

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 135 (1955)

Artikel: Elektronische Rechenautomaten als Beispiel zur allgemeinen Kybernetik

Autor: Stiefel, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90504>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Elektronische Rechenautomaten als Beispiel zur allgemeinen Kybernetik

Von

Prof. E. STIEFEL

Institut für angewandte Mathematik der ETH

Wenn jemand an einer Straßenecke ein Zwanzigrappenstück in einen Automaten wirft, um eine gewünschte Ware in Empfang zu nehmen, so denkt er wohl kaum daran, daß er damit den primitivsten Vertreter einer Entwicklungsreihe vor sich hat, die weiter über automatische Telephonzentralen, automatische Piloten von Flugzeugen und moderne elektronische Rechenmaschinen vielleicht hinauf bis zu den lebenden Organismen führt. Alle diese Einrichtungen tragen folgende gemeinsame Züge:

Auf einen äußern Reiz her, genannt Eingang oder *input* (Einwerfen des Geldstücks), wird eine Kette von mechanischen, elektrischen oder physiologischen Vorgängen ausgelöst, die ohne Beeinflußbarkeit von außen abläuft und nach einem gewissen Zeitverzug zu einem Resultat, dem Ausgang oder *output*, führt. Derselbe Automat ist dabei oft verschiedener Abläufe fähig, von denen einer vorher durch ein *Programm* ausgewählt werden kann. Bei unserem Warenautomaten zum Beispiel kann der output wahlweise eine Tafel Schokolade oder eine Schachtel Zigaretten sein.

In struktureller Hinsicht besteht ein Automat aus vielen gleichartigen, aber einfachen Elementen. In einer Telephonzentrale finden wir viele identische elektrische Schalter (Relais, Schrittschalter) und in einem Lebewesen viele gleichgebaute Nervenzellen. Es genügt für uns, von Feinheiten abzusehen und anzunehmen, daß jedes dieser Elemente nur zwei Zustände annehmen kann, die wir mit 0 und 1 bezeichnen. Ein Schalter steht entweder auf «ein» (1) oder «aus» (0), ein Neuron, d. h. eine Nervenzelle gibt entweder einen Reiz ab (1) oder nicht (0). Das Abgeben eines Reizes durch ein Neuron bezeichnen wir auch als «feuern». Die Vielfalt der Programme, nach denen ein Automat ablaufen kann, ist einzig bedingt durch die große Zahl von Elementen und durch die Mannigfaltigkeit der zwischen ihnen herstellbaren Verbindungen, die durch mechanische Kupplungen und Getriebe, durch elektrische Drähte oder – im physiologischen Fall – durch Nerven realisiert sind.

Die ziemlich alte Wissenschaft vom Bau von Automaten wird neuerdings als Kybernetik oder Steuermannskunst bezeichnet. Hier finden wir Logistik, Mathematik, Elektronik und Servotechnik und schließlich Neurophysiologie bei der Zusammenarbeit. Wir könnten unsere Terminologie irgend einem dieser Wissensgebiete entlehnen. Wenn wir im folgenden eine physiologische Terminologie benutzen, so soll dies nicht die Vorstellung erwecken, daß die geschilderten Vorgänge, zum Beispiel im menschlichen Gehirn, wirklich so ablaufen. Die physiologische Sprache ist vielmehr ganz besonders konstruktiv und setzt die zweifellos vorhandene Analogie zwischen den Automatismen in Maschinen und in lebenden Organismen in Evidenz.

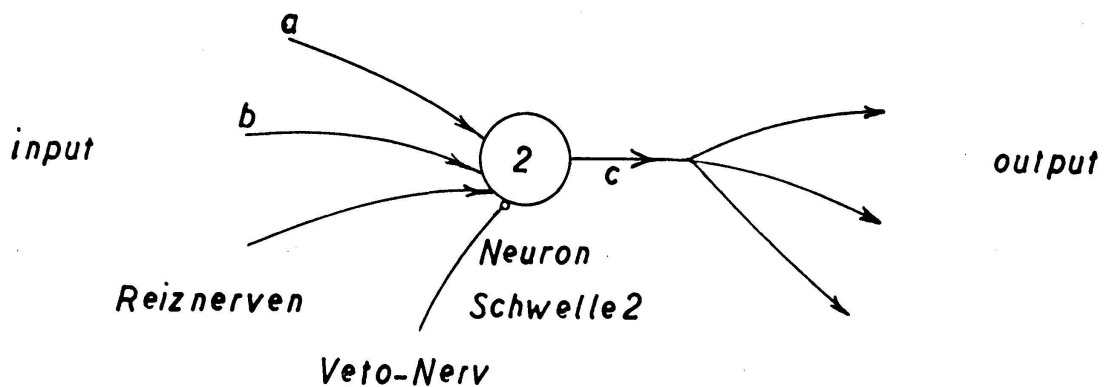


Fig. 1

In funktioneller Hinsicht soll unser Neuron folgendermaßen arbeiten (Fig. 1). Es wird in seiner Ruhe aufgeschreckt, wenn die ankommenden Nerven *a*, *b*, usw. Reize führen. Es soll nach einem Zeitverzug diesen Reiz in den output *c* weiterleiten, falls eine gewisse Reizschwelle erreicht oder überschritten wird. Um genauer erklären zu können, haben wir in Fig. 1 ein Neuron mit der Schwellenzahl 2 gezeichnet. Dieses Neuron feuert dann, und nur dann, wenn mindestens zwei der input-Nerven gleichzeitig reizen. Nehmen wir etwa an, daß die Nerven *a*, *b* Reize führen können, aber der dritte gezeichnete Nerv stillliegt, so kann also das Funktionieren des Neurons durch folgende Tabelle charakterisiert werden.

Input		Output
a	b	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Der Logistiker erkennt hier die logische Verknüpfung «und» des Aussagenkalküls. Im output tritt eben ein Impuls auf, wenn a und b Impulse führen. Ein Neuron mit der Schwellenzahl 1 entspricht der logischen Verknüpfung «oder». Allgemein feuert ein Neuron mit der Schwellenzahl n dann (und nur dann), wenn mindestens n ankommende Nerven reizen.

Das Neuron wird außerdem durch Vetonerven gesteuert, indem ein in einem Vetonerv eintreffender Reiz das Feuern des Neurons unter allen Umständen verhindert. Logisch ist dies natürlich einfach die Negation. Von einem hochgezüchteten Automaten werden wir nun verlangen müssen, daß erstens in seinen Nerven beliebig komplizierte Information weitergeleitet werden kann und daß zweitens aus den eben besprochenen elementaren Verknüpfungen von Informationen durch ein einzelnes Neuron sich beliebig komplizierte Verknüpfungen aufbauen lassen, also zum Beispiel die arithmetischen Operationen der Addition und Multiplikation.

Beim ersten Wunsch brauchen wir nicht zu verweilen. In der Tat ist es ja jedermann geläufig, daß eine gegebene Mitteilung in Morseschrift geschrieben werden kann, also mit Hilfe der beiden einzigen Zeichen «Punkt» und «Strich» ausdrückbar ist. Wir verwenden statt dessen hier unsere Zeichen 0 und 1. Zum Beispiel schreibt man die Dezimalzahlen von 0 bis 9 zweckmäßig folgendermaßen, jede als Gruppe von vier Zeichen (Tetrade). Man denke sich jedes Gewicht von 0 bis 9 kg zusammengesetzt mit Hilfe eines Satzes von vier Gewichtssteinen, die 1, 2, 4 und 8 kg wiegen. Dann erhält man folgende Tabelle.

	Gewichte					Gewichte			
	8	4	2	1		8	4	2	1
0	0	0	0	0	5	0	1	0	1
1	0	0	0	1	6	0	1	1	0
2	0	0	1	0	7	0	1	1	1
3	0	0	1	1	8	1	0	0	0
4	0	1	0	0	9	1	0	0	1

Zum Beispiel 7 setzt sich zusammen aus einem Einer, einem Zweier, einem Vierer und Null Achtern. Wie man sieht, kommt man mit den Zeichen 1 und 0 aus, je nachdem, ob der betreffende Gewichtsstein benutzt werden muß oder nicht. Dieses sogenannte Dualsystem ist besonders zweckmäßig, da man mit den Tetraden leicht rechnen kann.

Was den zweiten Wunsch – die Verarbeitung von Informationen – betrifft, so muß erwähnt werden, daß die Logistiker sehr genau untersucht haben, welche Resultate man aus gegebenen Größen rein durch öftere Anwendung der Grundverknüpfungen «und», «oder», «nein» bilden kann. Es handelt sich um den sogenannten Aussagenkalkül in der Ter-

minologie des bekannten Büchleins von HILBERT und ACKERMANN¹. Es liegt auf der Hand, daß die Gesamtheit der erreichbaren Resultate nur einen Teil dessen ausmacht, was wir vom menschlichen Denken her gewohnt sind. Zum Beispiel ist dem Automaten der Begriff des Kontinuums völlig fremd, er ist *ex definitione* diskret organisiert. (Ein Kontinuum ist zum Beispiel die Menge aller Punkte einer Strecke.) Oder, um es mathematisch auszudrücken, ein Automat kann mit 10stelligen Zahlen rechnen. Da jede Dezimale als Tetrade geschrieben wird, braucht man dann pro Zahl 40 Zeichen. Aber kein Automat kann mit beliebig viestelligen Zahlen rechnen. Jedes Rechenresultat ist daher mit Rundungsfehlern behaftet.

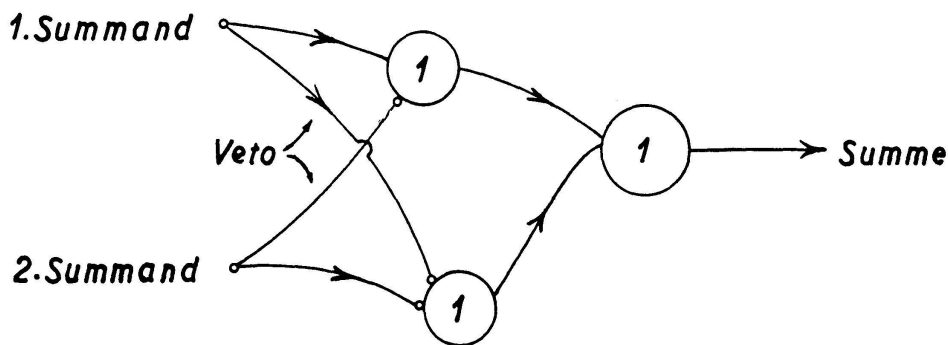


Fig. 2

Immerhin umfaßt die Gesamtheit der erreichbaren Resultate die elementare Arithmetik, wie nun gezeigt werden soll. Um zwei Tetraden zu addieren, benutzt man die geläufige Methode der schriftlichen Addition unter Beachtung der Regeln:

$0+0 = 0$, $0+1 = 1$, $1+0 = 1$, $1+1 = 0$ und Übertrag auf die vorhergehende Stelle.

Also etwa $4+5$	$\begin{array}{r} 4 = 0 \ 1 \ 0 \ 0 \\ 5 = 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\ \hline \end{array}$
Überträge	1
Resultat	$1 \ 0 \ 0 \ 1 = 9$
oder $2+7$	$\begin{array}{r} 2 = 0 \ 0 \ 1 \ 0 \\ 7 = 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\ \hline \end{array}$
Überträge	1 1
Resultat	$1 \ 0 \ 0 \ 1 = 9$

Um unseren Beweis zu Ende zu führen, müssen wir nur zeigen, daß die Additionsregeln durch Neuronen realisiert werden können. Figur 2 zeigt eine mögliche Schaltung, die aus drei Neuronen mit der Schwellenzahl eins besteht, wobei allerdings der Übertrag aus Gründen der Übersicht außer acht gelassen wurde. In der Tat: Ist etwa der obere Summand 1

¹ D. HILBERT, W. ACKERMANN: Grundzüge der theoretischen Logik, 2. Aufl. Berlin 1938.

und der untere 0, so feuert das obere Neuron, und sein auslaufender Reiz veranlaßt das rechte Neuron zum Feuern, so daß dessen output 1 wird ($0+1=1$). Sind aber beide Summanden 1, so verhindern die Vetonerven jede Tätigkeit ($1+1=0$). Sind endlich beide Summanden 0, so kommen überhaupt keine Reize an ($0+0=0$).

Um endlich Automaten zu bauen, müssen Neuronen durch mechanische oder elektrische Elemente realisiert werden. Eine naheliegende Möglichkeit ist die Doppeltriode, d. h. eine Elektronenröhre mit zwei Gittern. Die ankommenden Reize sind hier die Spannungen an den Gittern, welche den Anodenstrom als output steuern. Aber auch Kristalldioden und Transistoren lassen sich verwenden. Es ist wohl klar, daß die so geschaffene Technik äußerst flexibel ist, indem durch einfaches Zu-

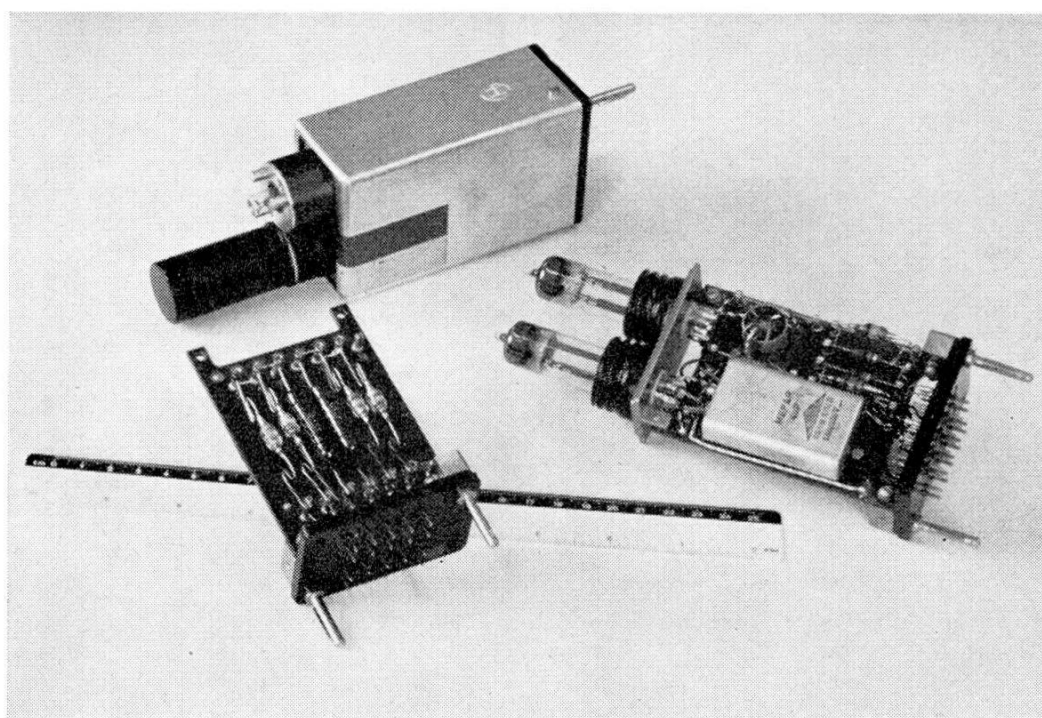


Fig. 3

sammenschalten von fertig fabrizierten Elementen Automaten für die verschiedensten Zwecke gebaut werden können.

In Figur 3 ist ein solches normalisiertes Element zu sehen, wie es im Rechenautomat ERMETH (elektronische Rechenmaschine der ETH) verwendet wird, der von den Ingenieuren unseres Instituts geplant und entworfen und von schweizerischen Firmen gebaut wurde. Er soll im Jahre 1956 anlaufen. Man erkennt die beiden Elektronenröhren und verschiedene Kristalldioden sowie Zusatzeinrichtungen, wie Widerstände und Kondensatoren.

Diese Elemente sind nun im Rechenautomaten zu größeren funktionellen Organismen zusammengefaßt. Figur 4 zeigt das *Rechenwerk* und das *Leitwerk*. Beide bestehen aus vielen derartiger normalisierter Elemente, die in Schränken angeordnet sind. Das Rechenwerk addiert,

multipliziert und dividiert elfstellige Zahlen, und zwar macht es etwa 200 Additionen pro Sekunde. Um das Leitwerk zu erklären, muß an den in der Einleitung eingeführten Begriff des Programms angeknüpft werden. Dies geschieht am besten, indem ein konkretes mathematisches Problem zugrunde gelegt wird. Es wurde uns vom Institut für physikalische Chemie der ETH die Aufgabe vorgelegt, die Funktion

$$E(x, y) = 2 - 4 \int_0^1 e^{-xt} \cos(yt) \cdot t \cdot dt$$

auszuwerten. Es handelt sich also um eine Funktion von zwei Variablen, d. h. zu jedem Wertepaar x, y gehört ein Funktionswert E .

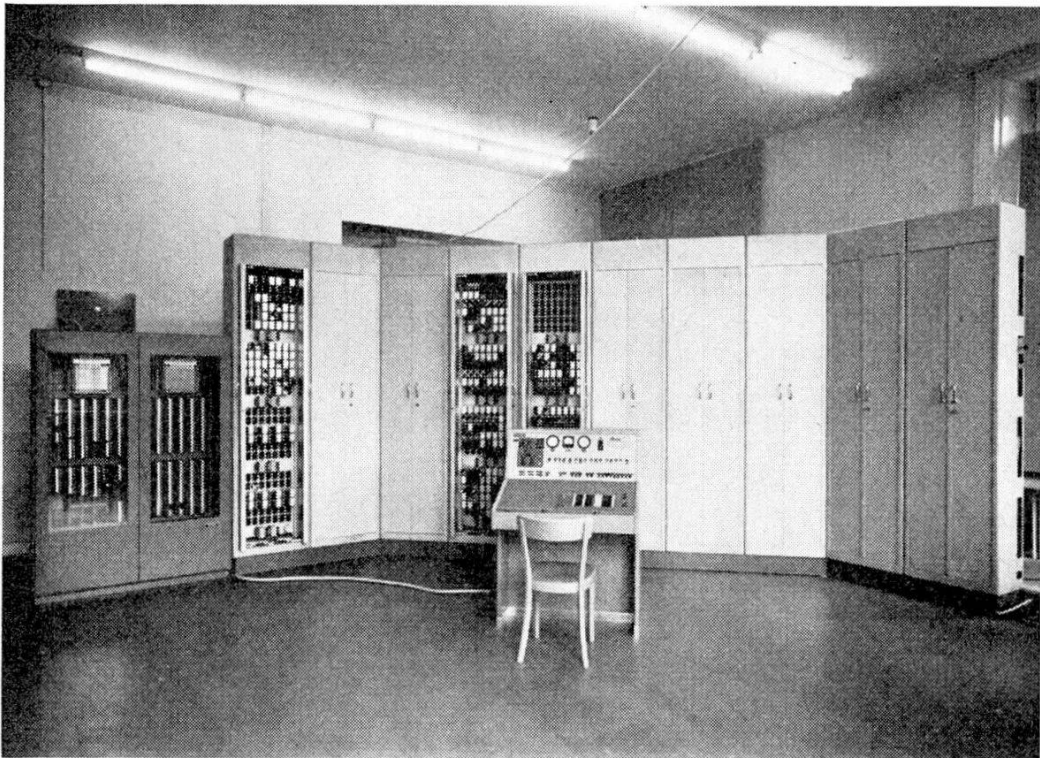
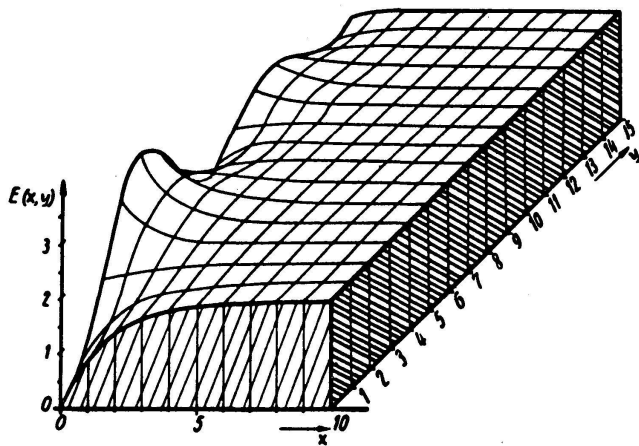


Fig. 4

Die Figur 5 zeigt das Resultat der Berechnung in einer Reliefdarstellung. Das Entscheidende ist, daß der Rechengang (nämlich die Berechnung des Integrals) für jede Wahl des Paares (x, y) derselbe ist. Dieser Rechengang wird vom Mathematiker festgelegt und auf einem Lochstreifen oder auf Lochkarten als Rechenprogramm festgehalten. Dabei wird die Integration natürlich durch eine Summation angenähert. Der Lochstreifen wird vom Leitwerk des Automaten abgetastet, und das Leitwerk veranlaßt bei jeder einzelnen Abtastung das Rechenwerk zur Ausführung der betreffenden arithmetischen Grundoperation. Das Rechenprogramm läuft nun so oft ab, wie Wertepaare x, y gegeben sind. Aus Figur 5 ergeben sich $10 \times 15 = 150$ Abläufe.

Diese Steuerung von Automaten durch Programme bietet nun ungeahnte Möglichkeiten, die sich durchaus nicht auf Rechenautomaten beschränken, sondern auch zur Steuerung irgendwelcher Arbeits- und Fabrikationsvorgänge verwendet werden können. Als Beispiel sei etwa der von Prof. WEBER an der ETH entwickelte Automat erwähnt, der zur Infusion von Flüssigkeiten in die Blutbahn eines Kranken dient. Um all dies näher auseinanderzusetzen, gehen wir wieder von unserem mathematischen Beispiel aus.

Unter dem Integral tritt ein Cosinus auf. Der Automat liest nun nicht etwa diesen Cosinus aus einer Tabelle ab, sondern er berechnet ihn auch. Zu diesem Zweck steht in einer Bibliothek von Programmen ein für allemal ein Programm zur Berechnung des Cosinus eines Winkels zur



$$E(x, y) = 2 - 4 \int_0^1 e^{-xt} \cos(yt) \cdot t \cdot dt$$

Fig. 5

Verfügung. Es wird als *Unterprogramm* in das *Hauptprogramm* (Auswertung des Integrals) eingefügt. Figur 6 illustriert diesen Vorgang an einem älteren Automaten, den wir in den letzten fünf Jahren betrieben haben. Im rechten Abtaster liegt das Hauptprogramm und im linken das Programm zur Berechnung des Cosinus. Das Hauptprogramm enthält an einer Stelle den Befehl an die Maschine, das Unterprogramm einzuschalten; in diesem Moment bleibt der rechte Streifen stehen, und der linke beginnt zu laufen.

Diese Organisation erlaubt es, der Maschine eine gewisse Handlungsfreiheit einzuräumen. Zum Beispiel kann bei den meisten mathematischen Problemen das Schlußresultat durch zwei verschiedene Rechenprozesse (Algorithmen) erreicht werden. Man gibt nun von vornherein beide Programme in den Automaten und läßt ihn etwa unter Benutzung des ersten Programms die Rechnung beginnen.

Es ist möglich, daß dabei eine Störung auftritt oder ein Rechenfehler durch die internen Kontrollen aufgedeckt wird. Automatisch springt dann die Maschine auf das zweite Programm, bei dessen Durchrechnung vielleicht alles glatt geht. Es ist also wichtig, festzuhalten, daß die Abläufe in einem Automaten nicht von vornherein eindeutig bestimmt zu sein brauchen, sie können vielmehr von den Erfahrungen abhängig gemacht werden, die der Automat selbst während seiner Tätigkeit macht. Wie ein Lebewesen kann er erkrankte Organe durch andere ersetzen. Man kann sogar sogenannte diagnostische Programme herstellen, die beim Durchrechnen das gestörte Element lokalisieren.

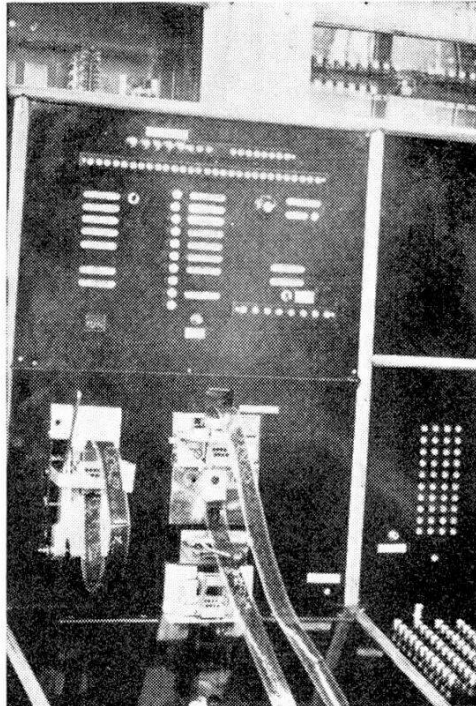


Fig. 6

Ein weiteres wichtiges Organ eines Automaten ist das *Speicherwerk* oder Gedächtnis. Die bei den einzelnen arithmetischen Operationen anfallenden Teilresultate müssen eben irgendwo protokolliert werden, um später der Rechnung wieder zugeführt zu werden. Man verwendet hier geläufige technische Methoden zur Speicherung von Information. Wie zum Beispiel Musik auf magnetischen Bändern aufgeschrieben und wieder zurückgespielt werden kann, so kann man auch Zahlen und Tetraden auf magnetischen Schichten festhalten. Gewöhnlich verwendet man schnell rotierende Trommeln mit magnetisierbarer Oberfläche.

Die Verwendbarkeit von Rechenautomaten für wissenschaftliche und technische mathematische Arbeiten ist praktisch unbegrenzt. Es sei nur ein Beispiel herausgegriffen (Abb. 7). Es handelt sich um eine automatisch gesteuerte Leitstrahlrakete und speziell um die Untersuchung der Stabilität dieser Steuerung. Es soll also festgestellt werden,

ob die Rakete nach Ausweichen aus dem Leitstrahl ruhig in ihn zurückgesteuert wird oder unruhig um ihn hin und her pendelt. Das Problem führt auf sechs Differentialgleichungen, die auf unserem alten Rechenautomaten gelöst wurden. In der Figur sind die Steuerausschläge als Funktion der Zeit aufgetragen, und man erkennt, wie sie abklingen. Das Beispiel öffnet interessante Perspektiven. Es hat nämlich ein erster Automat (der Rechenautomat) zur Schaffung des zweiten Automaten (Steuerautomaten) beigetragen. Sollen wir dies eine Fortpflanzungsfähigkeit nennen ?

Numerische Integration eines Systems

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ (x_1 =) \dot{x}_2 &= f_0 x_2 + f_1 x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ (\ddot{x}_3 =) \dot{x}_4 &= f_2 x_2 + f_3 x_3 + f_4 x_6 \\ \dot{x}_5 &= f_5 \cdot x_1 + f_6 x_2 + c_7 x_5 \\ \dot{x}_6 &= c_8 x_5 + c_9 \cdot x_6 \\ f_0 - f_6 &= \text{Funktionen von } t \\ c_7 \ c_8 \ c_9 &= \text{konst.} \\ \text{Anfangsbed.: } x_1(0) &= 50 \\ x_2 = x_3 = \dots = x_6 &= 0 \end{aligned}$$

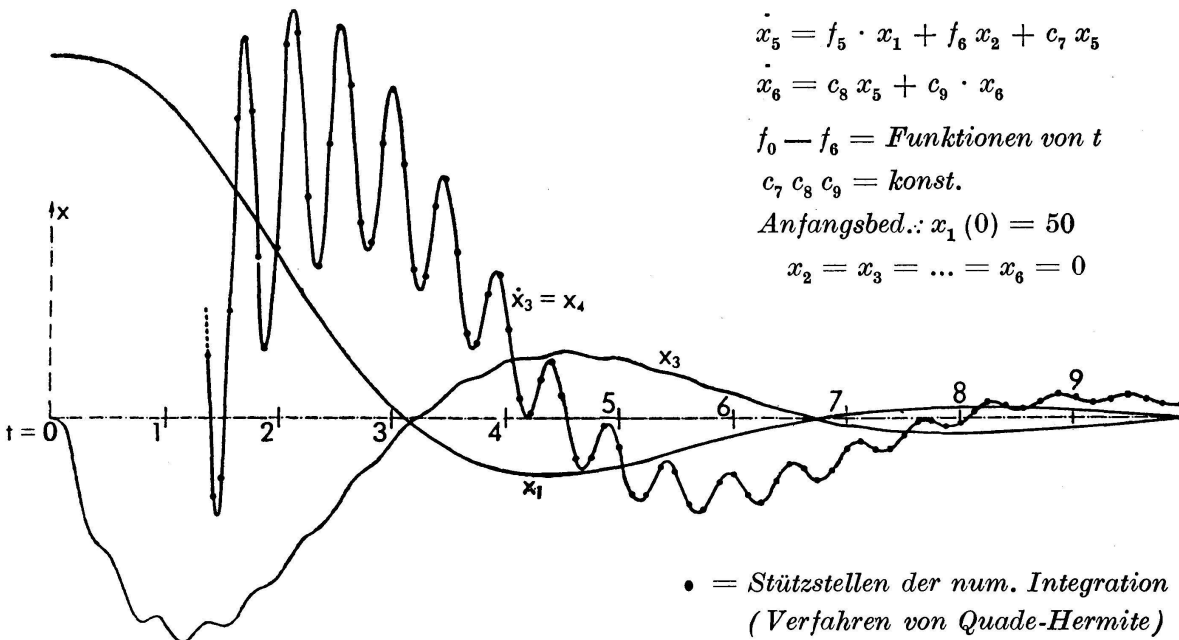


Fig. 7

Es seien nur noch ohne weitere Erklärung einige Anwendungsbeispiele aus unseren Archiven zitiert, die in unserem Institut in den letzten Jahren mathematisch bearbeitet, programmiert und automatisch durchgerechnet worden sind.

Lösung von algebraischen Gleichungen für Frequenzuntersuchungen im Molekülbau, Störungsrechnungen in der Himmelsmechanik (interessant im Hinblick auf die Astronautik); kritische Drehzahlen von rotierenden Wellen im Maschinenbau, Berechnung der elastischen Spannungen in Brücken, Tragflügeln und Talsperren, Flattern von Tragflügeln im Flugzeugbau, Flugbahnen von Geschossen.

Der Einsatz von Automaten hat rückwirkend auch die Methoden der Mathematik beeinflusst und damit auch der Mathematik neue For-

schungsgebiete eröffnet. Nur eine kleine Kostprobe dazu! Das Problem der Diffusion eines Gases durch eine halbdurchlässige Wand kann mit klassischen mathematischen Methoden so gelöst werden, daß man die sogenannte partielle Differentialgleichung der Wärmeleitung löst. Oft sind aber diese klassischen Methoden nicht die besten für den Automaten, sondern es ist geschickter, auf die eigentliche Wurzel des physikalischen Vorgangs zurückzugreifen, welche im vorliegenden Fall durch die kinetische Gastheorie gegeben ist. Man reproduziert also im Automaten die Stoßvorgänge der einzelnen Moleküle untereinander und mit der Wand unter Benutzung eines speziellen Organs, das Zufallszahlen erzeugt.

Was hier für Rechenmaschinen auseinandergesetzt wurde, ist typisch für die ganze Familie der Automaten. Ob bei den lebenden Organismen noch etwas wesentlich Neues hinzukommt – das wir eben Leben nennen – wagt der Kybernet nicht zu entscheiden. Es scheint nur im Zuge der fortschreitenden Technik der Automaten immer schwieriger zu werden, die Grenze zu ziehen, d. h. Merkmale anzugeben, die für das Leben charakteristisch sind. In der Tat haben wir ja unseren Automaten Fähigkeiten erteilen können, die dem gleichen, was wir etwa als Handlungsfreiheit, Entschlußfähigkeit, Selbsterhaltung und Fortpflanzung bezeichnen. Der naheliegende Einwand, daß ein Automat immer von einem höheren Wesen – nämlich vom menschlichen Gehirn – geschaffen wird, das alle seine Abläufe in ihren feinsten Variationen voraussieht, ist kaum stichhaltig. Denn offensichtlich verläßt man damit den Boden der Naturwissenschaften und begibt sich auf die höhere Ebene, wo das Problem auftaucht, welches höhere Wesen das menschliche Gehirn erschaffen hat.