aussprache über die gegenwärtigen Entwicklungsprobleme von Großrechenanlagen bestand. Die Tagung machte deutlich, daß sich auch in Deutschland die Großrechengeräte in einer raschen Entwicklung befinden, nachdem die Schwierigkeiten der Nachkriegsjahre überwunden sind. Obwohl die amerikanischen Maschinen bei den viel größeren zur Verfügung stehenden Mitteln naturgemäß leistungsfähiger sind, insbesondere größere Rechengeschwindigkeiten haben als die deutschen Geräte, ist auch jetzt schon zu sehen, daß gerade der Zwang, mit wenig Geld auszukommen, zur Herstellung wesentlich billigerer und dabei doch verhältnismäßig leistungsfähiger Geräte führen wird, die in der größenordnungsmäßigen Preislage von hunderttausend DM liegen werden.

Die Umwälzung, die durch die Entwicklung der Großrechenanlagen in der Mathematik angebahnt ist, kann kaum überschätzt werden. Sie ist größer als beispielsweise die durch die Erfindung der Eisenbahn oder sogar des Flugzeugs bewirkte Revolution des Verkehrswesens. Nicht nur sind viele Probleme der Forschung und insbesondere der Technik erst durch die neuen Rechengeräte angreifbar geworden, sondern auch die Rechenmethoden der Mathematik wurden und werden durch die Rechengeräte teilweise völlig umgestaltet. Während man früher bemüht war, die Zahl der Rechenschritte durch geistreiche Methoden möglichst weit herabzusetzen, erweisen sich heute Rechnungen mit sehr vielen Rechenschritten oft als praktischer, wenn nur das Schema der Durchführung etwas einfacher ist. So hat man früher naturgemäß versucht, die Frage nach den Extrema einer Funktion von n Veränderlichen auf die Auflösung eines Systems von n linearen Gleichungen zurückzuführen. Heute gestatten es die Rechenautomaten, ein System von n Gleichungen (die übrigens keineswegs linear zu sein brauchen) einfach dadurch zu lösen, daß man die linken Seiten quadriert und die Minima der dadurch entstehenden quadratischen Form durch Einsetzen aller in Betracht kommenden Werte bestimmt. Eine programmgesteuerte Maschine ist in der Lage, selbsttätig alle Werte einzusetzen und dabei diejenigen aufzuschreiben, bei denen sich zufällig Null ergibt, während die ungeheure Zahl der übrigen unterdrückt wird. Ohne die neuen Hilfsmittel würde eine solche Methode absurd erscheinen. Sie wäre nicht nur unvorstellbar langweilig, sondern tatsächlich undurchführbar. Nunmehr, wo es auf die Zahl der Rechenschritte nicht mehr ankommt, ist sie aber der gegebene, am einfachsten zum Ziele führende Weg.

Wir müssen lernen, mit dem "Auge der Maschine" zu sehen. Das ist ein ganz neues und anderes Sehen als das Sehen mit dem Auge des normalen Rechners oder des Mathematikers.

Es gibt zwei große Gruppen von Großrechenanlagen: die Integrieranlagen und die programmgesteuerten Ziffernmaschinen.

Die Integrieranlagen (Differential-Analysers) gestatten die Integration von Systemen von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Sie arbeiten nach dem Prinzip der "Rückkopplung", bei dem die durch die Differentialgleichungen gegebenen Beziehungen zwischen den Größen x, y, y', y" usw. durch geeignete mechanische oder elektrische Kopplungen wirklich hergestellt werden. Sie zeichnen in wenigen Minuten mit voller Zeichengenauigkeit jede gewünschte Lösung des Systems.

Die großen programmgesteuerten Rechenautomaten (Ziffernmaschinen) können grundsätzlich Rechnungen jeder Art und jeder erforderlichen Genauigkeit durchführen. (Praktisch sind natürlich auch hier gewisse, sehr weit gesteckte Grenzen gegeben.) Die Rechenautomaten unterscheiden sich von den gewöhnlichen Rechenmaschinen bereits durch ihre ungeheure Rechengeschwindigkeit. Diese übertrifft die Geschwindigkeit eines gewöhnlichen Rechners weit mehr als die Geschwindigkeit eines D-Zuges die des Fußgängers. Eine Elementaroperation erfordert meist nur 1/1000 Sekunde und noch weniger. Ihre Rechenkraft ist ungeheuer, so daß Rechnungen mit vielen Milliarden Rechenschritten in verhältnismäßig kurzer Zeit durchgeführt werden können. Eine große elektronische Rechenmaschine kann 2000 und mehr Rechner mit besten elektrischen Bürorechenmaschinen ersetzen. Die enorme Rechengeschwindigkeit ist natürlich besonders für gewisse militärische Probleme von außerordentlicher Bedeutung. Grundsätzlich muß es möglich sein, eine feindliche Fernrakete während ihres Fluges durch Radargeräte anzupeilen und dann in wenigen Sekunden den Ort und Zeitpunkt des Einschlages ausrechnen zu lassen, so daß die Bevölkerung der bedrohten Stadt noch rechtzeitig gewarnt werden kann.

Die Rechenautomaten unterscheiden sich aber von den gewöhnlichen Rechenmaschinen nicht nur durch die Rechengeschwindigkeit, sondern vor allem durch die erstaunlich klingende Eigenschaft, "bedingte Befehle" ausführen zu können. Unter einem "bedingten Befehl" wird dabei ein Befehl verstanden, die Rechnung je nach dem Ausfall der sich bei der Rechnung ergebenden Zwischenresultate in verschiedener Weise, gegebenenfalls nach ganz anderen Methoden, fortzusetzen. Man glaubte früher, daß zu solchen Entscheidungen die menschliche Intelligenz unentbehrlich sei. Von den Rechnern und Rechnerinnen wird daher gehobene Bildung verlangt, besonders dann, wenn sie etwa von Fall zu Fall unter verschiedenen Rechenmethoden die zweckmäßigste auswählen sollen.

Es ist eine ganz erstaunliche Erkenntnis, daß das alles auch eine programmgesteuerte Maschine selbsttätig machen kann. Natürlich kann die Maschine den denkenden Menschen nicht ersetzen. Es zeigt sich aber, daß viele "Entscheidungen", zu deren Durchführung man bisher den menschlichen Verstand für notwendig hielt, tatsächlich auch mechanisch ausgelöst werden können. Das liegt einfach daran, daß diese "Entscheidungen" auf die Frage zurückgeführt werden können, ob eine während der Rechnung sich ergebende Zahl größer oder kleiner als eine andere ausfällt. Die Maschine kann nun so konstruiert werden, daß sie auf ein solches Ergebnis auf vorgeschriebene, gegebenenfalls ganz verschiedene Weisen reagiert.

Die modernen Rechenautomaten werden den Mathematiker nicht entbehrlich machen, ebenso wenig wie die Erfindung der Eisenbahn die Söhne der alten Postillione arbeitslos gemacht hat. Im Gegenteil! Das Bedürfnis zur Durchführung von Großrechnungen wird in Zukunft wachsen, und man wird mehr Mathematiker benötigen als früher.

Die Aufgaben, für deren Bewältigung Großrechenanlagen eingesetzt werden können, sind natürlich außerordentlich mannigfaltig. Hier seien kurz einige der Probleme herausgegriffen, die in den Instituten der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen zur Zeit bearbeitet werden bzw. demnächst bearbeitet werden sollen. Um die Liste nicht zu umfangreich zu machen, beschränke ich mich dabei auf solche Aufgaben, die mit den Integrieranlagen durchgeführt werden können. Es handelt sich um Probleme der Forschung und Technik, die auf nicht geschlossen lösbare gewöhnliche Differentialgleichungen und Systeme solcher Differentialgleichungen führen, deren Integration wegen des ungeheuren Arbeitsaufwandes bisher unerledigt bleiben mußte oder nur teilweise oder unbefriedigend durchgeführt werden konnte. In sämtlichen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften haben solche Differentialgleichungen größte praktische Bedeutung. Ihre Integration läßt sich mit der Integrieranlage meist bequemer durchführen als mit den programmgesteuerten Rechenautomaten, besonders dann, wenn man sich mit Zeichengenauigkeit begnügen kann, welche für sehr viele Probleme ausreicht.

Im Bauingenieurwesen verläßt man den Stahlgerüsthochbau immer mehr und geht zur Schalenbauweise über. Um hier die gewünschte Formgebung mit den Forderungen der Festigkeit in Einklang zu bringen, muß man die Schalen-Differentialgleichung für viele Entwürfe und Bedingungen integrieren. Weitere Probleme liegen im Behälterbau der chemischen Großindustrie vor. Bei der Dimensionierung von Hochdruckbehältern, die zugleich bei sehr hohen Temperaturen arbeiten müssen, ist die Durchrechnung einer großen Zahl von Variationen notwendig. Dabei kann beispielsweise beim Problem der zweckmäßigsten Dimensionierung von Behälterböden eine einzige Integration einen auf die bisherigen Methoden angewiesenen Mathematiker unter Umständen ein Jahr beschäftigen. Die Technik verlangt aber dringend, daß bei der Berechnung solcher Behälter durch zahlreiche Vergleichsrechnungen das für den jeweiligen Verwendungszweck erforderliche Optimum gefunden wird. Denn nur dann kann für solche Anlagen eine ausreichende Lebensdauer (wenigstens 100 000 Betriebsstunden) garantiert werden.

Auch für die Berechnung der Schwingungen hoher, schlanker Bauwerke (Schornsteine, Leuchttürme, Brückentürme, Brückenpfeiler oder ähnliches) unter der Wirkung von Erschütterungen ist eine Integrieranlage von großem Vorteil. Als weitere Probleme seien genannt: Berechnung der Biegesteifigkeit von kegelförmigen Behälterböden, Dächern und Silotrichtern; Festigkeitsberechnung von Hängebrücken und die zahlreichen Platten- und Scheibenprobleme (Fahrbahnplatten von Brücken, elastische Platten unter Einzel- oder Streckenlasten).

Im Wasserbau erfordert z.B. die Berechnung der Wasserschwingungen in einem Wasserschloß die Integration einer nichtlinearen, nicht geschlossen lösbaren Differentialgleichung. Im Schiffsbau kommt man z.B. bei der Berechnung der Schlingertanks, der Untersuchung der Schlingerbewegungen und der Stabilität auf Simultansysteme nichtlinearer Differentialgleichungen.

Auch der Maschinenbau bietet zahlreiche Probleme, die auf nichtlineare Differentialgleichungen führen, z.B. die Berechnung der Schwingungen von Dampfturbinenschaufeln und von Hochdruckkesseltrommeln sowie die Festigkeitsberechnung der im Dampfturbinenbau häufig verwendeten rotierenden konischen Scheiben. Beim Entwurf solcher Anlagen müssen die nichtlinearen Differentialgleichungen für zahlreiche Vergleichswerte integriert werden. Dies kann nur mit einer Integrieranlage oder mit einem Rechenautomaten befriedigend durchgeführt werden.

Im Hüttenwesen treten komplizierte Differentialgleichungen auf, z.B. bei der Berechnung des Volumens von Walzgut, das an seinem Umfang gedrückt wird, ohne gleichmäßige Abnahmen zu erfahren, z.B. bei zonenweise veränderlichem Volumen, wie dies im Streckkaliber von Pilgerwalzen der Fall ist, wobei die Abnahmen im Kalibergrund erheblich größer als im Walzensprung sind. Andere Gleichungen kommen beim Schrägwalzen von Rohren in Betracht, wobei vom Lochungsprozeß ausgegangen wird. Wieder andere Gleichungen beziehen sich auf die Druckverteilung beim Walzen zylindrischer und irregulärer Profile. Auch zur Lösung von Schwingungsgleichungen, z.B. beim Auftreten von Schwingungen an schweren Hämmern, wobei der Schlag im Fundament gedämpfte Schwingungen hervorruft, im Material dagegen Schwingungen, die sich als Rückprallenergie in der Reflexion des Hammers auswirken, ist die Verwendung einer Integrieranlage zweckmäßig.

In der technischen Physik soll die Integrieranlage die Durchführung der folgenden Aufgaben ermöglichen: Integration der charakteristischen Differentialgleichungen von Schwingungs- und Regelungssystemen; Tabulierung von Funktionen, insbesondere von Mathieuschen Funktionen und Sphäroidfunktionen. Die Theorie dieser Funktionen wurde in den letzten Jahren so weit vorgetrieben, daß die Anwendung auf viele praktisch wichtige Probleme grundsätzlich möglich ist und nur an dem Fehlen numerischen Materials scheitert. Als spezielle Probleme sollen im Institut für Theoretische Physik zunächst behandelt werden: 1.) Die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen von Kreisscheibenantennen, 2.) Die Beugung von elektromagnetischen Wellen an kreisförmigen Blenden. Beide Probleme sind für die Entwicklung der Ultrakurzwellen-Praxis von großer technischer Bedeutung.

Von weiteren interessanten Problemen der technischen Physik seien genannt:
Berechnung der Festigkeit von Gußeisenrohren, Schleifscheiben und keramischen Rohren der chemischen Industrie nach den hier geltenden nichtlinearen Verformungsgesetzen; Berechnung der atomaren Bindungsverhältnisse in Molekülen und Metallen zur Klärung der Eigenschaften technisch wichtiger Legierungen.

In der Verkehrswissenschaft leisten Rechenautomaten oder Integrieranlagen wertvolle Dienste, um z.B, die Selbstkosten für einen geplanten oder ausgebauten Verkehrsbetrieb zu ermitteln.

Für alle im vorhergehenden genannten Probleme ist der Einsatz einer Integrieranlage besonders zweckmäßig. Doch können alle diese Aufgaben natürlich auch mit einem Rechenautomaten gelöst werden.

Darüber hinaus können mit den programmgesteuerten Ziffernmaschinen alle Arten numerischer Rechnungen programmiert und dann automatisch durchgeführt werden. Das Problem der Programmierung ist allerdings für manche technisch wichtigen Aufgaben noch nicht in befriedigender Weise gelöst. Hier öffnet sich dem Mathematiker ein dankbares Betätigungsfeld; die Überwindung der hier noch bestehenden Schwierigkeiten ist jedoch voraussichtlich nur noch eine Frage der nächsten Zeit. In der Zukunft wird es sicher so sein, daß man alle großen Rechnungen mit Großrechenanlagen bewältigen wird. Der Vorteil liegt auf der Hand. Es sei hier nur erinnert, daß es für die Industrie bei Großaufträgen, besonders im Export, sehr oft darauf ankommt, mit dem ersten Angebot zur Stelle zu sein. Der nur scheinbar hohe Preis der Großrechenanlagen sollte daher nicht schrecken. Er kann sich bereits bei einem einzigen Großauftrag bezahlt machen. Gut funktionierende Anlagen in Preislagen um hunderttausend DM und ausgesprochene Großanlagen für weniger als eine halbe Million DM können von deutschen Firmen schon heute gebaut werden. Es ist zu erwarten, daß die Preise in Zukunft noch erheblich gesenkt werden können.

Die Erstellung von Großrechenanlagen gehört meines Erachtens ebenso zum Aufbau der deutschen Technik wie der Ausbau von Berg- und Hüttenwerken. Ein Land, das in dieser Entwicklung zurückbleibt, wird seine Versäumnisse bald am Rückgang seines Exportes sehr schmerzlich spüren.

Da Rechenautomaten grundsätzlich alle Arten von Rechnungen durchführen können, während die Integrieranlagen im wesentlichen nur Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen lösen, ist gelegentlich die Meinung geäußert worden, daß die Integrieranlagen nur als eine zeitbedingte Zwischenlösung Berechtigung hätten, die Zukunft aber ausschließlich den Ziffernmaschinen gehöre. Diese Ansicht halte ich, bei aller Anerkennung der großen Leistungsfähigkeit der Ziffernmaschinen, nicht für zutreffend. Die Überzeugung, daß beide Klassen von Maschinen in Zukunft notwendig sein werden, vertrat auch Prof. Dr. A. Walther, Direktor des Institutes für praktische Mathematik an der Technischen Hochschule in Darmstadt, in seinem Vortrag über "Rechentechnik in Darmstadt, vorhandene Geräte, Ergebnisse, Pläne" auf dem Aachener Kolloquium.

Ein großes Recheninstitut bzw. ein Unternehmen, das Großrechnungen verschiedener Art durchzuführen hat, sollte darauf sehen, Anlagen beider Typen, von denen jede ihre unersetzlichen Vorzüge aufweist, zu besitzen.

Da dieses Heft für weitere Kreise der Technik und Industrie bestimmt ist, insbesondere für die auf anderen Gebieten praktisch arbeitenden Ingenieure, sei es mir erlaubt, die Autoren der hier veröffentlichten vier Vorträge kurz vorzustellen:

Prof. Dr. L. Biermann, Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen und Universität Göttingen, baute zusammen mit Dr. Billing in Göttingen den ersten deutschen elektronischen Rechenautomaten nach dem Kriege.

Dr. habil. H. Bückner ist Chefmathematiker der Firma Schoppe u. Faeser in Minden. Die Firma Schoppe u.Faeser lieferte vor kurzem die von Dr. Bückner entwickelte,z.Zt. leistungsfähigste Integrieranlage Europas an das National Physical Laboratory in Teddington (England).

Dr. F. Joachim Weyl ist Direktor der Mathematischen Abteilung des Marineforschungsamtes der USA in Washington.

Dipl. Ing. K. Zuse, Neukirchen, der Konstrukteur des ersten deutschen Rechenautomaten, beschäftigt sich als Leiter der von ihm gegründeten Firma K. Zuse K.-G., Neukirchen, insbesondere mit dem Bau marktfähiger programmgesteuerter Zifferngeräte zur industriellen Verwendung.

Auf eine allzu wörtliche Wiedergabe der Vorträge wurde bewußt verzichtet, denn gesprochenes Wort ist nicht ohne weiteres geschriebenes Wort und auch umgekehrt. Die Texte für die vorliegende Veröffentlichung wurden an Hand von Bandaufnahmen unter freundlicher Mitwirkung der Verfasser geschrieben. Jedes Kapitel gibt den wesentlichen Inhalt eines Vortrages in der für Lektüre und Studium geeigneten konzentrierteren Form wieder. Ich glaube, daß auf diese Weise ein einheitliches Ganzes entstanden ist, das über die engeren Fachkollegen hinaus auch weitere Kreise interessieren wird.

Aachen, im Januar 1953 H. Cremer

E r s t e s   K a p i t e l

ÜBER DIE ENTWICKLUNG DES INTEGROMAT

Dr. habil. H. Bückner
Minden (Westf.)
Fa. Schoppe & Faeser

§ 1. Zielsetzung

Unsere große Integrieranlage, die wir als Integrieranlage "Göttingen" bezeichnet haben und an das National Physical Laboratory in Teddington (England) lieferten, ist auf ein Maximum an erreichbarer Genauigkeit gezüchtet. Dieses Maximum erlaubt komplizierte Schaltungen und stellt dann immer noch mit einem vernünftigen Fehler auch bei komplizierten Gleichungen oder Systemen komplizierter Gleichungen die Lösung dar. Ich werde über einen kleinen Bruder der Integrieranlage Göttingen berichten. Wir nennen ihn "Integromat". Er soll nicht die große Integrieranlage ersetzen. Er hat eine andere Aufgabe.

Wir haben uns vor einigen Jahren überlegt, daß nicht jedes Institut und nicht jeder Betrieb sich eine große Integrieranlage, die 1 Million oder mehr kostet, leisten kann. Andererseits gibt es aber viele Probleme, namentlich in der Ingenieurforschung, bei denen die Genauigkeitsforderungen beschränkt sein können. (Es gibt viele Differentialgleichungen der Ingenieurforschung, besonders Differentialgleichungen mit vielen Parametern, bei denen man froh ist, wenn man die Lösung auf ungefähr 1 Prozent genau darstellen kann.) Unsere Zielsetzung bei der Entwicklung der kleinen Integrieranlage war daher, daß diese kleine Integrieranlage mit gröberer Genauigkeit rechnen, aber auch entsprechend weniger kosten soll.

§ 2. Der Kondensator als Integrator

Man hätte verschiedene Wege einschlagen können, um eine kleine Integrieranlage zu entwickeln. Es war bekannt, daß man beispielsweise elektronisch integrieren kann, indem man als Integrator einen Kondensator benutzt, dessen Spannung bekanntlich das Zeitintegral seines Ladestromes darstellt. Ich hatte 1947 zunächst daran gedacht, dieser Richtung nachzugehen. Aber als mich damals zwei britische Kollegen, Prof. Porter und Dr. Womersley, beide bekannte Fachleute auf diesem Gebiet in England, beide frühere Mitarbeiter von D. R. Hartree, fragten, was ich später tun wollte, und wir über dieses Problem diskutierten, da rieten mir beide dringend davon ab, das Prinzip der Kondensator-Integration zu verfolgen. Sie wiesen mich vor allem auf einen Nachteil hin, nämlich, daß die Integrationsvariable zeitproportional sein muß. In der Tat weiß jeder, der mit mechanischen Integrieranlagen zu tun hat, daß man die Integrationsvariable sozusagen fest in der Hand hat und nach Belieben über sie verfügen kann, so daß die Bindung der Integrationsvariablen an die Zeit sehr einschränkend ist und die Flexibilität der Integrieranlagen klein hält. Die gröbere Genauigkeit der Kondensatorintegratio hätte zwar schon unseren Wünschen entsprochen, ebenso der Preis, aber das Moment der gebundenen Integrationsvariablen gefiel uns nicht.

§ 3. Der unstetige Integrand

Zu Weihnachten 1948 überlegte ich mir nach einem Besuch in England, daß es möglich sein müsse, den Integranden auf einzelne diskrete Werte zu beschränken, also mit einem unstetigen Integranden zu arbeiten. Betrachten wir das an einem elementaren Beispiel: Es soll $\int_a^b f(x)\,dx$ integriert werden.

a) Beim bekannten Reibradintegrator würde man eine solche Integration stetig ausführen, stetig, soweit man bei den

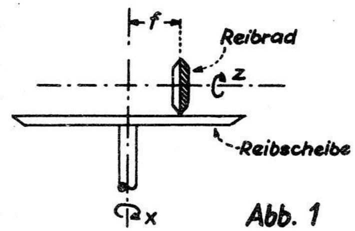


Abb. 1

Naturwissenschaften von Stetigkeit reden kann. Man würde die Variable x als Drehbewegung in die Reibscheibe einleiten und den Abstand f des Reibrades proportional dem Integranden f(x) machen. Der Drehwinkel z des Reibrades würde dann bis auf eine Proportionalitätskonstante das Integral $z = \int_a^b f(x)\,dx$ geben. Dabei muß f(x) stetig sein, so daß der Abstand des Reibrades vom Reibscheibenmittelpunkt stetig geändert werden kann. (Abb. 1).

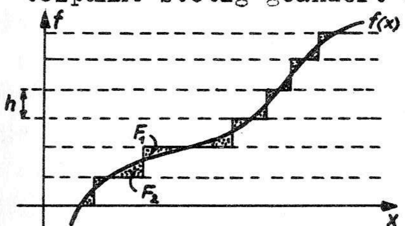


Abb. 2

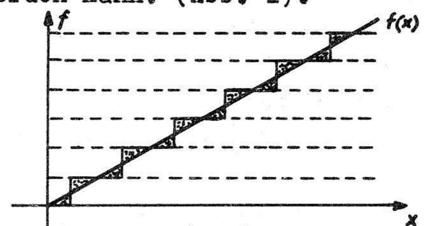


Abb. 3

b) Eine Methode des Integrierens ist aber auch die Approximation durch eine Treppenfunktion. Es sei f(x) aufgetragen (Abb. 2). Dann könnte man versuchen, f (x) durch ein Treppenpolygon zu approximieren. Ich unterteile die Ordinatenachse f mit einer Schrittweite h in gleiche Teile. Die Treppe ist so konstruiert, daß benachbarte Flächen (z. B. F_1, F_2), die die Treppenfunktion mit der Funktionskurve für f(x) bildet, möglichst gleich sind. Wenn wir jetzt statt über f(x) über diese Treppenkurve integrieren, dann werden wir eine Approximation des Integrals über f(x) erhalten.

Wenn f(x) linear ist, sieht das besonders einfach aus. Hier hat man auch eine erste Vorstellung über die Größenordnung des Fehlers. Die Treppenkurve zeichne ich so, daß die senkrechten Teile der Treppenkurve immer die Kurve f(x) zwischen zwei Schnitten mit den gestrichelten waagerechten Linien halbieren (Abb. 3). Dann erreiche ich, daß die Dreiecke einander gleich sind. Wenn ich bei der Integration mit der Länge des Integrationsintervalls Glück habe, dann heben sich beim Integrieren über die Treppenkurve gerade diese Dreiecke, die in das Integral eingehen, auf, und mein Integral stimmt mit dem Integral über f(x) exakt überein. Habe ich Pech, dann kann höchstens ein solches Dreieck als Fehler übrig bleiben, und bei der Schrittweite h wird der Fehler von der Größenordnung $\frac{1}{2}h^2$ sein. Man kann also hoffen, auch schon bei einer verhältnismäßig groben Unterteilung der Ordinatenachse gut hinzukommen. Wenn wir nur lo Teile im Intervall von o bis 1 für die Ordinate zulassen und uns bei der Integration auf Werte von f beschränken, die dieses Intervall nicht verlassen, dann können wir also mit einem Integrationsfehler von 1/2oo rechnen, und das ist nicht unbeachtlich.

§ 4. Der "Stufenintegrator"

Der Reibradintegrator ist, mechanisch betrachtet, ein stetiges Getriebe. Halte ich den Abstand des Reibrades von dem Mittelpunkt der Reibscheibe fest, so habe ich ein bestimmtes Übersetzungsverhältnis, das durch diesen Abstand gekennzeichnet ist. Aber wir können diesen Abstand verändern und damit dieses Übersetzungsverhältnis stetig variieren. Dieses stetige Variieren wollten wir nun aufgeben. Unser Plan zu Weihnachten 1948 bestand einfach darin, hier ein Stufengetriebe mit einer beschränkten Anzahl von Über-

setzungsstufen vorzusehen. In dieses Stufengetriebe leite ich die Integrationsvariable x beispielsweise als Drehbewegung ein. Ich bekomme eine Bewegung z heraus. Und dann lasse ich die Stufen springen. Zu diesem Zweck hielten wir es für nötig, die einzelnen Stufen des Stufengetriebes durch magnetische Kupplungen einstellbar zu machen. Diese Kupplungen selber sollten durch einen Lochstreifen gesteuert werden

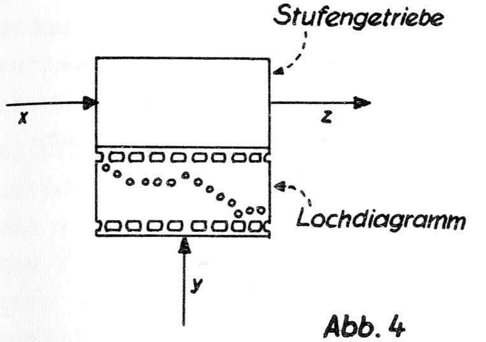


Abb. 4

(in Abb. 4 durch Lochdiagramm angedeutet). Wir führten eine Variable y zum Lochstreifentransport in den Integrator ein, genau wie man beim Reibradintegrator eine Variable einführt, nach der sich der Abstand des Reibrades vom Reibscheibenmittelpunkt richtet. Diese Variable y, die beispielsweise als Drehbewegung anfließt, sollte bei lo Umdrehungen den Lochstreifen z. B. um lo mm verschieben. Auf diese Weise hätten wir jetzt ein Integral $z = \int y\,dx$, worin y den Eingang zum Lochstreifen darstellt. Nachdem das einmal überlegt war, sagten wir uns, daß auf dem Lochstreifen irgend etwas stehen kann. Wenn wir also hier eine Variable y einführen, so hindert uns nichts, die Löcher auf dem Lochstreifen so anzuordnen, daß sie in Wahrheit nicht eine Stufenfunktion einstellen, die bis auf Unstetigkeiten der Treppe im wesentlichen eine lineare Funktion von y ist, sondern daß die Stufe selber, die schließlich die Integration bestimmt, unmittelbar eine Funktion von y ist. Damit lassen sich nun sozusagen zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen: Wir haben einen Integrator, wir nannten ihn "Stufenintegrator", und in diesem Integrator auch zugleich einen Funktionstrieb. Er ist beides in einem. Und statt wie bisher eine Funktion auf besondere Weise darzustellen, etwa durch Abtastung einer gezeichneten Funktionskurve mit Hilfe einer Photozelle, deponieren wir nunmehr die Funktion auf dem Lochstreifen und integrieren unmittelbar eine Funktion f(y). Es ist klar, daß diese simple Maßnahme die Flexibilität einer solchen Integrieranlage wesentlich erhöht, im übrigen auch ihren Preis erniedrigt.

§ 5. Darstellung von Funktionen mehrerer Variablen

Wenn man der Theorie der Schaltungen von Integrieranlagen nachgeht, zeigt es sich, daß in der Darstellung der Funktionen mehrerer Variablen alle wesentlichen Schwierigkeiten liegen. In bekannter Weise hilft man sich damit, daß man kombiniert. Es genügt für praktische Zwecke, Summentriebe zu haben, mit deren Hilfe man zwei Größen x, y oder mehrere Größen summieren kann. Die Kombination solcher Summentriebe mit irgendwelchen Funktionstrieben bei den üblichen Integrieranlagen schafft dann einen so hinreichend großen Bereich von Funktionen mehrerer Veränderlichen, daß man auf diese Weise praktisch an alle Aufgaben, die sich bei der Behandlung von Differentialgleichungen ergeben, herankommt, sofern eben der technische Aufwand an sich erträglich ist. So beschlossen wir, außer dem Stufenintegrator nichts weiter vorzusehen als Summentriebketten üblicher Bauart, d.h. Kegelraddifferentiale.

§ 6. Elimination des Mechanischen

Wir legten dieses Projekt zunächst wieder eine Weile zu den Akten, denn wir hatten damals noch nicht die Zeit und vor allem auch nicht das Geld, um auf eigene Faust diese Entwicklung in die Hand zu nehmen. Vor 1 1/2 Jahren veränderte sich die Situation, und wir beschlossen, unserem Integromat noch einmal auf den Weg zu helfen.

Wichtig dabei war, nun möglichst billig zu werden. Wir hatten an sich schon für dieses rein mechanische Projekt mit den lochstreifengesteuerten Integratoren einen Preis von etwa 6o ooo,-- DM für 2o solcher Integratoren gerechnet. Aber inzwischen traten Preiserhöhungen auf verschiedenen Gebieten ein. Wir waren gezwungen, erneut zu kalkulieren. Und so unterzogen wir noch einmal das ganze Projekt einer eingehenden Prüfung.

Bei dieser Prüfung hatte mein Mitarbeiter Langhans bei der Firma Schoppe & Faeser den glücklichen Gedanken, das Mechanische soweit wie irgend möglich zu eliminieren und auch die Integrationsvariable x nach Möglichkeit elektrisch darzustellen, und zwar zu quantisieren. Bei dem alten Projekt hätte man einen solchen Integrator beispielsweise durch einen kleinen Motor antreiben können; alles Weitere hätte sich mechanisch vollzogen. Man hätte zwischen den einzelnen Integratoren dieser Bauart elektrische Fernübertragungssysteme vorgesehen, und die Sache wäre ihren Weg gegangen. Bisher hielten wir daran fest, x über der Zeit als Gerade aufzutragen. Jetzt aber wollten wir die Variable x als Summe einer Folge von Rechteckimpulsen darstellen (Abb. 5.).Eine solche Folge von Rechteckimpulsen läßt sich auf sehr einfache Weise erzeugen. Es genügt, daß man einen rotierenden Schalter nimmt, der von einem Motor angetrieben wird. Der Schalter hat die Form einer Scheibe, an der eine Bürste schleift, über die eine Folge von Rechteckimpulsen herausgelangt.

Dieser Gedanke, einmal gefaßt, legte es nahe, den Mechanismus der verschiedenen Stufen eines Integrators entsprechend auszubilden. Nach zahlreichen Versuchen, die der Betriebssicherheit des Integromat galten, landeten wir schließlich bei folgendem System: Wir setzten ein ganzes

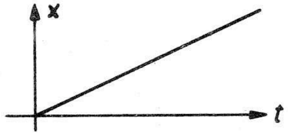
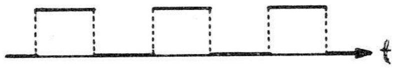


Abb.5



System rotierender Schalter auf eine Welle und sorgten dafür, daß durch passende Dimensionierung von Segmenten beispielsweise der erste Schalter einen Rechteckimpuls pro Schalterumdrehung aussendet, der zweite Schalter deren zwei, der dritte Schalter drei, usw. Man hat soviel Schaltscheiben auf der Welle, wie man Stufen bei einem Integrator vorzusehen wünscht.

Die ganze Integration besteht jetzt nur noch darin, je nach der Größe des Integranden den richtigen Kanal, d.h. die richtige Schleifbürste an einer der Schaltscheiben auf der Welle anzuzapfen. Bei einem Integranden also, der die in Abb. 6 angedeutete Form hat, würden wir, solange die erste Stufe gilt, den ersten Kanal einschalten, dann, sobald der Integrand zur zweiten übergeht, den zweiten Kanal, usw. Dieses Einschalten geschieht mit Hilfe eines Wahlschalters: Man führt einen Schaltarm an den Schleifbürsten der einzelnen

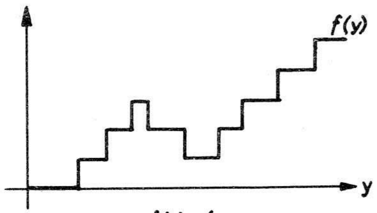


Abb. 6

Schaltscheiben vorbei und hält ihn solange auf der Schleifbürste der betreffenden Schaltscheibe, bis der Integrand sich ändert. Dabei ist dieses Element und die entsprechende Schaltung der Integrieranlage so dimensioniert, daß wir im allgemeinen mindestens zehnmal die Impulsfolge einer Schaltscheibe herausnehmen, ehe sich der Integrand ändert. Das ist eine Dimensionierungsfrage und eine Frage, wie man die Schaltung für die Differentialgleichung auslegt. So bekommt man eine unregelmäßige Impulsfolge heraus, deren Dichte, auf die Drehbewegung des Motors bezogen, den Integranden darstellt. Wenn wir jetzt diese Impulsfolge zusammenzählen, haben wir das Integral. Das ist eine außerordentlich einfache Methode der Integration.

§ 7. Das Schrittschaltwerk

Wie kann man die Impulse zählen? Man könnte elektronisch zählen. Aber weil unsere Maschine eine Vereinigung elektrischer und mechanischer Bauteile darstellt, zählen wir mechano-elektrisch durch ein Schrittschaltwerk.

Wir sehen einen Elektromagneten vor, der immer, wenn ein solcher Impuls aus der Integralimpulsfolge ankommt, einen Anker anzieht; dieser Anker selbst greift in die Zähne eines Schaltrades ein. Das Schaltrad wird über eine Rutschkupplung durch einen Gleichstrommotor angetrieben. Ist der Anker nicht angezogen, so ist das Schaltrad blokkiert; der Motor läuft mit der Rutschkupplung an dem Rad vorbei. Ist aber der Anker angezogen, so transportiert der Motor über die Rutschkupplung das Rad mit jedem Impuls um einen Zahn. Der Weg des Rades stellt daher das Integral dar.

Auf diese Weise können wir das Integral mechanisch darstellen. Das ist wichtig, um Integrale zu registrieren. Zum Registrieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wir haben beschlossen, ohne uns darauf festzulegen, die bekannteste zu wählen, nämlich die Lösungskurven aufzuzeichnen. Der Funktionstrieb ist ein handelsübliches Registrierwerk, wie es heute in der deutschen Industrie herausgebracht wird. Unser Registriertisch wird mit Hilfe der Schrittschaltwerke angetrieben.

Mit Hilfe der Impulsfolgen und der Schrittschaltwerke, die die Impulsfolgen in Wege zurückübertragen, lösen wir zugleich eine andere wichtige Aufgabe, die bei allen Integrieranlagen eine Rolle spielt, nämlich die Fernübertragung von Resultaten von einem Element der Integrieranlage zu einem anderen. Zur Fernübertragung benutzen wir grundsätzlich Impulsfolgen, wie wir sie ja in unserer Anlage haben, und wo wir mechanisch etwas anfangen müssen, transformieren wir eine solche Impulsfolge in einen Weg.

Diese Transformation in einen Weg ist auch sonst notwendig, denn der Integrand y kommt von außen in den Integrator und transportiert einen Lochstreifen. Das machen wir so: Der Integrand y kommt als Impulsfolge an, wird durch ein Schrittschaltwerk mechanisch verwandelt, transportiert dann eine Trommel, über die ein Lochstreifen läuft, und dieser Lochstreifen selber steuert jetzt ein Schrittschaltwerk, das die Wahlschalter betätigt, denn hier erst kommt zum Ausdruck, wie groß der Integrand sein soll: Während y den Lochstreifenweg darstellt, stellt die Stellung des Wahlschalters eine Funktion f(y) dar, eine Funktion, wie sie auf dem Lochstreifen deponiert ist.

Wenn wir addieren wollen, gehen wir in ähnlicher Weise vor: Über Schrittschaltwerke werden die zu addierenden Größen

(d.h. Impulsfolgen) in mechanische Drehbewegungen verwandelt. Diese werden in einem Kegelraddifferential addiert, und dessen Ausgang betreibt einen Impulssender, der die Summe der eingegebenen Impulse erzeugt. Diese gehen dann in weitere Elemente der Integrieranlage.

§. 8. Darstellung einer Funktion als Lochkombination

Wir haben zur Darstellung einer Funktion als Lochkombination verschiedene Wege eingeschlagen. Der einfachste, zu dem wir inzwischen gelangt sind, besteht darin, nicht den jeweiligen Funktionswert von f in Form einer Lochkombination zu deponieren, sondern nur die Änderungen von f. Wir benötigen dazu nicht mehr als ganze zwei Lochspalten!
Wenn in der ersten Lochspalte irgendein Loch kommt, so bedeutet das: f soll um die Schrittweite h springen, weiter nichts. Kommt in der zweiten Spalte ein Loch, so bedeutet das: Die Sprungrichtung soll der letzten Sprungrichtung entgegengesetzt sein. Es werden also nur die Änderungen im Betrag des Integranden und die Richtung jeder Änderung angezeigt.

Da wir bei unseren Entwicklungsarbeiten eine komplette Lochstreifenabtastung schon so entwickelt hatten, daß wir 6 Lochspalten abtasten konnten, haben wir aus der Not eine Tugend gemacht und beschlossen, auf einem Lochstreifen gleich zwei Funktionen abzutasten, da wir beide unabhängig voneinander benutzen können. Der Nachteil ist nur, daß sich beide Funktionen auf die gleiche Variable y beziehen. Aber es ist jedenfalls kein Nachteil, wenn man soviel Platz auf dem Streifen hat. Wir können jetzt auf einem Streifen eine Funktion f(y) und eine Funktion g(y) gleichzeitig darstellen.

§ 9. Angleichung an passende Bereiche

Jeder, der mit großen Integrieranlagen zu tun hat, weiß, daß ein großer Teil des Aufwandes solcher Anlagen in den zahllosen Stufengetrieben steckt, um die Maschine auf passende Bereiche angleichen zu können. Wir können unseren Integrator als Stufengetriebe ohne weiteres benutzen. Das tun wir, indem wir außer den Wahlschaltern noch feste Anzapfungen vorsehen, z.B. an dem Muttersender (so nennen wir das geschilderte System rotierender Schalter) soviel feste Anzapfungen wie er Kanäle hat, so daß wir, wenn wir z.B. ein Resultat y über x registrieren wollen, in Wahrheit über const. x registrieren, indem wir an eine passende Anzapfung des Muttersenders herangehen.

Mit unserem Integranden dürfen wir einen gewissen Bereich, innerhalb dessen sich unsere diskreten Werte für den Integranden befinden, nicht überschreiten. Hier haben wir die Möglichkeit in der Hand, unsere Lochstreifen beliebig in die Länge zu ziehen, genauer gesagt, die Markierungen auf dem Lochstreifen dichter oder dünner zu verteilen. Das kommt dem Einsetzen eines Stufengetriebes mit konstantem Übersetzungsverhältnis gleich.

§ 1o. Zusammenfassung von Integratoren auf einen Muttersender

Der Zirkeltest dient zur Darstellung von Lösungen der harmonischen Differentialgleichung $y'' + y = o$. Man schaltet die Integrieranlage entsprechend dieser Gleichung, erhält partikuläre Integrale $y_1 = A \sin x$; $y_2 = A \cos x$, trägt auf einem Zeichentisch y_1 über y_2 auf und stellt fest, ob die Integrieranlage wirklich einen sauberen Kreis

liefert. Das ist einer der bekanntesten Teste für Integrieranlagen. Die Schaltung selber würde man unter Benutzung der bekannten Symbole von Bush und der englischen Schule für konservative Integrieranlagen etwa so auslegen, wie Abb. 7 zeigt. Beide Reibscheiben werden

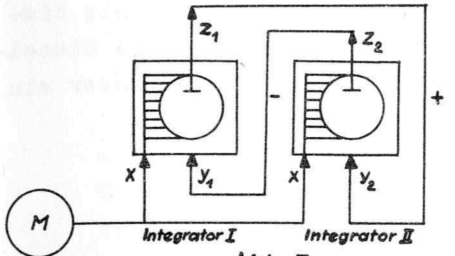


Abb. 7

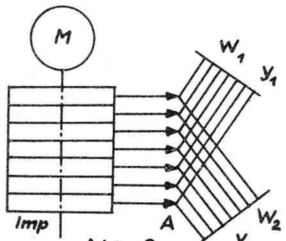


Abb. 8

als unabhängige Variable von einem Motor M aus angetrieben. Die Analyse dieser Schaltung soll nicht im einzelnen ausgeführt werden. Es sei nur bemerkt, daß ich auf diese Weise einen mechanischen Verband schaffe, der dieser Differentialgleichung genügt. Indem man die beiden Ausgänge z_1 und z_2 übereinander aufträgt, realisiert man den Zirkeltest. In dem dargestellten Falle haben wir zwei Reibscheiben nötig. Beide Reibscheiben werden aber von der gleichen unabhängigen Variablen angetrieben.

Beim Integromat treibe der Motor M die Schaltscheiben des Impulssenders Imp an (Abb. 8). A seien die Ausgänge der verschiedenen Kanäle für die einzelnen Impulsfolgen der verschiedenen Stufen. Zur Realisierung der Schaltung der gleichen Differentialgleichung wie vorhin brauche ich nicht zwei Impulssender, sondern einen einzigen, indem ich einmal die Kanäle über einen ersten Wahlschalter W_1 laufen lasse, das entspricht dem Integrator I der Abb.7. Dieser erste Wahlschalter bestimmt den Integranden y_1. Ein anderes Mal lasse ich die Kanäle über einen zweiten Wahlschalter W_2 laufen, der den Integranden y_2 bestimmt entsprechend dem Integrator II der Abb. 7. Hinterher werden die Impulse summiert zum jeweiligen Integral. Und dann benutze ich das Integral, welches bei W_1 herauskommt, um W_2 zu steuern, und das Integral, welches bei W_2 herauskommt, um W_1 zu steuern. Mit anderen Worten: Im Bilde der Reibradintegratorschaltung gesprochen, ermöglicht das Prinzip dieser Integration jetzt, mehrere Reibräder auf ein und dieselbe Reibscheibe zu setzen und sie unabhängig voneinander ein Integral von der Scheibe abnehmen zu lassen.

§ 11. Das Projekt

Wir werden einen Muttersender vorsehen, an den wir bis zu lo Wahlschalter anhängen können. Es gibt ja viele Differentialgleichungen, denken Sie an lineare Differentialgleichungen der Regeltechnik zum Beispiel, wo Sie viele Integrationen über der gleichen Variablen auszuführen haben. Hier genügt zur Darstellung der Integrationsvariablen ein einziger Muttersender und eine entsprechende Anzahl von Wahlschaltern, um die einzelnen Integrale herzustellen. Die Wahlschalter stellen eine Impulsfolge her, entsprechend einem Integranden, der seinerseits eine Funktion einer vorgegebenen, in der Schaltung entstehenden Größe darstellt. Diese Funktion wird durch Lochstreifen repräsentiert. Die Addition erfolgt auf die bisherige Weise mit Hilfe von Kegelraddifferentialen.

Es ist natürlich eine Frage, wieviel Stufen man für den Integromat vorsehen soll. Wir hatten früher geglaubt, es müßte eine hohe Anzahl von Stufen nötig sein (etwa loo), um mit ausreichender Genauigkeit zu integrieren. Vorläufige Ergebnisse mit lo Stufen sind aber so befriedigend, daß wir vorhaben, es bei 3o Stufen bewenden zu lassen.

Z w e i t e s   K a p i t e l

AUFBAUPRINZIP, ARBEITSWEISE UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT ELEKTRONISCHER PROGRAMMGESTEUERTER RECHENAUTOMATEN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE NATURWISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE FORSCHUNG

Dr. F. J. Weyl
Head, Mathematics Branch
Office of Naval Research
Department of the Navy
Washington 25, D.C.

§ 1. Überblick

Das gegenständliche Material, auf dem sich meine Bemerkungen gründen, besteht aus rund 15 Hochgeschwindigkeits-Elektronen-Rechenmaschinen, die momentan in Amerika laufen. In meiner Einteilung fasse ich die Geräte zusammen, die ähnliche Speicher haben.

G r u p p e I
Die Speicher sind einfach eingestellte Relais, Zählerringe oder ähnliches:

E N I A C	gebaut 1945, die erste in Betrieb gesetzte elektronische Maschine.
S S E C	gebaut durch I B M, New York.

G r u p p e II
Die Speicher bestehen aus mit Quecksilber gefüllten Röhren, in denen akustische Signale zirkulieren:

E D V A C	die älteste dieser Gruppe, Schwester der ENIAC.
S E A C	(Standards Eastern Automatic Computer) wurde durch N B S (National Bureau of Standards) gebaut.
O N R - N B S	wurde durch Raython Manufacturing Co, Boston, unter Vertrag mit NBS für das Office of Naval Research gebaut.
U N I V A C	
B I N A C	kleine Schwester der UNIVAC.

G r u p p e III
Die Speicherung erfolgt elektrostatisch, so daß man an die einzelnen Zahlen in 12 Millisekunden herankann; Gruppe der wirklich großen und schnellen Maschinen:

I A S	älteste der Gruppe, von John von Neumann entworfen.
O R D V A C	von der University of Illinois für die Army nach den Plänen der IAS-Maschine gebaut.
S W A C	(Standards Western Automatic Computer) in Los Angeles aufgestellt; ursprünglich "Zephir" genannt.
W W I	(Whirlwind I) durch das Massachusetts Institute of Technology unter Vertrag mit dem Office of Naval Research gebaut.

G r u p p e IV

Speicherung erfolgt im wesentlichen durch Magnettrommeln und mit der für diese charakteristischen Geschwindigkeit:

C A L D I C	(California Digital Computor) an der University of California aufgestellt.
E R A	(Engineering Research Associates, Inc., Minneapolis.)
M k III	Mark III, aus Aikens Laboratorium.
M k IV	Mark IV, aus Aikens Laboratorium.

Offensichtlich steckt in jeder einzelnen dieser großen Apparaturen, und die bescheidenste von ihnen, die CALDIC, kostet allein kaum weniger als loo ooo Dollar (die großen in dieser Gruppe sind kaum unter 5oo ooo Dollar zu duplizieren), sehr viel detailliertes Nachdenken. Eine Darlegung der Arbeitsweise dieser Maschinen würde in diesem Rahmen zu weit führen. (Vgl. z.B. Mitteilungen aus d. Inst. f. angew. Math. a. d. ETH Zürich: Rutishauser-Speiser-Stiefel, Programmgesteuerte digitale Rechengeräte (elektronische Rechenmaschinen)). Wichtig ist, daß alles mit solchen Geschwindigkeiten vor sich geht, daß jeder Eingriff in die Rechnung vermieden werden muß, weil sonst die Sache sehr

lange, ausgedrückt in Maschinenzeit, aufgehalten würde. Das heißt also: Das gesamte Problem muß fertiggestellt werden, man muß der Maschine genau erzählen, was zu tun ist, wobei für jede Eventualität vorgesorgt werden muß; dann drückt man auf einen Knopf, und man darf nichts mehr tun.

Im allgemeinen rechnen diese Maschinen mit 3o bis 4o binären Stellen, d.h. lo Dezimalstellen. Diese Gruppen von etwa 3o Stellen können entweder Zahlen oder Befehle sein. Es muß also dafür gesorgt werden, daß innerhalb einer solchen Gruppe durch Impuls oder Nicht-Impuls die Durchführung einer Elementaroperation verschlüsselt werden kann. Wir sprechen in diesem Zusammenhang immer von Wortlängen, um den Unterschied zwischen Zahl und Befehl zu verwischen. Eine wesentliche Ausnahme unter den erwähnten Maschinen ist die WW I. Sie hat nur 16 binäre Stellen; warum, werde ich später ausführen.

Die Zeiten, um die es sich handelt, sehen in den Rechenautomaten mit Ultraschallwellenspeicher so aus: Für eine Addition benötigen sie etwa 1 Millisekunde, für eine Multiplikation 3 bis 4 Millisekunden. Die Zeit, um die Zahlen aus dem Speicher zu ziehen und das Resultat an eine bestimmte Adresse in den Speicher zurückzuschicken, ist hierbei miteingerechnet. Die Magnettrommel-Maschinen sind etwas langsamer in dieser Hinsicht. Zeiten von lo bis 3o Millisekunden pro Operation sind notwendig. Das bedeutet, daß hier das Nachsehen im Speicher und das Zurückschicken in den Speicher die Hauptzeit in Anspruch nehmen. Eine Magnettrommel dreht sich ziemlich schnell, aber sie dreht sich doch nicht so, daß die Zeit für eine Umdrehung vergleichbar wäre mit der Zeit, um eine Rechnung auszuführen; z.B. geht das Multiplizieren von zwei zehnstelligen Zahlen mit elektronischen

Schaltungen viel schneller. Schließlich bleibt noch die Gruppe mit den elektronischen Speichern. Hier ist das Nachschlagen im Speicher auf ein absolutes Minimum reduziert. Die Zeiten sehen da etwa so aus, daß 1/2 Millisekunde pro Multiplikation und 1/1o Millisekunde pro Addition verwendet wird. Solche Maschinen könnten also im Prinzip rund $1o^8$ Elementaroperationen pro Acht-Stunden-Tag bewältigen.

Jede der aufgeführten Maschinen hat ihren bestimmten Aufgabenkreis. Man kann wohl allgemein sagen, daß der berühmte "General Purpose Computor" nicht existiert. Es ist ganz wesentlich, wenn eine Maschine gebaut wird, daß man sich klar ist über den Aufgabenkreis, für den sie bestimmt ist.

In Amerika ist ein großer Teil der Maschinen gebaut worden für ballistische Berechnungen. Während in Deutschland an der Entwicklung der Rechenmaschinen anscheinend industrielle Firmen und Zwecke wesentlich mitbestimmend gewesen sind, haben sich die amerikanischen Projekte hauptsächlich an den Universitäten und technischen Hochschulen unter Regierungsverträgen entwickelt. Letztere kamen meist von militärischer Seite. Zu den für ballistische Berechnungen gebauten Maschinen gehören die ENIAC, die EDVAC, die ORDVAC und schließlich die beiden Aikenschen Maschinen Mk III und Mk IV.

Eine zweite Gruppe ist gebaut worden, um zu lernen, Rechenmaschinen zu bauen. Sie sind gewissermaßen Selbstzweck und dienen der Weiterentwicklung der Rechenmaschinen. Sie werden dazu gebraucht, neue Ideen, neue Schaltungen, neue Komponenten, neue Arten der Speicherung, neue Arten der Eingabe und der Abführung von Resultaten auszuprobieren. In diese Klasse gehören WW I, SEAC und ursprünglich auch die ONR-NBS-Maschine. Die beiden letztgenannten dienen

außerdem einfach als Rechengeräte in einer großen Abteilung des NBS, deren Aufgabe es ist, der gesamten Regierung, nicht nur den Militärs, Rechendienste zu leisten. Ausschließlich dem Zweck, Rechendienste zu leisten, dienen die SWAC, die IAS und - sobald sie ihre endgültige Form haben - die SEAC und die ONR-NBS-Maschine.

Unter den zu Beginn aufgezählten Rechenautomaten sind nur zwei, die ausschließlich für rein wissenschaftliche Zwecke eingesetzt werden sollen. Davon ist allerdings einer das ehrgeizigste Projekt, das unternommen worden ist, nämlich der IAS, oft auch die MANIAC genannt, von John von Neumann; - der erste, in dem die ganz hohen Geschwindigkeiten: 1 ooo ooo Hz, elektro-statische Speicherung usw. realisiert worden sind. Und der andere ist die bescheidenste Maschine unter den genannten, die CALDIC, ein Rechner mit Magnettrommel, der der University of California als Recheninstrument dienen soll.

Schließlich haben wir die BINAC und UNIVAC. Die BINAC war ein Versuch, um zu sehen, wie es mit der UNIVAC gehen würde. Die UNIVAC ist das eigentliche Endprodukt. In ihrem Entwurf haben die Probleme des National Bureau of Census eine wesentliche Rolle gespielt, und dort hat nun die erste ihrer Art das statistische Zahlenmaterial, das während der Volkszählung 195o in den USA angesammelt worden ist, in Angriff genommen. Drei weitere Exemplare für ähnliche Aufgabenkreise sind im Bau. Sie unterscheidet sich von den anderen Maschinen darin, daß für ganz besonders schnelle Eingabe und Ausfuhr von Zahlenmaterial gesorgt werden mußte. Bei Problemen dieser Art ist es so, daß das, was gerechnet werden muß pro Zahl, die eingeht, ziemlich wenig ist; aber es geht eine große Menge von Zahlen ein. Jede einzelne muß schnell verarbeitet und wieder ausgestoßen werden. Der Aufgabenkreis der WW I sei später erwähnt; er ist eine Besonderheit.

§ 2. Gesichtspunkte der Weiterentwicklung von Rechenmaschinen

Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß die gesamten grossen Maschinenprojekte in den USA von vor 1948 datieren. Kein Rechenmaschinenprojekt großen Stils ist während der letzten vier Jahre neu angefangen worden.

Die in § 1 aufgezählten Maschinen wurden von uns 1947-1948 in drei Klassen gesehen:

1.) Die totsicher arbeitenden Maschinen, besonders die Aikenschen.
2.) Die Maschinen, die sich aus dem damaligen Stand der elektronischen Ingenieurwissenschaft ergaben.
3.) Die Zukunftsmaschinen, die voraussichtlich dem Niveau der nächsten 1o oder 15 Jahre entsprächen.

Wir nahmen damals an, daß innerhalb der nächsten 12 bis 18 Monate solche Maschinen wie ONR-NBS, SEAC, EDVAC, deren Bau als Maschinen der zweiten Klasse angefangen wurden, und BINAC fertig und in Betrieb sein würden und daß in den nächsten 3 bis 5 Jahren dann Maschinen der dritten Klasse, wie die IAS oder der WW I, in Gang kämen. Heute ist es vier Jahre später, und, um ehrlich zu sein, es läßt sich kaum ein Unterschied zwischen diesen beiden Klassen feststellen. Sie haben alle ungefähr um die gleiche Zeit äquivalente Entwicklungsstadien erreicht und haben alle die gleichen Schwierigkeiten. Das bedeutet, daß wir uns etwas versehen haben. Der Unterschied zwischen der Tagesmaschine und der Zukunftsmaschine hat sich als recht unrealistisch herausgestellt in dem Sinne, daß auch die dem

damaligen Stand scheinbar erreichbaren Maschinen in Wirklichkeit Zukunftsmaschinen waren.

Wie ist es heute? Sind sie auch heute noch Zukunftsmaschinen? In einem Sinne bestimmt nicht: Wenn man zu diesen Instituten geht, in denen die Maschinen stehen, da findet man Zimmer verschiedener Größen voll von zusammengelötetem Material; man kann sich kaum mehr darin bewegen. Manchmal funktionieren sie auch, aber nur manchmal. Und das ist wesentlich. Vor vier Monaten war in Philadelphia eine Konferenz, die erste, deren Zweck es war, Erfahrungen darüber auszutauschen, wie die elektronischen Maschinen arbeiten. Es stellte sich heraus, daß die Meister aller arbeitenden Maschinen ungefähr in dem gleichen Boot saßen. Das beste, was von den in Betrieb genommenen Maschinen gesagt werden konnte, war, daß sie während einem Drittel der operativen Zeit richtige Resultate liefern. Die alte ENIAC schafft etwas mehr, etwa 5o Prozent. Besonders krank sind dagegen die SWAC und die EDVAC. Die EDVAC, die schon vor drei Jahren hätte arbeiten sollen, kann es immer noch nicht.

Das bedeutet also, daß das wesentliche Problem bei den großen elektronischen Maschinen das Problem der Betriebssicherheit ist und daß also vorläufig immer noch den Problemen des Maschinenbaues größere Aufmerksamkeit geschenkt wird als denen des Maschinengebrauches.

Im wesentlichen gibt es zwei Möglichkeiten, um die Betriebssicherheit zu steigern: Entweder, man versucht es zu vermeiden, daß die Maschine Fehler macht, oder man versucht, dafür zu sorgen, daß Fehlerquellen, wenn sie entstehen, schnell eliminiert werden können.

Die meisten Fehler lassen sich auf zwei Ursachen zurückführen: a) Ausbrennen von Röhren, b) Fehler im Speicher (sowohl die Magnettrommel als auch der elektrostatische Speicher sind noch recht subtil in dieser Hinsicht).

Die Engländer haben mit ihren elektrostatischen Speichern wesentlich bessere Erfahrungen als wir mit unseren, während sie mit ihren Magnettrommeln nicht so gut gefahren sind. Unsere elektrostatischen Speicher arbeiten in paralleler Reihe, d.h. wir nehmen unsere Zahl gleichzeitig von einer der Wortlänge entsprechenden Zahl homologer Speicherröhren ab. Um ein Wort abzulesen, muß ich in allen Röhren feststellen, ob eine Null oder eine Eins an der entsprechenden Stelle steht. Bei den Engländern ist eine einzelne Zahl serienweise auf einer Röhre aufgetragen. Außerdem arbeiten die Engländer nur mit loo kHz. Wir arbeiten mit 1 MHz. Wir wissen, wenn wir auf 1 kHz heruntergingen, würden wir nicht so schlechte Erfahrungen haben. Aber dieser Ausweg befriedigt uns nicht. Wir betrachten es weiterhin als ein zentrales Problem, diese Hochgeschwindigkeits-Speichermöglichkeit hinsichtlich der Betriebssicherheit zu verbessern.

Die zweite Möglichkeit basiert auf sofortiger Lokalisierung der Fehlerquellen und ihrer schnellsten Beseitigung. Das bedeutet, daß der Bau der Maschine in Einheiten organisiert werden muß, daß man also den Fehler nicht in einer einzelnen Röhre oder einem einzelnen Kontakt feststellt, sondern in einer ganzen Gruppe von Elementen. Man kann dann sagen: In dieser Einheit steckt ein Fehler; man nimmt sie heraus, schiebt eine andere ein und läßt die defekte Einheit im Labor reparieren.

Ähnlich motiviert ist ein Vorgehen, welches darin besteht, daß man die Maschine bewußt Bedingungen aussetzt, wo sie

Fehler machen kann, so daß man feststellt, wo die schwachen Elemente sind, sie untersucht, ersetzt und dann hofft, daß es nicht wieder passiert. Die Schwierigkeit ist hier die, daß man durch das gleichzeitige Ersetzen zu vieler Elemente die Maschine der Gefahr einer zu grossen Anfälligkeit für "Kinderkrankheiten" aussetzt: Elektronenröhren z.B. brennen gerne in den ersten Betriebsstunden aus.

Eine weitere Idee, die gewissermaßen beide Möglichkeiten kombiniert, haben wir wahrscheinlich der Natur abgelauscht: die "Redundancy", die Überfülle. Gewöhnlich arbeitet man so, daß man sich darauf verlassen muß, daß eine Reihe von

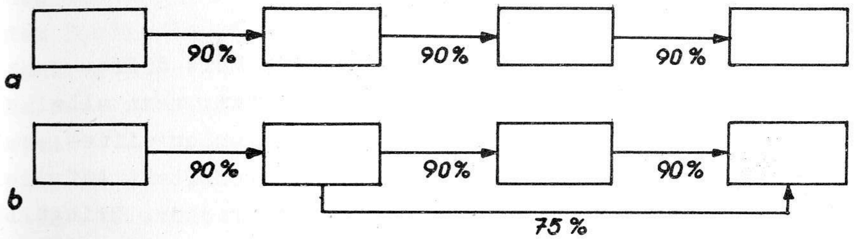


Abb. 9

Komponenten, die serienweise zusammengeschaltet sind, alle das Richtige tun. Wenn in der Abb. 9a alle drei Verbindungen in einer Organisation mit 9o Prozent Sicherheit Anweisungen übermitteln, dann arbeitet die gesamte Kette nur mit 73 Prozent Sicherheit. Nehmen wir nun aber an, daß außerdem noch eine, diese Kette teilweise duplizierende Übermittlungsweise existiert (z.B. die Sekretärinnen des Direktors und des Abteilungschefs sind gute Freundinnen), welche mit, sagen wir 75 Prozent Sicherheit funktioniert (Abb. 9b). Die Betriebssicherheit wird so auf 88 Prozent erhöht! Die Einführung duplikater Komponenten in Parallelschaltung kann also Erhebliches an Sicherheit einbringen, ohne viel an Aufwand zu kosten.

Ein netter Demonstrationsapparat, den sich ein paar Leute in der University of Illinois gebaut haben, ist der in Abb. lo schematisch abgebildete. Das Schaltschema arbeitet

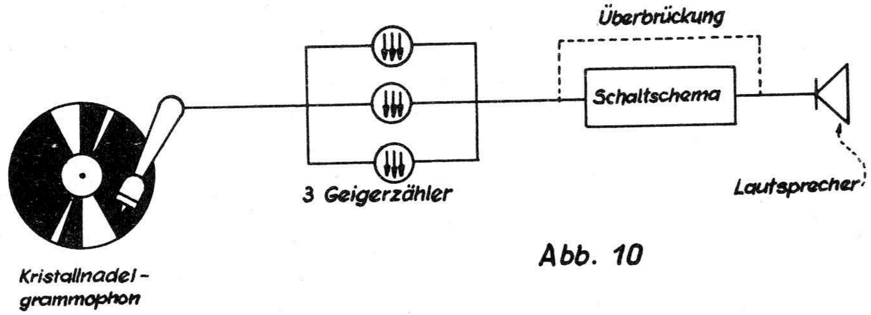


Abb. 10

etwa so: Wenn zwei Signale um weniger als 5 Volt differieren, dann wird der Mittelwert durchgeleitet; wenn alle Paare von Signalen um mehr als 5 Volt voneinander differieren, dann wird das mittlere Signal durchgeleitet. Auf diese Weise kommen die Signale in den Lautsprecher. Bringt man nun bei eingeschalteter Überbrückung ein radioaktives Präparat in die Nähe der Zählerrohre, während eine Platte gespielt wird, so hört man anstelle der Musik ein wildes Geknatter. Wenn die Überbrückung des Auswahlschaltschemas jedoch ausgeschaltet ist, so kommt die Musik fast ungestört durch.

Das zweite für die Weiterentwicklung wichtige Problem ist das Auffinden neuer Speicherungsmethoden, das ich übergehen möchte.

Das dritte Problem, mit dem wir uns ziemlich herumschlagen, ist das Problem der Einführung und Abführung von Resultaten. Der Grund ist der, daß wir uns die Rechenmaschinen nicht nur als wissenschaftliche Forschungsgeräte denken, sondern

ganz allgemein als Informationen verarbeitende Automaten.

§ 3. Einsatzmöglichkeiten

Zunächst möchte ich bei der konventionellen Denkart verweilen. Hier erscheinen die Rechenmaschinen in der Rolle eines zentralen Elementes in einem Rechendienst. Die Organisation, die dann zum Betrieb nötig ist, besteht etwa aus einem Oberingenieur mit zwei Mechanikern oder Elektrotechnikern und einem Mathematiker mit einem mathematisch trainierten Assistenten, z.B. einem Rechenmädchen, im Minimum also aus 5 Personen. 8 Personen wären besser: Noch ein Elektrotechniker und zwei Mathematiker dazu. Wenn man den Durchschnitt betrachtet, so kostet das uns etwa pro Zentrum 3 ooo Dollar im Monat; das ist einfach das Unterhalten der Maschine. Das setzt voraus, daß der Problemsteller mit dem fertig programmierten Streifen ankommt, sich an den Zentrumsmathematiker wendet und mit ihm kurz die kritischen Stellen der Rechnung bespricht. Dann wird der Programmstreifen an die Maschine weitergegeben. Was kostet unter diesen Umständen das Rechnen? Man zahlt natürlich nur die Zeit, während der die Maschine effektiv an dem gestellten Problem arbeitet, und nicht auch die Zeit, während der sie wegen Fehloperation in Reparatur ist. Die Zahlen sind verschieden. Als Beispiele mögen dienen: Die SSEC kostet 3oo Dollar pro Stunde, die Mk II, die ungefähr 5o mal langsamer ist als die Mk III, kostet 3o Dollar pro Stunde.

Die Art der Probleme, die man lösen will, ist bekannt. In der ursprünglich vorgesehenen Leistungsfähigkeit der Gruppe III sind z.B. gewisse Probleme in der Theorie der partiellen Differentialgleichungen ausschlaggebend gewesen.

Zwei von diesen Problemen, die die Bauart der IAS-Maschine wesentlich beeinflußt haben, sind: 1.) das Problem isotroper Turbulenz im freien Strömungsfeld (wobei die Endresultate nicht das tabulierte Strömungsfeld, sondern nur gewisse Korrelationskoeffizienten sind), 2.) das Problem der irregulären Stoßwellenreflexion. Normalerweise sieht eine solche Reflexion wie bei der akustischen Welle aus: Ein- und ausfallende Welle schneiden sich in der Reflexionsebene. Wenn aber der Einfallswinkel immer kleiner wird, dann geschieht etwas Neues; - die einfallende Stoßwelle löst sich von der Reflexionswand ab, die reflektierte Welle trifft die einfallende in einer Schnittgeraden in einiger Entfernung von der Wand, und eine dritte, etwas stärkere Stoßwelle, die gekrümmt ist, verbindet diese Schnittgerade mit der Wand, auf welche sie senkrecht auftrifft. Dieses Problem möchte man gern errechnen. Denn bisher war nie Einklang zwischen der Theorie und den Versuchen zu bekommen. Die Theorie gab immer Resultate, die außerhalb der Fehlergrenzen der bei den sorgfältig angelegten Versuchen gemachten Messungen liegen. Man möchte gerne wissen, um welche Art von Singularität in den gasdynamischen Strömungen es sich hier handelt.

Eine weitere wesentliche Aufgabe dieser Zentren ist es, mit der Maschine zu experimentieren und Methoden zu ersinnen, wie man mit der Maschine arbeiten kann. Ein paar Beispiele mögen dies illustrieren.

Mit dem Einsatz dieser großen Maschinen wird die Entwicklung der zugehörigen Rechenmethoden etwas zur Experimentalwissenschaft. Nehmen wir das wohlbekannte Beispiel von vielen linearen Gleichungen mit vielen Unbekannten. Da sind jetzt so etwa 12 bis 15 verschiedene Lösungsmethoden vorhanden, die alle recht wohl überlegt und elegant aussehen,

gute Fehlerabschätzungen ermöglichen, usw. Für jede dieser Methoden kann eine ganze Reihe von Beispielen gefunden werden, wo sie sicher die beste ist. Es ist aber eine Sache der Erfahrung, es einem Gleichungssystem direkt ansehen zu können, welche Methode die praktischste dafür ist.

Außerdem lohnt es sich bei Maschinen mit dieser Geschwindigkeit, recht neuartige Methoden zu verwenden. Das einschlagendste Beispiel ist wohl die "Monte-Carlo-Methode". "Monte Carlo" nennen wir sie, weil wir sozusagen Roulette spielen, um eine Gleichung zu lösen. Haben wir z.B. eine Differentialgleichung durch ein Schema von endlichen Differenzengleichungen ersetzt, dann stellt es sich heraus, daß man sehr einfach ein statistisches Irrfahrtsproblem finden kann, dessen Ausgang eine Wahrscheinlichkeitsverteilung hat, welche dieses Schema löst. Da besteht nun die Möglichkeit, daß man dieses Irrfahrtsproblem dadurch löst, daß man eine genügende Anzahl einzelner solcher Irrfahrten einfach durchrechnet. Das bedeutet, daß ein Teil der schnellen elektro-statischen Maschinen schon einen Zufallszahl-Generator eingebaut haben. Man muß natürlich dieses Würfelspiel auch mit elektronischer Geschwindigkeit ausführen, sonst lohnt es sich nicht. Das klassische Beispiel für diese Methode, das gerade auf der SWAC kürzlich bearbeitet worden ist, ist das Dirichletsche Problem. Das Gebiet, in dem das Problem gelöst werden soll, wird mit einem Quadratnetz überdeckt (Abb. 11), und die Irrfahrt fängt an im Punkte P, in dem ich die Lösung bestimmen will; die Randwerte sind vorgegeben. An jedem Eckpunkt wird die Entscheidung, in welcher der vier möglichen Richtungen die Fahrt weitergeht, gewissermaßen durch den Wurf eines vierseitigen Würfels, der jede seiner vier Seiten mit der gleichen Wahrscheinlichkeit präsentiert, entschieden. So verfolge ich das für eine Weile und komme schließlich einmal an den Rand, wo ich einen der vorgegebenen Randwerte vorfinde. Das wird als "Punktzahl" in diesem "Spiel" angeschrieben. Nach genügend häufiger Wiederholung dieses Spieles wird der Mittelwert aller angetroffenen Randwerte gebildet. Das ist eine gute Approximation für den Wert im Punkte P der harmonischen Funktion, welche die vorgegebenen Randwerte hat. Es ist leicht, entsprechende Methoden für allgemeine elliptische Differentialgleichungen aufzustellen. Der Vorteil ist der, daß man nicht viel nachdenken muß, und das liegt der Maschine besonders gut. Der Nachteil ist der, daß es besonders für zweidimensionale Probleme einfacher ist, das System der linaren Gleichungen zu lösen, die dem Differenzenschema entsprechen. Es ist jedoch klar, daß bei zunehmender Zahl der unabhängigen Variablen die Sache irgendwann einmal zum Vorteil dieser Monte-Carlo-Methode ausschlagen muß. Diese Stelle des Umschlages liegt wahrscheinlich schon bei drei unabhängigen Variablen.

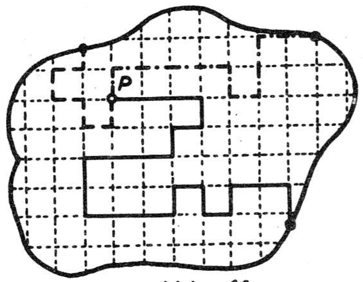


Abb. 11

Bei einfachen Integrationen glaube ich mich zu erinnern, daß der Umschlag bei der Dimension 4 kommt. Hier handelt es sich um die folgende Anwendung der Monte-Carlo-Methode: Die Aufgabe, $\int_V f(x_1, x_2, \ldots, x_n)\, dx$ über ein Volumen V im n-dimensionalen Raum zu integrieren, kann ich auch so interpretieren, daß mir ein (n + 1)-dimensionales Raumstück gegeben ist, dessen Volumen ich bestimmen muß. Ich packe das Ding in einen Quader, dessen Volumen ich kenne,

und dann suche ich mir eine Zufallsfolge von N Punkten in diesem Quader aus und zähle, wie viele innerhalb des zu bestimmenden Volumens liegen. Das Verhältnis ihrer Anzahl N_o zur Gesamtzahl N der gewählten Punkte multipliziert mit dem Volumen des Quaders ist eine Approximation des Volumens V, das ich suche:

$$V \approx \frac{N_o}{N} V_{Quader}.$$

Setzen wir $p = V/V_{Quader}$, so erhalten wir für die Quadratwurzel des mittleren Fehlerquadrates

$$\sqrt{p(1 - p)}\, N^{-1/2} V_{Quader}.$$

Im Gegensatz dazu verlangt der klassische Ansatz, daß der Quader, den wir n-dimensional annehmen wollen, in $N = k^n$ Unterquader zerlegt wird, und wir nun von diesen Unterquadern diejenigen N_o auszählen müssen, die dem Volumen angehören. Hier ist der Rand die Fehlerquelle, und wir schätzen ab

$$\Delta V \approx C \cdot p^{\frac{n-1}{n}} \cdot N^{-1/n} \cdot V_{Quader},$$

wo C eine Konstante ist, die im wesentlichen von der entsprechenden isoperimetrischen Zahl von unten begrenzt wird. Wir sehen also, daß sich für wachsendes n die Monte-Carlo-Methode mehr und mehr gegenüber der klassischen empfiehlt. Liegt N in der Größenordnung 10^3, so wird für nicht zu kleines p der Umschlag vielleicht schon bei n = 3 und im allgemeinen sicher bei n = 4 stattfinden.

Außer der Verwendung in Rechenzentren gibt es noch zwei Anwendungen der großen Rechenmaschinen, die jetzt in Schwung kommen:

Erstens: Die Rechenmaschine als Teilelement in einem Kontrollsystem. Häufig möchte man ausprobieren, wie ein Kontrollsystem arbeitet. Aber ein wesentlicher Teil des Kontrollsystems läßt sich einfach nicht im Laboratorium realisieren. Da kann man dann die Rechenmaschine anstelle dieses unrealisierbaren Gliedes einsetzen. Die Rechenmaschine kann ausrechnen,wie es sich verhalten würde,und entsprechende Signale an den Kontrollapparat weitergeben: Der Kontrollkreis wird geschlossen durch eine Rechenmaschine. Das englische Schlagwort dafür ist: Die Rechenmaschine als "Simulator".

Eingabe und Ausgabe sind in diesem Zusammenhang in neuartiger Weise beleuchtet: Eingabe sind Signale, die in Impulsfolgen übersetzt worden sind, an denen gerechnet wird. Impulssignale kommen aus der Rechenmaschine heraus, die dann wieder in Spannungen, Ströme oder Umdrehungen von Wellen zurückübersetzt werden und an das System selber zurückgehen. Dies ist eine Spezialität der WW I. Sie ist eine Rechenmaschine, an die man überall heran kann, in dem Sinne, daß überall die Maschine auseinandergerissen werden kann, um etwas hereinzustecken, so daß dann die Maschine gewissermaßen den Kontrollkreis schließt. Das erklärt die kleine Stellenzahl der WW I, denn sie muß fix sein, selbst wenn die Genauigkeit dabei etwas kompromittiert wird.

Zweitens: Vielleicht am aufregendsten ist der Gebrauch der Maschine als zentrales Element in einem Informationen verarbeitenden automatischen System.

Versuche sind im Gange bezüglich der Verwendung von elektronischen Maschinen zur Wetterberechnung. Man nimmt ein Gebiet in den USA, etwa die ganzen mittleren und Oststaaten und nimmt alle Wetterberichte, die hereinkommen für eine bestimmte Zeit. Harmonische Polynome werden diesen Beobachtungen angeglichen, um eine analytische Mannigfaltigkeit von Anfangsbedingungen zu schaffen. Um aber partielle

Differentialgleichungen der Fortpflanzungsart zu integrieren, braucht man nicht nur die Anfangsbedingungen auf einem beschränkten Gebiet, sondern auch die Randbedingungen als Funktionen der Zeit. Mit vernünftig vereinbarten Bestimmungen dieser Randbedingungen macht man deshalb die Prognose nur für ein kleines Teilgebiet innerhalb des erwähnten Areals und hofft, daß in der Prognosenzeit Störungen aus den Randgebieten noch nicht weit in das Innere vorgedrungen sind. Bisher sind nur zweidimensionale Modelle der Atmosphäre verwendet worden, die aber zu partiellen Differentialgleichungen 3. Ordnung führen. Von gegebenen Beobachtungen bestimmt die Integration die Wetterlage 24 Stunden später. Ein erster Vorschlag der Rechnung hätte schätzungsweise 24 Stunden auf einer mittelschnellen Maschine gedauert. Inzwischen hat man es mit besseren Maschinen und sorgfältiger aufgebauten Methoden versucht, so daß die Rechnung nur 7 Stunden gedauert hätte, wenn es der Maschine je gelungen wäre, eine Prognose fehlerfrei durchzurechnen. Was sich dabei meteorologisch herausgestellt hat, ist recht interessant. Wenn man von einer schwer gestörten meteorologischen Lage ausging, von der man annehmen mußte, daß innerhalb der nächsten 24 Stunden eine Beruhigung eintritt, dann war die errechnete Voraussage sehr gut, oft besser als die Voraussage des zuständigen Wetterdienstes. Wenn man aber von einer Lage ausging, von der man wußte, daß innerhalb der nächsten 24 Stunden eine ziemlich schwere Störung von Canada hereinbrechen würde, so ließ das beobachtete Wetter sich nur ungenügend vorausbestimmen. Anscheinend beschreiben die verwendeten zweidimensionalen Modelle nur die stabilisierenden Momente des Wetters und nicht diejenigen, welche für die Störungen verantwortlich sind. Man kann sich nun vorstellen, daß eine Wetterzentrale geschaffen wird, wo der Großrechner nichts anderes tut, als bestimmte Arten von meteorologischen Differentialgleichungen in regelmäßigen Abständen zu lösen. Viele von den Problemen, die wir jetzt mit unserem sogenannten "General Purpose Computor" haben, würden in einem solchen Rechner nicht vorkommen. Man braucht kaum einen Speicher. Vieles von der Programmsteuerung würde wegfallen, weil das Programm ein für alle Mal feststeht. Man muß nur die Daten bekommen, die Anfangsbedingungen ausrechnen und dann losintegrieren.

Eine zweite Möglichkeit, die ernsthaft erwogen wird, ist der Einsatz von arithmetischen Rechnern zur Steuerung automatischer industrieller Prozesse. Wir haben ja eine große Reihe von Prozessen, wo Messung und Kontrolle sowieso beinahe ganz automatisch durchgeführt werden. Selbst wenn es sich um relativ träge Prozesse handelt, so daß man sich Zeit lassen kann, um zu rechnen, so geschehen doch Eingriffe an vielen Stellen, so daß ein großes Material verarbeitet werden muß, um die voraussichtliche Entwicklung von Konzentrationen, Temperaturen, Diffusionen, usw. innerhalb gegebener Grenzen zu halten. Ein automatisches System, das die entsprechenden Daten sichtet, vergleicht und die richtigen Kontrolländerungen anordnet, wird also auch wieder in natürlicher Weise auf einen Schnellrechner konzentriert werden müssen.

Schließlich ein drittes Problem, an das jetzt einige unserer großen Flugzeugfabriken herangehen: Das Problem der Verkehrskontrolle auf vielbenutzten Flughäfen. Anfliegenden Flugzeugen kann ein Erkennungszeichen gegeben werden, unter dem von Radarantennen beobachtete Kursdaten, erwartete Zeit der Ankunft, usw., gespeichert werden. Unter demselben Erkennungszeichen sind die Bestimmungsstücke für die Landebahn vorhanden, die sich aus den vom Kontrollturm gegebenen Instruktionen ergeben. Dann ließe sich auf einem Kontrollschirm jederzeit z.B. der tatsächliche mit dem erwarteten Kurs eines gegebenen Flugzeuges vergleichen oder die Lage aller innerhalb 5 Minuten landenden Flugzeuge angeben oder die augenblickliche Verteilung aller Flugzeuge aufsuchen, die von einem gegebenen Flugzeug weniger als eine gewisse Entfernung haben, usw. So etwas wird sich auch sicher machen lassen. Wenn man sich das Problem rein rechnerisch anschaut, so sieht es nicht besonders schlimm aus. Die Schwierigkeit ist wieder die, und damit komme ich auf einen früheren Punkt zurück, daß die Maschine in kurzer Zeit viel Material annehmen, verarbeiten und in einen sekundären Speicher abgeben muß, um wieder neues Material verarbeiten zu können. Im Zusammenhang mit diesem dritten Problem spielt also das Problem der Eingabe und Ausgabe eine große Rolle.

§ 4. Ausbildung von Fachkräften

Eine unserer Hauptsorgen ist die Erziehung von Leuten, die mit solchen Maschinen umgehen können; - die Bedienung dieser neuartigen Kreaturen verlangt es, daß früher recht getrennte Gebiete kombiniert werden. Es ist uns recht schwer gefallen, gute Leute dazu zu begeistern. Harvard hat auf unsere Veranlassung einen Lehrgang für dieses Gebiet eingerichtet, der nun von der Air Force weiter subventioniert wird. Eine andere Hauptstelle zur Heranbildung solcher Leute ist das Institute for numerical Analysis in Los Angeles, wo die SWAC steht. Wir unterhalten dort eine Gruppe von Wissenschaftlern - und wir haben immer dafür gesorgt, daß auch gute Mathematiker darunter sind -, deren Zweck es ist, Mathematik und Rechnen zusammen zu betreiben. Das Modernste an Einrichtung steht dort zur Verfügung, so daß die Leute wirklich sehen können, wie neuartig und interessant dieses Gebiet wissenschaftlicher Tätigkeit ist.

Drittes Kapitel

DIE GÖTTINGER ENTWICKLUNGEN ELEKTRONISCHER RECHENAUTOMATEN

Prof. Dr. L. Biermann
Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen
und Universität Göttingen

§ 1. Beginn der Entwicklungsarbeiten

Den Ausgangspunkt unserer Entwicklungen bildeten die praktischen Probleme aus dem Bereich der theoretischen Physik und Astrophysik, welche in der Rechengruppe der astrophysikalischen Abteilung unseres Institutes bearbeitet werden (vgl. hierzu auch § 5 unten). 1947 erfuhren wir zum ersten Male von den amerikanischen Entwicklungen elektronischer Rechenmaschinen. Damals hatte Dr. Billing den, wie sich in der Folge zeigte, ausgezeichneten Einfall, daß eine rasch rotierende Trommel mit magnetischem Material ein geeignetes Mittel zum Speichern von Ziffern darstellen sollte. Diese Entwicklung eines magnetischen Trommelspeichers wurde im wesentlichen in den Jahren 1947 und 1948 von Dr. Billing im Institut für Instrumentenkunde in der Max-Planck-Gesellschaft durchgeführt, etwa gleichzeitig mit den uns zunächst noch unbekannten Entwicklungen in den USA und England. Die erste Veröffentlichung darüber ist 1949 erschienen (H. Billing; Numerische Rechenmaschine mit Magnetophonspeicher, ZaMM 29, 1 (1949)).

Auf Grund dieser und noch anderer Vorarbeiten haben wir uns 195o entschlossen, die Entwicklung mathematischer Maschinen in etwas größerem Stil zu beginnen. Diese Entwicklung wird seitdem getragen von einer sehr engen Arbeitsgemeinschaft zwischen einer Dr. Billing unterstehenden elektronischen Arbeitsgruppe und der astrophysikalischen Abteilung am Max-Planck-Institut für Physik; während der ersteren die Verdienste im Bereich der Elektronik ungeteilt zukommen, bearbeitet die letztere insbesondere die zugehörigen praktisch-mathematischen und die von den Problemen her gegebenen Aufgaben. Es ist mein Eindruck, daß die möglichst weitgehende Integration dieser drei Aspekte der Aufgabe - des elektronischen, des mathematischen und des durch den Charakter der jeweiligen physikalischen Aufgabe gegebenen - vielleicht besonders charakteristisch ist für die Göttinger Entwicklung.

Wir bauten unsere Pläne zunächst sozusagen um den Magnettrommelspeicher herum. Der erste Plan, der dabei entstand, zielte auf die Maschine, die wir jetzt als G 2 bezeichnen.

§ 2. Die G 2

Die G 2 soll als Hauptspeicher eine Magnettrommel für 2 o48 Zahlen zu 32 Dualstellen besitzen. Diese Trommel dreht sich mit etwa loo Umdrehungen pro Sekunde. Die Maschine wird für feste Stellung des Kommas gebaut, und alle Zahlen werden voraussichtlich sämtlich kleiner als 1 sein. Der Trommelspeicher faßt 64 Spuren, auf deren jeder sich 32 Zahlen zu je 32 Dualziffern speichern lassen.

Bei dieser Maschine ist die Möglichkeit vorgesehen, den Ablauf der Rechenprogramme automatisch je nach dem Resultat einer Zwischenrechnung zu ändern. Das bedeutet z.B. folgendes: Wenn ich eine Iterationsfolge habe, und ich möchte, daß diese Iterationsfolge abgebrochen wird, sobald die Resultate stehen, d.h. sobald sie sich bei nochmaliger Iteration nicht mehr merklich ändern, dann kann ich dies als Befehl eingeben. Ich habe sogenannte Entscheidungsbefehle, welche mir beim Programmieren die Möglichkeit geben, den Gang der Rechnung so zu beeinflussen, daß auf die Hauptroutine der Befehle zurückgegangen wird, wenn die Zwischenbefehlskette ihr Ziel erreicht hat.

Die Impulsfrequenz der Maschine ist 115 kHz, das ist eine Zehnerpotenz weniger als bei Höchstleistungsmaschinen. Unser Ziel war, wenn ich an die Ausführungen von Dr. Weyl anknüpfen darf, eine Maschine zu haben, welche höchstens 3o Prozent der Zeit nicht geht, die nach Möglichkeit aber noch zuverlässiger ist. Das war natürlich in jeder Beziehung zu berücksichtigen, auch bei der Zahlenmenge. Die G 2 hat etwas über 1 ooo Röhren. Dieser Rechenautomat entspricht also ungefähr, soweit das zu übersehen ist, dem von Dr. Weyl im zweiten Kapitel, § 1, als erste Maschine der Gruppe IV angegebenen CALDIC. Die Rechengeschwindigkeit ist etwa lo^2 Operationen pro Sekunde. Die Maschine arbeitet als eine Serienmaschine. Es gibt bei Rechenmaschinen zwei Möglichkeiten, die verschiedenen Dualstellen zu verarbeiten: Entweder man behandelt alle Dualstellen gleichzeitig ("Parallelmaschine"), dann geht das Rechnen sehr viel schneller, oder aber man behandelt sie hintereinander ("in Serie"), indem alle Zahlen dargestellt werden als Folgen von Impulsen, die hintereinander laufen. Im letzteren Fall scheint die Rechengeschwindigkeit um einen Faktor von der Ordnung 32 geringer zu sein; in Wirklichkeit ist der Unterschied natürlich nicht ganz so groß. Wir entschieden uns aber für den Serientyp, hauptsächlich deswegen, weil er im Hinblick auf die Zuverlässigkeit gewisse Vorteile bietet.

Die G 2 ist, abgesehen von der Trommel, die älter ist, etwa 195o begonnen worden. Wir haben sie soweit fertiggestellt, daß wir hoffen, im Winter 1952/53 mit den ersten Rechenversuchen zu beginnen.

§ 3. Die G 1

Während die Arbeiten an der G 2 im Gange waren, stellten wir uns die Frage, ob es nicht nützlich sei, eine Maschine zu haben, die in ihren Eigenschaften zwischen denen gewöhnlicher Tischrechenmaschinen und denen großer Maschinen steht. Wir glaubten, daß man im ganzen schon etwas Wesentliches gewinnen würde, wenn man mit vernünftigem elektronischen Aufwand nur über das, was unsere Rechengruppe leistet, größenordnungsmäßig hinauskommen würde. Auf der anderen Seite war es natürlich auch an sich interessant, ob man mit einem bescheidenen Aufwand unter Verzicht auf manche Annehmlichkeit vielleicht eine Maschine würde konstruieren können, welche auch für die Zwecke etwa anderer Hochschulinstitute von Interesse sein könnte. Aus Erwägungen dieser Art, die sich im Laufe der Entwicklung ziemlich abgewandelt haben, entstand die G 1 ("G 1" deshalb, weil sie eher fertiggeworden ist als die G 2). Im letzten Winter haben wir angefangen, die ersten Proberechnungen zu machen. Seit einigen Wochen haben wir das erste große Programm damit in Angriff genommen.

Die G 1 hat eine feste Befehlseingabe mit Hilfe von Lochstreifen. Wir haben, um die Konstruktion so einfach wie möglich zu halten, käufliche Lochstreifensender der Fernschreibindustrie benutzt. Es sind 4 Lochstreifensender vorgesehen; die Zahl kann man natürlich beliebig wählen. Ferner ist die G 1 gekoppelt mit einer von uns umgebauten elektrischen Schreibmaschine. Diese Schreibmaschine hat eine doppelte Funktion: Einmal erlaubt sie, direkt auf der Tastatur zu spielen, d.h. wir können, wenn wir wollen - das haben wir zu Anfang auch gemacht, weil die Lochstreifensender verzögert geliefert wurden - die erforderlichen Rechenbefehle einfach eintasten. Das zweite ist, daß sie

die Resultate automatisch druckt, wenn man es verlangt. Bei jeder Rechnung ist es natürlich so, daß man nur die wenigsten Resultate gedruckt vor sich haben will. Die meisten sind nur Zwischenresultate, die sofort wieder untergehen. Als Stellenzahl wurden wieder 32 Dualstellen gewählt. Bei der G 1 ist es so, daß das Komma hinter der dritten Dualstelle steht; der Bereich geht also von - 8 bis + 8. Die Impulsfrequenz ist 16 mal kleiner als bei der G 2; das sind also 7,2 kHz. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Trommelspeichers ist 5o pro Sekunde. Die interne Rechengeschwindigkeit ist auch entsprechend kleiner. Das spielt hier deswegen keine Rolle, weil bei dieser Konstruktion das Tempo begrenzt ist durch die Lochstreifensender. Der Lochstreifensender tastet 7 Befehle pro Sekunde ab. Für jeden "Befehl" gibt es $32 = 2^5$ Möglichkeiten, nämlich die beliebige Kombination von 5 Stellen (quer zur Bewegungsrichtung) auf dem Streifen, die gelocht werden können oder auch nicht; es gibt 22 verschiedene Befehle im eigentlichen Sinn, der Rest bezieht sich auf ein- oder auszugebende Dezimalziffern. Die Rechnung

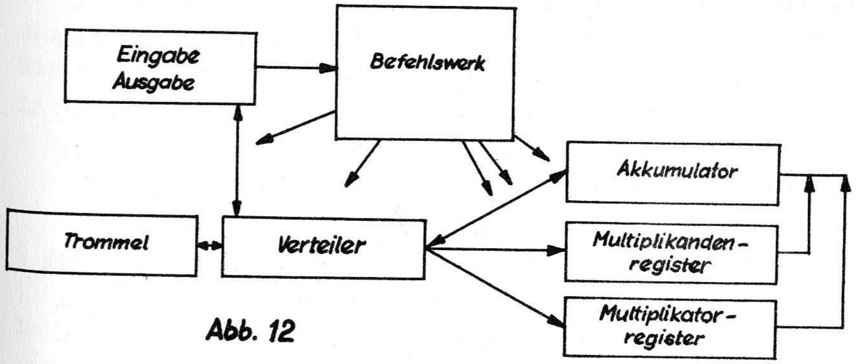


Abb. 12

geschieht genau wie bei der G 2 im reinen Dualsystem. Wir haben uns entschlossen, die Dezimalziffern nicht jede für sich zu verschlüsseln (in diesem Fall würde man an jeder Stelle der Maschine an die Dezimalstellen herankommen können, wenn man will), sondern wir haben in der Maschine nur die reinen Dualziffern. Das allgemeine Schema des Aufbaues zeigt Abb. 12.

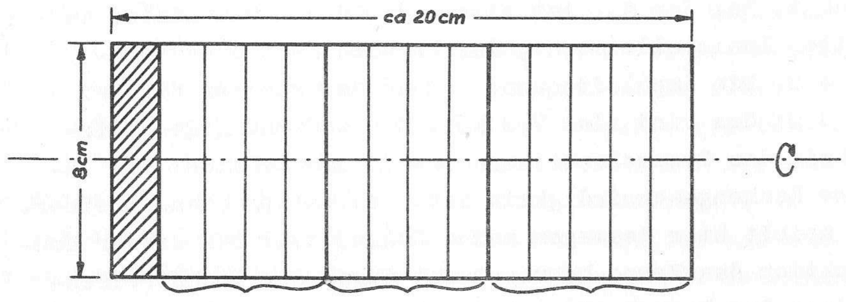


Abb. 13

Die Trommel des Magnettrommelspeichers (Abb. 13) ist eingeteilt in die folgenden Segmente:

1. Die sogenannte "Uhr". Das ist eine Folge magnetischer Impulse, die auf einem mit der Trommel fest verbundenen eisernen Zahnrad sozusagen fest eingraviert ist; sie gibt ständig, wenn die Trommel sich dreht, im richtigen Takt Impulse. Das hat den Zweck, den Gang der Maschine unabhängig zu machen von Drehzahlschwankungen.
2. Vier dynamische Speicher. Schematisch gesprochen handelt es sich bei einem dynamischen Speicher um folgendes: Um die Trommel herum sind über einer bestimmten Spur ein Schreibmagnet und zwei Lesemagnete angeordnet. Ich kann nun an einem der beiden Lesemagnete eine Zahl ablesen, sie mit dem Schreibmagneten wieder auf die Trommel geben, sie eine viertel Trommelumdrehung später wieder ablesen, eingeben u.s.f.. Die Eingabe läßt sich noch elektronisch verzögern. Damit kann ich nun erreichen, daß eine Zahl, welche im statischen Magnettrommelspeicher als Magnetisierungszustand der Trommel gegeben ist, hier ständig als Impulsfolge vorliegt, die in dem dynamischen Speicher zirkuliert.
3. Vier Spuren, deren Zahleninhalte (je 4 Zahlen zu je 32 Dualziffern) zyklisch vertauscht werden können.
4. Fünf Spuren, welche die Umrechnungszahlen aus dem Dezimalsystem in das Dualsystem enthalten. Die Umrechnung geschieht einfach mit Hilfe der dualen Äquivalente der Zahlen $\mathrm{lo}^{-\mathrm{lo}}$, $2\cdot\mathrm{lo}^{-\mathrm{lo}}$, $3\cdot\mathrm{lo}^{-\mathrm{lo}}$,..., $9\cdot\mathrm{lo}^{-\mathrm{lo}}$, die fest gespeichert sind; jede eingegebene Dezimalzahl wird dann Stelle für Stelle mit lo multipliziert und um eine Stelle weitergeschoben. Außerdem enthalten diese Spuren Plätze für lo weitere Zahlen, die gespeichert und nach Bedarf aufgerufen werden können.

Das Addieren und Subtrahieren geschieht mit dem sogenannten Akkumulator, der einen der genannten dynamischen Speicher enthält. Die beiden anderen dynamischen Register werden zur Multiplikation und zur Division benutzt. Außerdem enthält die Maschine auch noch ein besonderes Werk zum Wurzelziehen. Es erwies sich nämlich bei den Aufgaben, die wir zu rechnen haben, und bei dem Umfang der Maschine als zweckmäßig, diese Routine fest eingebaut zu haben. Sie erfordert nur 2o zusätzliche Röhren, und dies spielt in der Gesamtzahl keine Rolle. Die Zahl der Röhren in der G 1 ist 47o.

§ 4. Der Befehlsplan

Es handelt sich um einen verhältnismäßig einfachen Plan, und ich schreibe nur einen Teil der Befehle hin. z bedeute die Nummer eines Zahlenspeichers, ⟨z⟩ seinen Inhalt, d.h. eine 32-stellige Dualzahl.

+z Bilde Akkumulatorinhalt ⟨A⟩ plus Inhalt ⟨z⟩ des Speichers z.

-z bedeutet entsprechend die Subtraktion vom Akkumulatorinhalt ⟨A⟩. Dabei kann ⟨z⟩ irgendein Vorzeichen haben.

mz Werfe den Inhalt ⟨z⟩ des Speichers z in das Multiplikandenregister.

xz' Zum Akkumulatorinhalt ⟨A⟩ ist das Produkt aus dem Inhalt des Multiplikandenregisters und dem Inhalt ⟨z'⟩ des Speichers z' zu addieren. War der Akkumulator vorher leer, so erscheint nun im Akkumulator das Ergebnis der Multiplikation.

$\underline{xz}$' bedeutet die entsprechende Operation mit einem Minus-Zeichen vor dem Produkt.

:z Dividiere den Akkumulatorinhalt ⟨A⟩ durch den Inhalt ⟨z⟩ des Speichers z.

Ferner gibt es noch Befehle zum Ausdrucken auf der Schreibmaschine und zum Lochen eines Lochstreifens durch einen angekoppelten Geber. Durch einen besonderen Befehl kann ich den Inhalt des Akkumulators in das Multiplikandenregister bringen, sowie aus dem Inhalt des Akkumulators die Wurzel ziehen. Endlich kann man die Inhalte eines Teiles der Speicherplätze (auf den vorerwähnten 4 Spuren) zyklisch vertauschen. Es gibt Befehle zum Starten und zum Anhalten. Ist eine Lochung mißglückt, dann kann ich alle 5 Stellen durchlochen und anschließend die Lochung wiederholen.

Dies ist der Teil der Befehle, der sich auf die Bearbeitung von Zahlen bezieht, die sich bereits in der Maschine befinden. Die Befehle, die sich auf Zahlen beziehen, die von außen in die Maschine eingegeben werden, haben analoge Form.

§ 5. Probleme

Das erste mit der G 1 behandelte Problem hatte seinen Ursprung in der Theorie der Nordlichter; neuerdings ist das gleiche Problem für die Theorie der Höhenstrahlen wichtig geworden. Es handelt sich um die Bewegung eines elektrisch geladenen Teilchens im Magnetfeld der Erde. Das Erdmagnetfeld wird dabei approximiert durch einen Dipol; das ist eine Näherung, die für diesen Zweck ausreicht.

Das Problem wurde zunächst, seit 1932, von Störmer in einer Reihe von Abhandlungen behandelt. Störmer bekam auch eine größere Summe von der norwegischen Regierung zur Verfügung gestellt, um numerische Rechnungen durchzuführen. Er hat in den dreißiger Jahren etwa 13o einzelne Bahnen berechnet. Die Mannigfaltigkeit der damit gefundenen Bahnen ist aber größer, da man aus jeder berechneten Bahn durch einfache Transformation weitere Bahnen bekommen kann. Um eine vollständige Übersicht zu bekommen, müßte man trotzdem eine größere Anzahl von Lösungen kennen.

Störmer ging aus von einer bestimmten Vorstellung über die Natur der Korpuskularstrahlen, welche die Nordlichter erzeugen. Diese Vorstellung bestimmte die Wahl der Parameter, mit denen er die Rechnung begann. Einer der wichtigsten dieser Parameter ist die Energie, mit der das Teilchen ankommt. Die Energien, die Störmer interessierten, waren durchweg von der Ordnung $1o^{1o}$ eV oder mehr. Nun hat sich von der Seite der Höhenstrahlung das Interesse verlagert auf die Energiebereiche, bei denen die Energie ein verhältnismäßig geringes Vielfaches der Ruhenergie eines Protons ($\approx 1o^{9}$ eV) ist. Die Geschwindigkeit ist dann zwar noch von der Größenordnung c (Lichtgeschwindigkeit), aber nicht mehr in sehr guter Näherung gleich c. Daher kommt es, daß für die Probleme, die die Höhenstrahlungstheorie jetzt stellt, die früheren Rechnungen von Störmer nicht mehr ausreichend sind, um alle physikalisch interessanten Fragen zu beantworten, da fast alle von Störmer berechneten Bahnen, wenn man sie auf diese Energien transformiert, die Erde nicht erreichen.

Diese Lage hat dazu geführt, daß wir mit unserer Rechengruppe im letzten Jahr eine Anzahl weiterer Bahnen berechnet haben (etwa 2o; wegen der für die Theorie der Höhenstrahlung zum Teil recht interessanten Resultate vergleiche man die Arbeit von A. Schlüter: Solare Ultrastrahlung und Erdmagnetfeld, Z. Naturforschung 6a, 613 (1951)). Es zeigt sich aber, daß diese Zahl von 2o Bahnen noch ganz unzureichend ist, um alle Aufschlüsse zu gewinnen, die man gerne haben möchte. Denn einmal möchte man einen angemessenen Spielraum von Teilchenenergien haben, etwa $1 \cdot 10^9$ Volt, $2 \cdot 10^9$ Volt, $3 \cdot 10^9$ Volt und außerdem noch viele Anfangsrichtungen (in bezug auf die Lage des Dipols), aus denen das Teilchen kommt.

Es ist hier nicht so, daß man alle wesentlichen Resultate aus den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten gewinnen kann, sondern manche von denen, die uns besonders interessieren, sind tatsächlich durch die numerischen Integrationen gewonnen worden. Deswegen erhoffen wir jetzt von einer Fortsetzung der numerischen Rechnungen - ich denke, daß wir noch einige hundert Bahnen rechnen werden - weitere wichtige Aufschlüsse.

Bei dieser Aufgabe integriert man ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen, welches insgesamt von der 5. Ordnung ist (2 Differentialgleichungen 2. Ordnung und eine 1. Ordnung; man könnte es noch um eine Ordnung mit Hilfe eines Integrals reduzieren, doch wird dies statt dessen zur Kontrolle ausgenutzt). Wir verwenden Integrationsverfahren, welche die Differenzen bis zur 4. Ordnung berücksichtigen, und erreichen bei etwa loo Integrationsschritten in diesem Verfahren bei normalen Bahnen genügende Genauigkeit.

Vielleicht interessiert, wie in diesem praktischen Fall der Vergleich zwischen Rechner und Rechenmaschine ausfällt. Mit den Rechnern wurden pro Woche zwei oder drei Bahnen fertig; ein Rechner hat im Mittel pro Woche etwa eine Bahn gerechnet. Die Maschine berechnet eine Bahn im Durchschnitt etwa in 3 - 4 Stunden. Wir haben die Möglichkeit, die Maschine in 2 Schichten zu betreiben und können dann bis zu 5 Bahnen am Tag berechnen. In wenigen Monaten könnten wir also, wenn wir nichts anderes rechnen würden, alle Wünsche erfüllen, die an die Mannigfaltigkeiten der Bahnen gestellt werden können.

Die andere Aufgabe, die wir mit unserer Maschine angreifen wollen, sind Lösungen der Schrödinger-Gleichung, und zwar Lösungen in einer bestimmten Approximation (Zentralfeldnäherung), welche das Verhalten der Wellenfunktion im Inneren und in der Nähe eines Atomrumpfes zu beschreiben geeignet sind. Das führt für Zweielektronenprobleme (z.B. Leuchtelektronen von Mg I oder Ca I) auf Gleichungssysteme des folgenden Typs:

$$\frac{d^2 P_1(r)}{dr^2} + (T(r) + \varepsilon) = q\ (r)$$

und eine entsprechende Gleichung mit $P_2(r)$.

Die Schwierigkeit besteht darin, daß die Potentialfunktion $T(r)$ sowie $q(r)$ auch von den Wellenfunktionen $P_i(r)$ abhängt, die man erst gewinnen will. Man kann sich praktisch nicht anders helfen, als dadurch, daß man einen Ansatz macht, den man dann auf der rechten Seite des Systems benutzt. Man rechnet dann die Gleichung mit den richtigen Randbedingungen durch und stellt nach Berücksichtigung der Normierungsbedingungen fest, wie nahe man an die angenommenen Lösungen herangekommen ist. Dabei erreicht man genügende Rechengenauigkeit im allgemeinen mit etwa 10^2 Integrationsschritten. Da aber die Abhängigkeit von den Randbedingungen und vom Energieparameter ε kompliziert ist, ist es sehr schwer, durch einfaches Ansehen der Lösung zu erkennen, wie sich die Iterationen verhalten, so daß man manchmal viele Versuche braucht, um zum Ziel zu kommen. Die Regel ist zwar, daß man in drei oder vier Versuchen eine brauchbare Lösung findet; es gab aber auch Fälle, wo es uns nicht gelang, eine befriedigende Näherung zu erhalten. In dieser Lage bedeutet eine Maschine schon eine ganz wesentliche Erleichterung der Arbeit.

§ 6. Das Programmieren

Um die Störmersche Rechnung zu programmieren, brauchten wir insgesamt etwa 3 ooo Befehle. Mit "Befehl" ist allerdings in unserer Sprechweise jeder einzelne Anschlag auf der Schreibmaschine gemeint; denn jeder einzelne Anschlag, etwa m oder z, ist ja etwas, was vom Lochstreifen aufgenommen werden muß. Dann braucht man pro Integrationsschritt etwa 5oo Befehle, also etwa 9o Sekunden. (Die Zahl der Befehle, die wirklich ausgeführt werden, ist etwas kleiner, nur 5 bis 6 pro Sekunde, weil bei der G 1 einige Befehle, wie das Wurzelziehen, die Multiplikation und die Division, etwas länger als 1/7 Sekunde brauchen).

Bei der Integration wurden verschiedene Formeln verwendet. Einmal war die Möglichkeit vorgesehen, daß abwechselnd ein Extrapolationsschritt und ein Interpolationsschritt gemacht wurde. Zum Zweiten - das hat Störmer bereits ausgeführt - rechnet man in größerer Entfernung von der Erde zweckmäßig mit einem anderen Gleichungssystem als in Erdnähe; man hat also in Wirklichkeit zwei Gleichungssysteme, die sich noch durch das Argument unterscheiden, so daß man zwei Formen der Gleichung zu unterscheiden hat. Drittens kann die Schrittlänge während der Rechnung durch eine Subroutine halbiert oder verdoppelt werden.

Man braucht ferner noch einige hundert Befehle für den Eingang, d.h. für den Beginn der Rechnung und für die Konstanten, die eingehen, sowie einige weitere hundert Befehle für den Übergang von einem Gleichungssystem zum anderen.

Diese insgesamt etwa 3 ooo Befehle sind zu Beginn auf Lochstreifen zu geben. Wenn aber diese Arbeit einmal geleistet ist, haben die Rechner an der Maschine nur zuzuschauen, wie die Zahlenreihen sich entwickeln, wie ihre Differenzen lauten,und ob die eventuell zu groß werden. Man kann auch noch Zwischenkontrollen einschalten, um sich zu überzeugen, ob alles in Ordnung ist.

§ 7. Bauzeit

Die geistige Arbeit, die zum Bau einer Maschine wie der G 1 aufzuweisen ist, läßt sich schwer abmessen; die Mechanikerarbeit beträgt etwa 4 ooo Stunden. Man kann also eine Maschine mit dieser Genauigkeit (d.h. zehnstelliger) und einer Speicherkapazität von ungefähr 1oo bis 1 ooo Zellen mit dem genannten Aufwand herstellen. Wir sind überzeugt, daß diese Maschine, wenn man erst alle Kinderkrankheiten kennengelernt haben wird, auch vollkommen betriebssicher arbeiten wird.

N a c h t r a g (4. November 1952)

Inzwischen ist die G 1 nach mehrmonatiger Erprobung an ihrem endgültigen Platz im Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen aufgestellt worden; sie ist gegenwärtig zwischen 14 und 21 Stunden pro Tag in Betrieb. Genauere Beschreibungen finden sich in zwei einander zum Teil ergänzenden Aufsätzen, welche in Kürze in der "Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik" und in den "Naturwissenschaften" erscheinen werden (L. Biermann, H. Billing, W. Hopmann, A. Schlüter: Die Göttinger elektronischen Rechenmaschinen, ZaMM im Druck; L. Biermann u. H. Billing: Moderne mathematische Maschinen, Die Naturwissenschaften, im Druck).

V i e r t e s K a p i t e l

ÜBER PROGRAMMGESTEUERTE RECHENGERÄTE FÜR INDUSTRIELLE VERWENDUNG

Dipl.-Ing. K. Zuse
Neukirchen
Fa. Zuse K.-G.

§ 1. Geschichtlicher Überblick über die Entwicklung programmgesteuerter Rechengeräte in Deutschland bis 1950

Die Entwicklung programmgesteuerter Rechengeräte begann in Deutschland zunächst auf rein privater Basis. Ich selbst hatte Bauingenieur studiert und sehr viel zu tun mit Rechnungen, die ganz bestimmte Systeme betrafen. Ich stellte mir die Aufgabe, dieses zu mechanisieren. Im Verfolg dieses Gedankens kam ich zum Entwurf einer vollständigen programmgesteuerten Rechenmaschine und habe dann in den Jahren 1937 - 40 zunächst rein privat den Bau dieser Modelle betrieben. Von den im Krieg gebauten Geräten ist leider nichts übrig geblieben. Im allgemeinen sind sie durch Bomben zerstört worden.

Die ersten Geräte waren rein mechanisch, denn ich verstand damals noch sehr wenig von Elektrotechnik, kam also nicht auf die eleganten Ideen, die heute Selbstverständlichkeit geworden sind. Ich versuchte zuerst, Relaismaschinen zu bauen. Das war mir aber zu teuer. Ich hatte kein Geld, um mir Relais zu kaufen. Ich machte es deshalb rein mit Blechen. Diese Technik, rein mit Blechen zu arbeiten, lediglich durch verschiedene Schaltungen von Blechen Relais zu ersetzen, hätte damals noch große Aussicht auf Erfolg gehabt. Inzwischen sind aber die Entwicklungen weit fortgeschritten, so daß heute nur für bestimmte Zwecke diese mechanische Technik noch Bedeutung hat. Zum Beispiel für mechanische Speicherwerke, und zwar, wenn es sich nicht um ausgesprochene Massenspeicher handelt. Ich glaube, daß in solchen Fällen der mechanische Speicher auch heute noch seine Bedeutung hat, insbesondere für Kleinmaschinen für industrielle Verwendung.

Erst während des Krieges gelang es, etwas offizielles Interesse zu erwecken. Ich möchte hier den Namen von Prof. Teichmann erwähnen, der damals bei der deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt als erster die Initiative ergriff und offizielle Mittel frei machte für diese Entwicklung.

Das erste Gerät, welches man als vollständiges programmgesteuertes Gerät bezeichnen konnte, die Z 3, wurde 1941 fertig. Es hatte etwa 3 ooo Relais, einen Relaisspeicher für 64 Zellen und hat sämtliche Operationen gelöst, die man von einem programmgesteuerten Rechengerät erwarten muß. Es wurden verschiedene Rechnungen der Aerodynamik, vor allem der Flatterrechnung darauf durchgeführt. Das Gerät hatte 23 ooo RM gekostet. Das sei nur als Hinweis dafür gegeben, in welch bescheidenem Rahmen sich damals in Deutschland die Entwicklungen bewegten.

Auch die elektronische Entwicklung wurde von uns schon vor
dem Kriege aufgegriffen. Herr Dr. Schreyer hat bereits 1937
die ersten systematischen Versuche gemacht, um solche gros-
sen programmgesteuerten Rechenmaschinen mit Hilfe von Elek-
tronenröhren zu bauen. Er hat darüber eine Doktorarbeit ver-
faßt, die leider wenig bekannt ist, weil sie damals als ge-
heim galt. Wir haben dann während des Krieges (von 1942 bis
1944) ein kleines Versuchsmodell gebaut, was sich aber nach
dem Kriege restlos aufgelöst hat. Leider hat dann Dr.
Schreyer nach dem Kriege unter dem Eindruck der gewaltigen
Zahlen, die von den USA herüberschallten, zunächst die Flin-
te ins Korn geworfen und ist jetzt nach Brasilien gegangen.
Er beschäftigt sich dort mit fernmeldetechnischen Proble-
men für die brasilianische Regierung. So mußte diese Linie
der elektronischen Entwicklung in Deutschland nach 1945
abgebrochen werden. Um so erfreulicher ist es, daß jetzt an

anderer Stelle von Prof. Dr. Biermann in Göttingen diese Entwicklung aufgegriffen worden ist, die allerdings nicht auf den Arbeiten von Herrn Dr. Schreyer, sondern selbständig auf den Arbeiten von Herrn Dr. Billing fußt.

Um ungefähr einen Begriff von der damaligen Situation zu geben, möchte ich noch erwähnen, daß wir 1939-4o verzweifelt versuchten, der deutschen Kriegsmarine ein elektronisches Rechengerät zu empfehlen, welches etwa 1 5oo Röhren haben sollte und nach den damaligen Plänen erheblich mehr geleistet hätte als die ENIAC. Aber es war nicht möglich, dafür das notwendige Interesse zu erregen. Wir mußten absichtlich tiefstapeln, wir durften keinesfalls sagen, daß wir etwa 1 ooo Multiplikationen pro Sekunde machen wollten, dann wären wir sofort als nicht seriös herauskomplimentiert worden. Wir haben absichtlich tiefgestapelt, um allmählich den Boden vorzubereiten. Aber es war dies nicht in dem Maße möglich, wie es nötig gewesen wäre. Nach dem Kriege war es dann interessant zu hören, daß die amerikanische Kriegsmarine sich nicht gescheut hatte, ein Gerät mit 18 ooo Röhren zu bauen. Ich weiß nicht, ob das nur daran liegt, daß man drüben mehr Geld hat. Wenn ich daran denke, welche Anzahl von Röhren wir allein in Geräte wie die V 2 eingebaut haben, dann wären die paar Röhrchen, die wir für unser Gerät gebraucht hätten, dagegen nicht erwähnenswert gewesen.

Mit 1945 war zunächst diese Entwicklung zu einem notwendigen Abschluß gekommen. Ein Nachfolger des ersten Gerätes war die Z 4, die wir im Bau hatten. Drei Tage vor Ostern 1945, die Amerikaner waren in Kassel, man konnte die Kanonen herüberdonnern hören, hatte ich die Ehre, das Gerät vor den Herren der AVA (Aerodynamische Versuchsanstalt) zum ersten Mal vorzuführen, wobei es seine ersten bescheidenen Determinanten löste. Dann verschwand das Gerät. Wir haben es irgendwo im Allgäu versteckt. Dort hat es ein abenteuerliches Leben hinter sich. Es verschwand abwechselnd in einem Schweinestall oder Schuppen oder sonst irgendwo. Wir hatten versucht, es wieder auf die Beine zu bekommen. Das war sehr schwierig. Immerhin kam eines Tages Herr Prof. Stiefel aus der Schweiz, sah sich das Gerät an, und obgleich er gerade aus den USA kam und noch völlig unter dem Eindruck der Riesengeräte stand, meinte er, dieses wäre genau das richtige Gerät für ihn, denn es wäre eine verhältnismäßig langsame und kleine Maschine, für den Anfang gerade das Richtige. Und zwar aus einem einfachen Grund: Weil die Programmfertigung und Bedienung sehr einfach sind. Damals hieß es noch: Wenn man eine der großen amerikanischen Maschinen bedienen lernen will, dann müßte ein normaler Mensch etwa 6 Wochen lernen und ein Professor etwa 2 - 3 Wochen, während es bei uns immerhin in 2 bis 3 Stunden möglich war, die Maschine zu beherrschen, wenn man einigermassen die Fähigkeiten eines normalen Ingenieurs hatte. Wir haben die Z 4 im Auftrage der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wieder so herrichten können, daß sie 1950 in Zürich aufgestellt werden konnte, wo sie heute noch mit großer Zufriedenheit arbeitet.

Es hat sich gezeigt, daß das Relaisprinzip eine solide Basis ist, auf der man fußen kann. Es ist jedenfalls so, daß die Z 4 länger in Betrieb als in Reparatur war. Man macht z.B. folgendes: Man nimmt ein langes Programm, welches etwa 10 Stunden durchläuft, legt es abends in die Maschine ein. Dann wird die gesamte E. T. H. Zürich abgeschlossen. Die Maschine arbeitet die ganze Nacht durch. Morgens um 6 Uhr schaltet sie sich selbst ab. Wenn morgens um 8 Uhr die Herren kommen, sind die Resultate fertig da. Ich weiß nicht,

ob man mit einer elektronischen Maschine so weit kommt. Es wäre zu hoffen, daß man so weit kommt; aber zunächst glaube ich, daß die Relaismaschine dafür etwas prädestinierter ist.

§ 2. Nachkriegsentwicklung von Geräten für industrielle Verwendung

Wir haben uns nach dem Kriege, auch im Hinblick auf die großen amerikanischen Entwicklungen, gesagt: Mit diesen Riesensummen und Riesengeräten können wir auf keinen Fall konkurrieren. Das hat bei den Mitteln, die uns zur Verfügung stehen, keinen Sinn. Öffentliche Gelder standen in Deutschland kaum zur Verfügung. So waren wir ganz auf uns angewiesen und haben uns die Aufgabe gestellt, jetzt auf industrieller Basis die Sache weiter zu verfechten, d.h. verhältnismäßig einfache Geräte zu bauen, leistungsfähig, d.h. so leistungsfähig, daß sie rentabel sind, aber nicht superleistungsfähig, wie es nur elektronische Geräte der Natur nach sein können, dafür aber mit unbedingter Betriebssicherheit, so daß wir mit ruhigem Gewissen einem Kunden, der aus der Industrie kommt, dieses Gerät anvertrauen können.

Daraus ergibt sich der ganze Unterschied in der Situation. Man hat 1939 über uns gelächelt, als wir elektronische Geräte bauen wollten. Heute lächelt man oft über uns, weil wir keine elektronischen Maschinen bauen. Wir haben das gleiche Prinzip beibehalten wie damals. Wir sagten uns damals: Die elektronische Maschine ist wunderbar, aber erst müssen ihre Bauelemente entwickelt werden. Solange das nicht der Fall ist, bauen wir elektromagnetische Geräte. Auch heute werden wir sofort die elektronische Entwicklung aufnehmen in dem Augenblick, wo wir einer Industriefirma mit ruhigem Gewissen ein elektronisches Gerät anbieten können. Nach allem, was wir haben in Erfahrung bringen können, ist dieser Zustand heute noch nicht erreicht. Es wird auch von uns erwünscht, daß er eines Tages erreicht wird.

Wir bauen keine Filmdiven, die schwierige Probleme lösen, sondern Lastpferde, Geräte, die die tägliche Arbeit eines Industriebetriebes leisten sollen. Es war sehr erfreulich, daß wir in Deutschland eine Firma der optischen Industrie hatten, die Firma Leitz, Wetzlar, die ein solches Gerät bei uns bestellen konnte. Dies gab uns die Möglichkeit, die Entwicklung fortzusetzen, weiterhin wissenschaftliche Geräte zu bauen. Es handelt sich um das Gerät Z 5. Z 5 ist jetzt kurz vor der Vollendung, und wir machen gerade die ersten Prüfungen. Ich glaube, daß es in Kürze möglich sein wird, die interessierten Kreise einzuladen, denen wir dann das Gerät vorführen können.

§ 3. Technische Details

A) Mathematische Gesichtspunkte

a) Die Programmsteuerung: Darüber ist inzwischen soviel geschrieben worden, daß es nicht mehr nötig ist, das im einzelnen zu erklären. Programmsteuerung ist an sich die Auflösung einer Formel, die beliebig kompliziert sein kann, in ihre einzelnen rechnerischen Moleküle, d.h. die Aufzählung der einzelnen Operationen und derjenigen Werte, mit denen diese Operationen durchgeführt werden sollen. Der erste, der dieses Prinzip fand, war bekanntlich Charles Babbage, der bereits im vorigen Jahrhundert versuchte, eine Maschine nach diesem Prinzip zu bauen.

b) Zahlendarstellung: Es war bis vor dem Kriege allgemein selbstverständlich, daß Rechenmaschinen im Dezimalsystem arbeiten. Das hatte seine guten Gründe. Die Idee, Rechenmaschinen im Dualsystem zu bauen, war zwar in Abhandlungen schon aufgetaucht, aber sie war noch nicht ausgeführt worden. Das liegt daran, daß man bis dahin auch noch keine programmgesteuerten Maschinen hatte. Es ist meine Ansicht, daß das Dualsystem erst in der programmgesteuerten Maschine seine volle Bedeutung erlangt. Bei einer einzelnen Tischrechenmaschine wiegen die Operationen des Übersetzens und Rückübersetzens von einem Zahlensystem ins andere den ganzen Vorteil wieder auf, so daß es sich nicht lohnen würde, eine Maschine für einzelne Operationen im Dualsystem zu bauen. Ganz anders ist die Situation aber, wenn die Maschine überhaupt tausende von Werten für sich behält und derjenige, der die Maschine bedient, am Anfang nur ein paar Werte hineingibt und sich am Ende ein paar Resultate ansieht. Dann sind im ganzen wohl nur 5 bis lo Prozent der Werte oder noch weniger zu übersetzen. In diesem Falle wird die Übersetzungszeit verschwindend klein gegen die übrige Rechenzeit. Dann kommt der Vorteil des Dualsystems erheblich zur Geltung. Ich gebe allerdings zu, daß insbesondere bei Aiken die Technik der Tetraden-Rechnung, d.h. Dezimalzahlen durch 4 Ja-Nein-Werte darzustellen, wirklich zu sehr guten Ergebnissen geführt hat.

Aiken steht auf dem Standpunkt, daß das Dezimalsystem absolut überlegen ist. Diesen Standpunkt teile ich nicht. Es ist vielleicht so, daß man von Fall zu Fall entscheiden muß, welches System das bessere ist, das duale oder das dezimale. Ich selbst hatte mich damals für das duale System entschieden, weil es das ideale System für eine Relaismaschine ist, die mit Ja-Nein-Werten arbeitet. Von vorneherein sind meine Geräte für wissenschaftliche Zwecke im Dualsystem gebaut.

c) Das gleitende Komma: Die Zahlen, die in einer wissenschaftlich-technischen Maschine vorkommen, haben einen ganz anderen Spielraum in bezug auf die Größenordnung, als das bei kaufmännischen und Buchungsmaschinen der Fall ist. Es waren bis 194o nur Maschinen bekannt für kaufmännische Zwecke. Der Kaufmann kennt meistens die Größenordnung seiner Zahlen sehr gut; er weiß, wie hoch der größte Umsatz ist. Für ihn besteht daher nicht in dem Maße das Problem: Wo steht in meinen Rechnungen das Komma? Da die Komma-Rechnung sehr kompliziert ist, waren auch von der Rechenmaschinenindustrie bis dahin noch keine Versuche unternommen worden, diese Rechnung zu automatisieren.

Sobald aber die Aufgabe gestellt war, eine Maschine für den praktischen Ingenieur zu bauen (Ich möchte dabei ausdrücklich "praktischen Ingenieur" betonen, weil ich selber Ingenieur war und meine Geräte in erster Linie für Ingenieure bauen wollte; natürlich dann auch für wissenschaftliche Zwecke), wurde das gleitende Komma nötig. Wenn man etwa nur eine Determinante 3. Ordnung rechnen will und muß sich erst überlegen, in welcher Größenordnung die Zahlen einzustellen sind, dann wäre das für den Ingenieur eine untragbare Belastung. Deshalb sagte ich mir, es müßte unbedingt eine Methode gefunden werden, um mit dem gleitenden Komma zu rechnen.

Ich versuchte es zuerst mit rein logarithmischen Geräten, indem ich jede Zahl durch ihren Logarithmus darstellte. Dieser Versuch scheiterte daran, daß die Addition zweier solcher Zahlen selbstverständlich auf große Schwierigkeiten stieß. Man muß dann in irgendeiner Form die Additionslogarithmen in die Maschine einbauen. Aus diesem Grunde wählte

ich die halblogarithmische Form und stellte eine Zahl y so dar:

$$y = 2^a \cdot b \qquad \begin{array}{l} a \text{ ganzzahlig} \\ 1 \leqq b \leqq 2 \end{array}$$

Beispiel:

Die Zahl 13 schreibt sich bekanntlich dual so: 13 = 1lol. In der halblogarithmischen Form würde sie sich schreiben $13 = lo^{11} \cdot 1{,}lol$. Übersetzt man die rechte Seite in das Dezimalsystem, so erhält man $2^3 \cdot (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{8}) = 2^3 \cdot \frac{13}{8} = 8 \cdot \frac{13}{8} = 13$. Hier ist also a = 11; b = 1,lol. In dieser Form werden die Zahlen in der Maschine behandelt.

Das erfordert selbstverständlich eine Verkomplizierung der Rechenwerke. Beispielsweise muß sich die Maschine bei der Addition immer zuerst die a-Werte ansehen. Wenn die beiden a-Werte verschieden sind, muß sie zuerst die Ziffernfolge gegeneinander ausrichten, damit die zugeordneten Stellen untereinander stehen. Dann kann sie erst addieren. Und wenn sich eine Differenz o,oool ergibt, muß sie die 1 nach vorne ziehen, damit die Norm $y = 2^a \cdot b$ (a ganz; $1 \leqq b \leqq 2$) immer gewahrt wird. Ferner müssen mit den Exponenten Operationen durchgeführt werden; bei der Multiplikation müssen sie addiert, bei der Division subtrahiert werden, usw. So wird das Gerät verhältnismäßig schwierig zu bauen sein. Aber da kommt wieder die Relaistechnik zu Hilfe, denn das Relais ist ein idealer Baustein. Mit Hilfe der Schaltungsmathematik und der Formeln des Aussagenkalküls, systematisch angewandt auf die Schaltungsmathematik, war es möglich, dieser Probleme Herr zu werden.

Es war bei diesen theoretischen Überlegungen interessant, zu der Erkenntnis zu kommen, daß man mit Relais grundsätzlich alle rechnerischen Probleme behandeln kann, wie kompliziert sie auch immer sein mögen. Alle zukünftigen Rechenmaschinen, mögen sie noch so nahe an den menschlichen

Geist heranreichen oder ihn gar übertreffen, sind grundsätzlich auch mit Relais zu bauen, wobei allerdings ein Gesichtspunkt hinzukommt: Je komplizierter diese Geräte werden, um so mehr Relais gebraucht man. Unser eigener Kopf hat etwa lo Milliarden Relais; also müßten wir eine ganze Stadt wie Aachen mit Relais vollbauen, um unseren eigenen Kopf nachzubilden. Wir haben aber heute noch nicht die Relaistechnik, um zu solchen Abbildungen gewisser Gehirnfunktionen zu kommen; einfach quantitativ können wir es noch nicht. Ich glaube, mathematisch wäre es ziemlich leicht, unter Einsatz mehrerer guter Mathematiker innerhalb weniger Jahre dies zu erreichen. Aber es wird auf der anderen Seite der konstruktiven Lösungen bedürfen, um dieses Ziel zu erreichen.

B) Konstruktive Probleme

a) Relaistechnik: D a s Konstruktionsproblem der Rechenmaschine ist die Relaistechnik. Die damals bekannte Relaistechnik war nur das elektromagnetische Relais. Ich selbst möchte diesen Begriff Relais weiterfassen, und zwar jeden steuerbaren Ja-Nein-Wert-Schalter als ein Relais bezeichnen, also auch gewisse Röhrenschaltungen und die von mir seinerzeit entwickelten Schaltglieder. Auch die Transistoren fallen unter den Begriff des Relais, wenn man sie als steuerbare Schalter betrachtet.

Dieses konstruktive Problem äußert sich auch beim Speicherproblem. Da hat man allerdings noch andere Möglichkeiten und ist nicht allein auf das Relaisprinzip angewiesen. Aber wenn man das ideale Kleinrelais hätte, welches wenig Raum einnimmt, so könnte man auch damit jedes Speicherproblem lösen. Durch die unzureichenden Relaistechniken war man gezwungen, andere Techniken zu verwenden, wie z.B. Trommelspeicher oder Quecksilberröhren usw., weil man nur so in

der Lage war, große Mengen von Werten auf kleinem Raum zu konzentrieren.

b) Programmsteuerung: Die Programmsteuerung ist in den letzten Jahren zu hoher Vollkommenheit entwickelt worden. Die ersten Geräte, die wir in Deutschland hatten, waren solche mit fest ablaufenden Programmen, d.h. es fehlten ihnen die sogenannten "bedingten Befehle" oder, wie schon erwähnt wurde, das "Order the Orders". Diese waren in den Geräten nicht eingebaut aus ganz bestimmten Gründen, deren Erläuterung hier zu weit führen würde. Ein solches Gerät war z.B. während des Krieges bei den Henschel-Flugzeugwerken in Betrieb zur Flügelvermessung. Da handelte es sich überhaupt nur um feste Programme. Die anderen von der Luftfahrtindustrie vorgelegten Probleme ließen sich auch mit festen Programmen behandeln, so daß die Notwendigkeit noch nicht bestand, ein Gerät mit beweglicher Programmierung zu bauen.

Die amerikanischen Geräte haben einen sehr komplizierten Code. Die Befehle müssen zuerst sehr kompliziert verschlüsselt werden, ehe sie in das Gerät gegeben werden können. Bei den Entwicklungen, die in Deutschland liefen, wäre das nicht möglich gewesen, weil sie für den praktischen Ingenieur bestimmt waren. Der Ingenieur will schnell seine Formeln wechseln. Es war ins Auge gefaßt, Formeln nur zwei- bis dreimal durchzurechnen. Da kann man nicht eine komplizierte Vercodung vorausschicken, sondern die Maschine muß so gebaut werden, daß das Aufsetzen eines Programmes schnell und flüssig vonstatten geht. Dieses ist bis zu einem gewissen Grad in der Z 4 erreicht. Das ist auch ein Grund, warum Prof. Stiefel gerade diese Maschine wählte. Es freut mich, daß man in Göttingen jetzt einen ähnlichen Weg gegangen ist; auch bei der Göttinger Maschine G 1 ist die Programmfertigung denkbar einfach, so daß auch ihre Bedienung sehr schnell erlernt werden kann.

Es wurden in Deutschland während des Krieges ab 1944 auch schon Geräte geplant, die nur der Programmfertigung dienen sollten, d.h. solche Geräte, die den eigentlichen Rechengeräten vorgeschaltet werden. In das Programmfertigungsgerät tastet der Mathematiker sein Problem zunächst als Formel ein. Die Maschine übersetzt dann diese Formeln auf einen Kommandostreifen, und dieser geht dann erst in das Rechengerät. Diese Entwicklung wollen wir in Kürze wieder aufnehmen. Es gelang, einen Kredit dafür frei zu bekommen, um ein solches Programmfertigungsgerät, den "Programmator", zu entwickeln, der in Kürze eingesetzt werden kann.

§ 4. Spezialgeräte

Wir haben uns die Aufgabe gestellt, Geräte zu bauen, die für den praktischen Einsatz in der Industrie bestimmt sind. Es ist uns gelungen, in eine Größenklasse des Preises zu treten, die wesentlich unter denen liegt, die im Ausland bei großen Geräten üblich sind. Unsere Geräte liegen immerhin in der Größenordnung einiger Hunderttausend, die Leitz-Maschine beispielsweise bei 2oo ooo; der Ausbau auf ein voll leistungsfähiges Gerät wird vielleicht auf 3 - 4oo ooo kommen.

Es ist aber in Deutschland leider so, daß auch diese Summen für viele Stellen noch nicht erschwinglich sind. Es wird an uns immer wieder die Frage gestellt: Können Sie uns nicht ein Spezialgerät bauen, welches möglichst weniger als 1oo ooo DM kostet? Diese Frage ist immer schwer zu beantworten, denn der Begriff "Spezialgerät" ist nicht einfach

zu formulieren. Ein Spezialgerät muß verschiedene Bedingungen erfüllen: 1.) Es darf nur ein bestimmter Formelkreis auf dem Gerät gerechnet werden, 2.) die Forderungen auf Genauigkeit dürfen nicht zu hoch sein, 3.) es muß möglich sein, mit festem Komma zu arbeiten, 4.) die Anforderungen auf Geschwindigkeit dürfen nicht zu hoch sein. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, ist es unter Umständen möglich, ein Spezialgerät zu bauen.

Das erwähnte Gerät bei den Henschel-Flugzeugwerken war ein solches Spezialgerät. Es handelte sich um folgendes Problem: Es wurde eine der damals üblichen, modernen fliegenden Bomben gebaut. Diese hatten einen aus Blech gebauten Flügel, der Beulen und Bauungenauigkeiten hatte. Die Bombe sollte aber sehr genau fliegen. Man brachte etwa 2oo Meßpunkte auf dem Flügel an, multiplizierte jeden Meßwert mit einer Einflußzahl und kombinierte das in ganz bestimmter Weise. Auch das Leitwerk wurde so vermessen. Dann erhielt man 3 resultierende Werte. Es wurden bestimmte Verstellungen am Leitwerk vorgenommen, so daß die Flügelungenauigkeiten wieder herausgerechnet wurden. Für den Zweck wurde diese erste programmgesteuerte Rechenmaschine eingesetzt, die überhaupt in einem Industriewerk in Betrieb war. Es handelt sich um die Rechenmaschine innerhalb eines Kontrollsystems. Das war eine Aufgabe, die nur beschränkte Genauigkeit verlangte. Auch sollten mit ihr nur wenige zwar lange aber einfach gebaute Formeln durchgerechnet werden. Wir konnten das Gerät mit etwa 4oo Relais bauen. Später wurde ein ähnliches Gerät geliefert, bei dem die Meßwerte direkt dual auf das Gerät übertragen wurden. Dieses Gerät ist leider nicht mehr zum Einsatz gekommen.

Das Problem der Spezialmaschine hat uns auch in neuerer Zeit sehr ernst beschäftigt. Wir kommen immer wieder zu dem Schluß, daß ein wirklich gutes Gerät, welches verhältnismäßig universell einsetzbar ist und verschiedenen Aufgaben dienen soll, nicht als Spezialgerät zu bauen ist. Es fängt meistens so an, daß uns die Herren einige Probleme geben und uns sagen: Die Maschine soll nur diese Formeln rechnen. Später heißt es dann: Sie soll aber noch das machen, und dieses wäre auch ganz nett. Schließlich hat man dann doch eine universelle, große Maschine. Deshalb haben wir schon bei dem Gerät Z 5 einen Kompromiß gemacht. Es hieß zunächst: Sie soll nur die optischen Rechnungen durchführen, d.h. es sollen in irgendeinem Linsensystem Tausende von Lichtstrahlen durchgerechnet werden. Es gelingt, diese Aufgabe unter Eliminierung der trigonometrischen Funktionen durchzuführen, d.h. nur mit Dreiecksansätzen, Wurzelziehen, usw. So waren an sich diese Voraussetzungen für eine Spezialmaschine gegeben. Aber trotzdem waren die Formeln noch verhältnismäßig kompliziert. Die Maschine sollte auch verhältnismäßig schnell sein und die Genauigkeit von immerhin 7 bis 8 Dezimalen haben, so daß also eine wirkliche Spezialmaschine dabei nicht entstand. Wir haben uns schließlich gesagt: Wir bauen eine Maschine, die zunächst für die Zwecke der Optik ausgelegt ist, die aber so angelegt ist, daß sie später zu einer verhältnismäßig universellen Maschine ausgebaut werden kann. Die Maschine wird zunächst geliefert für einen beschränkten Problemkreis. Das zeigt sich z.B. daran, daß sie zunächst nur 12 Speicherzellen hat, was für heutige Verhältnisse sehr bescheiden ist. Aber für die optischen Rechnungen genügt das fürs erste. Man wird dann für das erste Jahr die Maschine für diesen Zweck gebrauchen können. In dieser Zeit hoffen wir, ein größeres Speicherwerk nachliefern zu können.

§ 5. Der Funktionsschrittrechner

Ein Problem, mit dem wir uns auf Anregung von Prof. Dr. H. Cremer, Aachen, befaßt haben, ist die Frage, ob es nicht möglich ist, beispielsweise für einfache Differentialgleichungen, ein Gerät zu bauen, welches Überschlagsrechnungen numerisch in verhältnismäßig kurzer Zeit löst. Diese Aufgabe ist lösbar, sobald man die Forderung hoher Genauigkeit fallen läßt, d.h. sobald man sich mit Rechenschiebergenauigkeit begnügt. Es ist bekannt, daß die meisten Probleme des praktischen Ingenieurs mit dem Rechenschieber gerechnet werden können. Wir dachten eine Maschine in der Größenordnung von 3 oder 4 Dezimalen zu bauen, so daß wir bestimmt in der Rechenschiebergenauigkeit liegen, die etwa bei 3 Dezimalen liegt. Ferner müßte man das gleitende Komma fallen lassen, d.h. man müßte sich die Größenordnung der Zahlen vor der Rechnung überlegen. Das ist bei jedem Integrationsgerät erforderlich und erhöht die Vorbereitungszeit erheblich. Aber es gibt eine Reihe von Problemen, wo das ohne weiteres tragbar ist. Unter diesen Bedingungen ist es möglich, ein Gerät zu entwickeln, welches gewissermaßen die Minimalform der programmgesteuerten Rechenmaschine darstellt. Ich möchte es den "Funktionsschrittrechner" nennen.

Die Maschine soll aus einem einfachen Rechenwerk, welches nur addiert und multipliziert in kleinem Bereich, einem einfachen Programmwerk und einem Speicherwerk bestehen. Das Speicherwerk soll Zahlen aufnehmen wie bei jeder anderen programmgesteuerten Maschine, mit dem Unterschied, daß ich zu jedem Funktionswert seinen Differenzwert speichere. Wenn ich z.B. die Operation A + B kommandiere, so wird nicht, wie bei einer normalen programmgesteuerten Maschine, A herausgegriffen und B und beides addiert, sondern man hat bereits einen Laufwert A + B, der am Anfang eingegeben werden muß, der aus dem vorigen Rechenzyklus stammt; das ist ein Zwischenwert, der auf irgendeiner Zelle steht. Den greift man sich heraus und findet aus den Werten A, B, ΔA, ΔB den Wert ΔC, wenn A + B = C ist. Ich kann für jede Rechenoperation entsprechende Operatoren aufschreiben, die mir aus diesen Werten die Lösung geben. Für die Multiplikation z.B. müßte man lösen $A \cdot \Delta B + B \cdot \Delta A = \Delta C$. Das ist das gleiche Verfahren, welches auch Integrationsgeräte benutzen. Man baut das Gerät so, daß es diese Operationen automatisch durchführt. Das Gerät bekommt also nicht die Einzeloperation kommandiert, sondern von dem Kommandostreifen lediglich die Aufgabe "Multiplikation". Ein Leitwerk vollzieht die Auflösung in die einzelnen Teile. Im Rechenwerk muß addiert und multipliziert werden. Aber es braucht nur zu multiplizieren mit einem Δ-Wert, der einen kleinen Stellenbereich hat, so daß ich ein kleines Multiplikationsgerät einbauen kann mit einem kleinen Stellenbereich. Dadurch wird das gesamte Rechenwerk verhältnismäßig einfach. Wir haben verschiedene Proberechnungen durchgeführt von verschiedenen Differentialgleichungen, Drei-Körper-Problem, usw. und sind zu recht befriedigenden Ergebnissen gekommen. Ich glaube also, daß hier ein Gerät zu einem mäßigen Preis gebaut werden könnte.

§ 6. Entwicklungstendenzen

Die Rechengeräteentwicklung, wie sie auf der ganzen Welt jetzt eingesetzt hat, kam zunächst nicht aus den Kreisen der eigentlichen Rechenmaschinenindustrie. Es waren Institute, im allgemeinen Außenseiter, die sich mit diesem Problem befaßten. Und es war nicht die Rechenmaschinenindustrie selbst, die diese Aufgaben gefördert hat. Es hat sich aber gezeigt, daß die Gedanken, die dabei entwickelt wurden, doch erhebliche Rückwirkungen auf die konventionelle Rechenmaschine haben. Es hat eine sehr intensive Entwicklung auf diesem Gebiet eingesetzt. Ich glaube, es ist noch sehr vieles hinter den Kulissen; es ist noch wenig herausgekommen, weil diese Entwicklungen sehr sorgfältig geführt werden müssen. Hier ist es noch viel mehr notwendig als sonst, daß alles bis ins Letzte durchentwickelt wird. Soll z.B. ein serienmäßiges Gerät für kaufmännische Zwecke eingesetzt werden, vor welche ungeheueren Aufgaben ist eine Firma organisatorisch schon gestellt, wenn sie solche Geräte herausbringen will. Am weitesten ist die Lochkartenindustrie, die diese Entwicklungen für das sogenannte Rechenlocher-Problem aufgegriffen hat, d.h. das Problem, aus einer Karte Werte herauszugreifen, mit diesen Operationen durchzuführen, und die Ergebnisse wieder in die Karte einzulochen. Es beginnen sich jedoch erst allmählich marktfähige Geräte dieser Art durchzusetzen.

Ich möchte hier in diesem Zusammenhang noch einiges zu den Vorteilen des dualen und dezimalen Zahlensystems sagen. Vorhin betonte ich schon, daß das Dualsystem nur bei programmgesteuerten Maschinen einen Sinn hat. Für einfache Tischrechenmaschinen hat das Dualsystem wenig Zweck. Allerdings hat sich durch die sogenannte Zigeunermultiplikation schon ein duales Rechenverfahren hinten herum eingeschlichen, denn es wird ja nichts anderes getan, als eine Zahl in das Dualsystem übersetzt und dann mit der anderen multipliziert. Es gibt noch einige weitere Möglichkeiten, solche gemischten Verfahren einzuführen.

Das reine Dualsystem hat im kaufmännischen Rechnen gewisse prinzipielle Grenzen, die bei dem Problem der Abrundung liegen. Der Kaufmann muß seine Abrechnung auf den Pfennig genau haben. Wenn er dividiert, kann er den dualen Bruch zwar in einen dezimalen Bruch zurückübertragen, aber die Abrundung ist dezimal anders als dual. Kein Buchhalter hat es gerne, wenn hinterher in seinen Millionenbeträgen ein einzelner Pfennig nicht stimmt. Dem Ingenieur macht es nichts aus, wenn bei 1 000 000 kg hinterher 10 g fehlen. Hier liegen versteckt noch einige Probleme, die der Grund sind, warum man das reine Dualsystem noch nicht für die kaufmännische Rechnung einsetzen kann.

Es ist auch noch keine Lochkartenindustrie dazu übergegangen, etwa duale Lochkarten einzuführen. Das wäre wirtschaftlicher, denn man könnte auf dem gleichen Raum wesentlich mehr Zahlen unterbringen. Aber die ganze Umstellung wäre so umfangreich, daß man die Kosten scheut, diese zu vollziehen.

§ 7. Mathematische Rückwirkungen

Im Zusammenhang mit der gesamten programmgesteuerten Rechengeräteentwicklung ist die Disziplin der Logistik in den Vordergrund getreten; es wird nur nicht immer gesagt. Oft ist man sich dessen sogar noch nicht bewußt. Hier kann vielleicht eine Entwicklung einsetzen, so daß eine Disziplin, die man bisher noch als "abgewandte"Mathematik bezeichnen kann, nämlich die Logistik, weil sie den Problemen völlig fernstand im Gegensatz zur "angewandten" Mathematik, doch zu gewissen praktischen Anwendungen kommt, und nun auf Verwaltungsprobleme im allgemeinsten Sinne Einfluß nehmen wird. Diese Entwicklung dauert selbstverständlich erhebliche Zeit.

Gewisse Entwicklungstendenzen moderner programmgesteuerter Maschinen sind mir nicht sehr sympathisch. Das sind diejenigen, die darauf ausgehen, das mit einem ungeheueren Zahlenmaterial zu erdrücken, was die Mathematiker an feinen Methoden entwickelt haben. Ich glaube, daß insbesondere die Entwicklung in Richtung der Logistik den Mathematikern wieder das nötige Vorrecht geben wird.

D i s k u s s i o n s b e m e r k u n g :
(Prof. Dr. - Ing. W. Müller, Aachen,
Direktor des Verkehrswissenschaftlichen Instituts)

Es dürfte interessieren, daß auch die Bundesbahn die Absicht hat, einen Analogierechner auf der Ablaufanlage des Rangierbahnhofes Gremberg Süd einzubauen, um einerseits die Leistungsfähigkeit der Zugzerlegung zu erhöhen und andererseits das Bedienungspersonal und die Wagenbeschädigungen zu vermindern.

Die einfahrenden Güterzüge werden über einen Ablaufberg gedrückt und die dort entkuppelten Wagen laufen durch Schwerkraft eine Steilrampe herab, an deren Fuß eine Gleisbremse liegt. In letzterer werden die Wagen, die verschiedene Laufeigenschaften und verschiedene Laufweiten in den Richtungsgleisen haben, so gebremst, daß 1. zwischen zwei ablaufenden Wagen eine Weiche, die die Fahrwege trennt, umgestellt werden kann, und daß 2. die Wagen so weit laufen, daß sie nicht auf die bereits stehenden Wagen aufprallen, noch in zu großem Abstand von diesen zum Halten kommen. Im ersteren Falle entstehen Wagenbeschädigungen, im letzteren Falle werden die Gleise schlecht ausgenutzt. Diese Gleisbremse wird bisher gefühlsmäßig mit Hand gesteuert.

Die Einlaufgeschwindigkeit in die Bremse gibt ein zuverlässiges Maß für die Laufeigenschaften eines Wagens. In der Bremse werden die Geschwindigkeiten der Wagen durch Schwebungsfrequenzmessungen bestimmt und als elektrische Spannung dem Analogierechner zugeführt. Die jeweilige Laufweite wird selbsttätig einer Gleisfüllungsmeldung entnommen. Damit liegen alle Werte zur Ermittlung der Auflaufgeschwindigkeit aus der Bremse, für die eine Gleichung aufgestellt wurde, durch den Analogierechner fest.

Der Analogierechner ermittelt die Auslaufgeschwindigkeit in weniger als einer Sekunde. Stimmt die kontinuierlich gemessene Geschwindigkeit des Wagens in der Bremse mit der Sollgeschwindigkeit, die der Analogierechner festgestellt hat, überein, dann geht der Löseimpuls auf das Steuergerät für die Bremse. Die Bremse öffnet sich und der Wagen läuft in die Zielstrecke ein. Durch diese Anlage wird die Leistung eines Ablaufberges von 4500 auf 6000 Wagen gesteigert.

F r a g e :
Besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse beim Integromat ziffernmäßig festzuhalten?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
Ja. Wir haben vor, Resultate als Lochkombination auf einem Lochstreifen niederzulegen. Das wäre sozusagen in der Sprache der Maschine gesprochen und hätte den Vorteil, daß wir Resultate, die auf diese Weise auf dem Lochstreifen deponiert sind, später wieder verwenden können, indem wir den Streifen zur Modulation einer Impulsfolge einführen.

F r a g e : (Prof. Dr. Walther)
Wie erfolgt die Eingabe empirischer Funktionen beim Integromat?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
Wir lochen auf Grund einer vorliegenden Tabelle oder Kurve den Lochstreifen.

F r a g e : (Prof. Dr. Cremer)
Wie wird im Integromat multipliziert?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
An sich kommt man bei Integrieranlagen mehr und mehr vom Multiplizieren ab, d.h. man schafft nicht besondere Multi-

pliziergeräte, sondern nutzt im allgemeinen die Möglichkeiten aus, die schon in einer Integrieranlage stecken, die mit Integratoren, Summentrieben und Funktionstrieben versehen ist, Man verfährt z.B. so: Es sei gegeben $y''+a_1(x)\ y'+a_2(x)\ y = 0$. Man integriert einmal nach x, findet $y'+\int a_1(x)\ y'dx + \int a_2(x)\ y\ dx = \text{const.}$ und baut danach eine Schaltung für die Integrieranlage zusammen. Im zweiten Term ist $\int a_1(x)\ y'dx = \int a_1(x)\ dy$, d.h. das Produkt verschwindet formal, wir haben ein Integral $\int a_1(x)dy$ zu bilden. Im dritten Term fassen wir $a_2(x)dx$ zu $dA_2(x)$ mit $A_2(x) = \int a_2(t)\ dt$ zusammen, so daß $\int a_2(x)\ ydx = \int y\ dA_2(x)$ wird. Ein solches Integral kann man sich auch bei empirischen Funktionen vor Beginn der Arbeit verschaffen, wenn man die Hilfsmittel der Integrieranlage für diesen Zweck ausnutzt. So kommen jetzt in der Gleichung keine Produkte mehr vor, sondern es sind nur noch Integrationen auszuführen.
Das ist ein typisches Beispiel, an dem Sie erkennen, warum wir danach getrachtet haben, uns mit der Integrationsvariablen nicht an die Zeit zu binden. Hier ist einmal y die Integrationsvariable und einmal $A_2(x)$. Mit dem Kondensator wäre dergleichen nicht möglich, beide müßten zeitproportional sein, und man kann von vornherein nicht wissen, ob das so ist; im allgemeinen wird das nicht der Fall sein.

F r a g e : (Prof. Dr. Meixner)
1. Wie lange braucht der Integromat zur Lösung eines Problems?
2. Wie lange dauert die Vorbereitung des Programms für den Integromat?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
Zu 1: Der Integromat ist, was Maßstäbe und Übersetzungsverhältnisse angeht, der Integrieranlage Göttingen ange-

paßt. Er ist so beschaffen, daß man bei einfacheren Problemen in 2 Minuten, bei größeren Problemen in 5 - lo Minuten ein partikuläres Integral zieht.
Zu 2: Die Frage nach der Vorbereitung läßt sich nur individuell von der Gleichung aus gesehen, beantworten. Dazu gehört auch eine gewisse Erfahrung. Im allgemeinen besteht eine Art sinnfälligen Zusammenhangs zwischen den topologischen Schaltungen einer Integrieranlage und der Differentialgleichung an sich. Jedenfalls ist es nach meiner Meinung einfacher, ein Problem für eine Integrieranlage aufzubereiten als für eine programmgesteuerte Ziffernmaschine. Die Vorbereitungszeiten verhalten sich hier wie 1:lo, so möchte ich vorsichtig vermuten.

F r a g e :
Ist der Integromat eine versteckte Ziffernmaschine?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
Man kann den Integromat nicht als Ziffernmaschine bezeichnen; er ist aber auch keine Integrieranlage reinen Typs. Er steht etwa in der Mitte zwischen beiden Typen. Er hat aber, das hoffe ich doch, den wesentlichen Vorteil, den Integrieranlagen im allgemeinen bieten, nämlich: kurze Vorbereitungszeiten im Vergleich mit programmgesteuerten Maschinen. Und bei vielen Ingenieurproblemen - dafür ist eben der Integromat gedacht -, bei denen es oft nicht darauf ankommt, genau zu wissen, wie die Lösung aussieht, sondern ein halbes Dutzend Parameter, über die man in optimaler Weise verfügen möchte, zu diskutieren, hilft eine Integrieranlage nach allen bisherigen Erfahrungen immer noch in sehr befriedigender und ausreichender Weise. Deshalb war es unsere Absicht, das Integrieranlagenprinzip, das die Diskussion von Differentialgleichungen mit vielen Parametern in einfacher Weise ermöglicht und das vor allem kurze Vorbereitungszeiten zuläßt, einmal in neuer Weise

zu verwirklichen. Daß wir das nun schließlich durch Impulse gemacht haben, rührt nur von dem Wunsche her, Funktionen auf möglichst einfache Weise darzustellen.
Man könnte diesen Weg an sich noch weiter gehen und sich überlegen. ob man der Maschine noch mehr Attribute der programmgesteuerten Maschine zulegen will. In der Tat verspreche ich mir noch viel davon, in das Grenzgebiet zwischen Integrieranlagen und programmgesteuerten Maschinen hinein zu gehen, beispielsweise nicht mit Impulsfolgen, die nur lo Stufen entsprechen und verhältnismäßig langsam ankommen, sondern mit Impulsfolgen von etwa 10^6 Hz.

F r a g e :
Wie groß sind die Fehler beim Integromat?

A n t w o r t : (Dr. Bückner)
Beim Integromat streben wir einen Fehler von 1:loo, d.h. einen absoluten Fehler 1 auf loo Einheiten je Integrator an. Es wird vielleicht auch möglich sein, auf 1:2oo oder 1:3oo zu gehen; wir wollen aber nicht zu weit gehen. Bei der Integrieranlage für Bonn ist der Integrator gezüchtet auf einen Fehler von o,1‰. Der Unterschied zum Integromat besteht nun nicht nur in der Genauigkeit, sondern auch in Folgendem: Wenn Sie komplizierte Schaltungen zusammenbauen, häufen sich die Fehler. Damit muß man rechnen. Wenn man also sehr komplizierte Probleme, wie sie an der Hochschule auftreten, mit größerer Genauigkeit bearbeiten will, als das industriell erforderlich ist, muß man auch dem einzelnen Integrator eine wesentlich höhere Genauigkeit geben, damit bei der Häufung von Fehlern hinterher immer noch ein vernünftiges Resultat herauskommt, Bei vielen Ingenieurproblemen ist das nicht in diesem Maße erforderlich.

F r a g e :
Warum brauchen Sie bei der Wetterberechnung kaum Speicher? Das ist unverständlich. Sie müssen doch von Situation zu Situation die Werte jeweils festhalten!

A n t w o r t : (Dr. Weyl)
Nein! Es ist eben so, daß man nicht die einzelnen Werte festhält, sondern nur die Koeffizienten, mit denen die etwa ersten zehn harmonischen Polynome eingehen in die analytischen Vorbedingungen. Es ist nicht die einzelne Wetterstation, das kann ich gar nicht. Da gibt es die berühmte Courant-Levische Bedingung: Die Wetterstationen liegen zu weit auseinander, als daß ich darüber integrieren könnte. Darum wird es so gemacht, daß die Wetterberichte von den Stationen zeitlich rasch aufeinander folgen, so daß das an einzelnen Stellen der zweiten Ableitung noch angepaßt werden kann. Diese Daten werden dazu benutzt, eine Approximation zu berechnen, sagen wir die ersten lo harmonischen Polynome auf der Kugel.

F r a g e :
Wie erfolgt die Programmleitung?

A n t w o r t : (Dr. Weyl)
Die Programmleitung erfolgt in den elektronischen Maschinen so, daß die Instruktionen auch in den Speicher eingegeben werden. Ein ganz einfaches System ist z.B. das folgende: Jede einzelne Instruktion enthält vier Adressen:

1. Die beiden Adressen der Operanden,
2. die Adresse der Speicherstelle, wo das Resultat hinkommt,
3. die Adresse der Speicherstelle, wo der nächste Befehl steht.

F r a g e :
Welches sind die Hauptfehlerquellen bei den Göttinger Maschinen?

A n t w o r t : (Prof. Dr. Biermann)
Etwa alle 6 - lo Stunden trat ein Fehler auf, und zwar seltener in der Elektronik (Durchbrennen von Röhren) als in der Mechanik (Lochstreifensender). Auch die Relais waren meist zuverlässig.

Zwischenbemerkung: (Dr. Weyl)

Ich möchte dazu bemerken: Das Problem der Gl ist sozusagen das Problem der Minimalmaschine. Das ist wirklich interessant, und es hat mich sehr gefreut zu sehen, was für eine elegante Lösung dafür in Göttingen gefunden worden ist. Sie hat auch ihre Parallele; das ist die Maschine, die von Prof. A. D. Booth in London entwickelt worden ist, eine Magnettrommel - Dualbruch-Maschine ungefähr mit der gleichen Anzahl von Röhren (5oo-1ooo), gleicher Größe der Trommel und ungefähr gleichen Befehlen, also auch diese Ein-Adress-Chiffrierung. Davon existiert ein Exemplar in London; ein Chassis mit Trommel ist von Booth an die Norweger verkauft worden zu einem Preis von 2ooo Pfund, das sind etwa 20 ooo DM.

F r a g e : (Prof. Dr. Cremer)
Nach meiner Ansicht ist die Betriebssicherheit bei den Rechengeräten wichtiger als die Schnelligkeit. Ist das der Grund weshalb Sie, Herr Zuse, am mechanischen Speicher festhalten? Sie könnten ja ebenso einen anderen nehmen für Ihre Maschine!

A n t w o r t : (Dipl. Ing. K. Zuse)
Es ist so, daß der mechanische Speicher ein sehr zuverlässiges Element darstellt. Und zwar aus den Gründen, die jede mechanische Konstruktion hat. Das Prinzip ist

ziemlich einfach. Die Speicherung geschieht dadurch, daß für eine bestimmte Dualziffer oder ein bestimmtes Vorzeichen ein kleiner Stift links oder rechts von einer Nase liegt. Das läßt sich erst dann gut bauen, wenn man eine Serie auflegen kann, weil die Werkzeuge teuer sind. Aber der Hauptgrund ist die Betriebssicherheit.